

热加工处理对华贵栉孔扇贝柱特征风味形成的影响

祝亚辉¹, 曹文红^{1,2,3,*}, 刘忠嘉¹, 章超桦^{1,2,3}, 秦小明^{1,2,3}

(1.广东海洋大学食品科技学院, 广东 湛江 524008; 2.广东省水产品加工与安全重点实验室, 水产品深加工广东普通高等学校重点实验室, 国家贝类加工技术研发分中心(湛江), 广东 湛江 524088;
3.南海生物资源开发与利用协同创新中心, 广东 广州 510275)

摘要:采用高效液相色谱和顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用法,在鉴定特征风味化合物组成的基础上,以新鲜和真空冷冻干燥处理的华贵栉孔扇贝柱为对照,探究热加工处理对华贵栉孔扇贝柱特征风味成分的影响。结果表明:扇贝柱粗蛋白和粗脂肪受不同处理方式的影响较小;与新鲜华贵栉孔扇贝柱相比,热加工处理使滋味组分5'-一磷酸腺苷、甜菜碱和Cl⁻含量显著增加($P<0.05$),Na⁺含量也明显增加;游离氨基酸和K⁺含量明显降低,且5'-三磷酸腺苷及其关联化合物(除5'-一磷酸腺苷)、琥珀酸和PO₄³⁻含量显著降低($P<0.05$)。热加工处理的变化比真空冷冻干燥处理的变化更明显。热加工处理扇贝柱与对照组(新鲜贝柱、真空冷冻干燥贝柱)的挥发性成分组成和种类各不相同,分别得到63、34种及64种挥发性风味物质。新鲜贝柱、真空冷冻干燥处理和热加工处理干贝挥发性风味分别以醇类、酸类和烃类、醛类物质为主,总量分别占26.20%、30.84%和29.38%、16.78%。研究表明,热加工处理干贝的特征香气主要呈现鱼腥味、蜂蜜样香气、水果香和油脂味,主要特征风味物质有三甲胺、1-辛烯-3-醇、顺-2-戊烯-1-醇、1-戊烯-3-醇、1-戊醇、壬醛、十一醛、己醛、庚醛、苯甲醛、羊脂醛、癸醛、3-辛酮。

关键词:华贵栉孔扇贝柱;真空冷冻干燥;热加工;气相色谱-质谱联用;特征风味成分

Effect of Heat Processing Treatments on the Formation of Characteristic Flavor Components of *Chlamys nobilis* Adductor Muscle

ZHU Yahui¹, CAO Wenhong^{1,2,3,*}, LIU Zhongjia¹, ZHANG Chaohua^{1,2,3}, QIN Xiaoming^{1,2,3}

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety,
Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Products of Guangdong Higher Education Institution,
National Research and Development Branch Center for Shellfish Processing (Zhanjiang), Zhanjiang 524088, China;
3. South China Sea Bio-Resource Exploitation and Utilization Collaborative Innovation Center, Guangzhou 510275, China)

Abstract: This work reports the effect of heat processing treatments on the characteristic flavor components of *Chlamys nobilis* adductor muscle as determined using high performance liquid chromatography (HPLC) and headspace solid phase micro extraction coupled to GC-MS (HS-SPME-GC-MS), in comparison with fresh and vacuum freeze dried samples. The results showed that the contents of crude protein and crude fat in scallops were little affected by various processing treatments. Compared with fresh *C. nobilis* adductor muscle, the contents of AMP, betain and Cl⁻ and Na⁺ were increased significantly ($P<0.05$) and the contents of free amino acids, K⁺, nucleotides and related compounds (except AMP), succinic acid and PO₄³⁻ were decreased significantly ($P<0.05$) after heat processing treatments. However, vacuum freeze drying caused less significant changes. A total of 63, 34 and 64 volatile compounds were identified from heat processed, fresh and vacuum freeze-dried scallops, respectively. The major volatile compounds in three scallops were alcohols, acids and hydrocarbons, and aldehyde, which accounted for 26.20%, 30.84%, 29.38%, and 16.78% of the total volatile compounds, respectively. The major odors of heat processing treatments scallops were confirmed as fishy, honey like, fruity, fatty

收稿日期: 2016-12-15

基金项目: 广东省科技计划项目(2015A020209164); 广东省教育厅科技创新计划项目(2013KJCX0094);

国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-47)

作者简介: 祝亚辉(1990—),男,硕士研究生,研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail: 1097891728@qq.com

*通信作者: 曹文红(1977—),男,教授,博士,研究方向为海洋生物资源综合利用。E-mail: cchunlin@163.com

and greasy, trimethyl amine, 1-octen-3-ol, (2Z)-2-penten-1-ol, 1-penten-3-ol, 1-pentanol, nonanal, undecanal, hexanal, heptaldehyde, benzaldehyde, octanal, decanal and 3-octanone were found to be involved in the formation of characteristic flavor components.

Key words: *Chlamys nobilis* adductor muscle; vacuum freeze-drying; heat processing treatments; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); characteristic flavor components

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201720019

中图分类号: S985.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2017) 20-0131-08

引文格式:

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.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201720019. <http://www.spkx.net.cn>

ZHU Yahui, CAO Wenhong, LIU Zhongjia, 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. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201720019. <http://www.spkx.net.cn>

干贝是由扇贝的闭壳肌脱水干制而成的, 是名贵海珍品, 以味道鲜美、营养丰富、风味独特、耐贮藏、易加工等优点深受人们喜爱。目前, 扇贝闭壳肌常见的干燥方式有微波干燥、真空冷冻干燥、自然干燥和烘箱干燥。研究发现, 烘箱干燥所得干贝产品的感官品质和氨基酸总量较高, 是扇贝闭壳肌较适宜的干燥方法^[1]。

扇贝柱在干制过程中伴随脂类降解、美拉德反应等化学反应, 使干贝在口感、色泽、气味方面均优于新鲜的扇贝柱, 制得的干贝产品与新鲜扇贝柱相比, 不仅腥味大减, 还产生了干贝特有的肉香味, 干贝香气的形成与加工过程中一系列生化反应产生的挥发性物质有关。目前, 关于扇贝闭壳肌及干贝风味方面的研究中, 黄忠白等^[2]在研究栉孔扇贝柱在不同温度条件下的挥发性物质变化时发现, 90 °C 热加工的扇贝柱比新鲜扇贝柱新产生了1-辛烯-3-醇、1,5-己二烯醇、2-戊炔-1-醇、异戊醇、丙酮、正十一烷、顺-4-庚烯醛、2-乙基呋喃挥发性物质, 并用电子鼻检测到两者在气味方面发生了明显变化。刘征^[3]比较了自然干燥、热风干燥、真空冷冻干燥对海湾扇贝柱挥发性风味物质的影响, 结果发现经热风干燥加工的扇贝柱比冷冻干燥贝柱中的醇类、酯类、酮类和芳香族类气味物质相对含量明显提升, 其中新产生的1-庚醇、丁基苯甲醇、辛醛、癸醛、己酸丁酯和己酸戊酯等挥发性成分赋予了热风干燥扇贝柱可口的风味。Chung等^[4]运用气相色谱-质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 对冷冻和干燥后的扇贝挥发性风味物质进行检测, 结果表明干贝中比冷冻扇贝多检出戊醛、邻二氯苯、甲基萘、1,2-二甲萘、苯甲酸乙酯、茴香烯、愈创木酚、3-己酮、2,3-己二酮、2-癸酮、2-十三酮和茉莉酮等香气成分。

风味是海产品整体可接受性的重要衡量指标, 不同的加工方法会对产品的风味产生不同的影响, 甚至会产生一些新的特征风味^[5]。我国南方海域华贵栉孔

扇贝产量大, 价格低, 其闭壳肌蛋白含量高, 滋味鲜美, 但利用其开发干贝产品及风味特性方面的研究较少。本研究采用高效液相色谱 (high performance liquid chromatography, HPLC) 和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (headspace-solid phase micro extraction-GC-MS, HS-SPME-GC-MS) 联用方法对新鲜、真空冷冻干燥、热加工处理的华贵栉孔扇贝柱风味进行研究, 旨在探讨热加工干贝在风味方面与新鲜贝柱和真空冷冻干燥贝柱的差异性, 探寻其主要特征风味物质, 为下一步干贝加工过程中华贵栉孔扇贝柱风味变化规律研究及干贝产品的生产加工提供理论参考, 对改善干贝产品质量也具有实际的应用价值。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 原料

鲜活华贵栉孔扇贝购于湛江市霞山区步行街东风市场, 冰块冷藏并迅速带回实验室。用尖刀撬开鲜活扇贝外壳, 剥离裙边内脏, 取其闭壳肌暂放于冰浴中, 之后全部用蒸馏水冲洗干净, 分装, 置于超低温冰箱中备用。用打浆机将新鲜贝柱打碎, 真空冷冻干燥 (-53.0 °C, 8.3 Pa) 2 d 取出, 冻藏备用。热加工干贝由图1所示优化工艺制得。

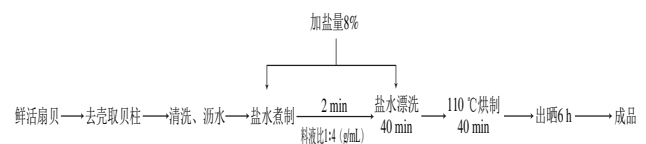


图1 干贝优化生产工艺

Fig. 1 Flow chart of dried scallop production

1.1.2 试剂

5'-二磷酸腺苷 (adenosine 5'-pyrophosphate, ADP, 95%)、5'-肌苷酸 (inosine 5'-monophosphate, IMP, 纯度≥98%)、肌苷 (inosine, HxR, 纯度≥99%)、次黄嘌呤 (hypoxanthine, Hx, 纯度≥99%)、甜菜碱 (纯度≥98%)、琥珀酸 (纯度≥99.5%) 标准品 美国Sigma-Aldrich公司; 5'-一磷酸腺苷 (adenosine 5'-monophosphate, AMP, 98%)、5'-三磷酸腺苷 (5'-deoxyadenylate triphosphate, ATP, 纯度≥95%) 标准品 上海源叶生物科技有限公司; 甲醇为色谱纯, 其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

JJ100型精密电子天平 美国双杰兄弟有限公司; TGL-20M高速台式冷冻离心机 湛江鑫实业有限公司; VULCAN.3-550PD马弗炉 美国Vulcan公司; EMS-4B型磁力搅拌器 上海比朗仪器有限公司; 电热鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司; XW-80A旋涡混合器 上海医大仪器有限公司; 雷磁PHS-3C型pH计 上海仪电科学仪器股份有限公司; SHZ-III型循环水多用真空泵 上海知信实验仪器技术有限公司; e2695型HPLC仪、2489紫外-可见光检测器 美国Waters公司; KQ-500DE型数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司; FDU-1100真空冷冻干燥机 日本东京理化器械株式会社; LC-20AD HPLC仪、UV-2550型紫外检测器、AOC5000-GC-MS-QP2010Plus GC-MS联用仪 日本岛津公司。

1.3 方法

1.3.1 基本营养成分的测定

水分含量测定: 参照GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》中常压干燥法; 粗蛋白含量测定: 参照GB 5009.5—2010《食品中蛋白质的测定》中微量凯氏定氮法; 灰分含量测定: 参照GB 5009.4—2010《食品中灰分的测定》中高温灼烧法; 粗脂肪含量测定: 参照GB/T 5009.6—2003《食品中脂肪的测定》中索氏提取法; 总糖含量测定: 蒽酮比色法。

1.3.2 游离氨基酸含量的测定

采用柱前衍生法测定^[6]。

1.3.3 甜菜碱含量的测定

采用雷氏盐结晶比色法, 参考陈德慰等^[7]方法和NY/T 1746—2009《甜菜中甜菜碱的测定 比色法》。

1.3.4 ATP及其关联化合物含量的测定

1.3.4.1 样品处理

参考翁丽萍等^[8]的研究, 采用热水抽提法, 分别取自制干贝与市售高品质干贝各15.000 0 g (精确到0.000 1 g), 加入4 ℃水40 mL, 高速均质, 匀浆液在沸水浴中保持5 min, 冷却后以10 000 r/min (4 ℃) 离心10 min, 得到的沉淀再用去离子水洗2次, 离心合并上清

液, 定容至50 mL容量瓶中, 4 ℃保存备用。上机检测前用0.22 μm微孔滤膜过滤。

1.3.4.2 HPLC条件

参考刘亚等^[9]的方法。COSMOSIL 5C₁₈-MS-II色谱柱 (4.6 mm×250 mm, 5 μm); 流动相: 含有2%甲醇溶液的 (pH 6.5) 0.05 mol/L KH₂PO₄-K₂HPO₄缓冲溶液; 流速0.6 mL/min, 等度洗脱; 柱温25 ℃; 检测波长254 nm; 进样量20 μL。

1.3.5 琥珀酸含量的测定

参考GB/T 5009.157—2003《食品中有机酸的测定》及刘亚等^[10]的方法。

样品处理: 准确称取5 g左右样品, 用30 mL 2% NH₄H₂PO₄ (pH 2.5) 混匀, 超声振荡20 min, 11 000 r/min离心20 min, 取上清液, 沉淀再加入15 mL 2% NH₄H₂PO₄ (pH 2.5) 超声振荡5 min, 离心后合并上层清液置于50 mL容量瓶, 2% NH₄H₂PO₄ (pH 2.5) 溶液定容至刻度, 4 ℃保存备用。

色谱条件: COSMOSIL 5C₁₈-MS-II色谱柱 (4.6 mm×250 mm, 5 μm); 流动相: 2% NH₄H₂PO₄ (pH 2.5) 溶液; 流速1.2 mL/min; 柱温25 ℃; 检测波长205 nm; 进样量20 μL。

1.3.6 无机离子含量的测定

阳离子 (K⁺、Na⁺): 食品中K⁺、Na⁺含量的测定参考GB/T 5009.91—2003《食品中钾、钠的测定》。

阴离子: Cl⁻含量测定参照GB/T 12457—2008《食品中氯化钠的测定》硝酸银滴定法, PO₄³⁻含量测定参照GB/T 5009.87—2003《食品中磷的测定》钼蓝比色法。

1.3.7 挥发性风味物质检测

SPME条件: 将老化后的萃取头插入样品瓶于60 ℃萃取30 min后移进GC-MS联用仪进样口于250 ℃解吸3 min。

GC条件: Rtx-5MS弹性毛细管柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 程序升温: 初始柱温50 ℃, 保持5 min, 然后以5 ℃/min升至160 ℃, 保持5 min, 再以10 ℃升至250 ℃, 保持2 min; 进样口温度250 ℃; 载气量 (He) 流量1.0 mL/min; 不分流。

MS条件: 电子电离源; 电子能量70 eV; 接口温度250 ℃; 离子源温度230 ℃; 质量扫描范围40~400 u。

1.4 数据处理

方差分析 (ANOVA) 用SPSS软件进行显著性 ($P<0.05$) 分析, 作图采用Origin 8.0软件。

GC-MS检测结果采用计算机谱库 (NIST 14.lib/Wiley 9.lib) 自动检索。将谱库中化合物相似度低于80 (最大值为100) 的组分标为未鉴定出。各组分相对含量按照峰面积归一化法计算。

2 结果与分析

2.1 热加工处理组和对照组扇贝柱基本营养成分分析

表1 热加工处理和对照组基本营养成分

Table 1 Nutritional composition of heat processed and control samples

样品	水分质量分数	粗蛋白质量分数	粗脂肪质量分数	总糖质量分数	灰分质量分数
热加工干贝	11.61 ^a ±0.58	69.28±1.56 (78.38 ^a)	2.36±0.04 (2.67 ^a)	5.97±0.07 (6.75 ^a)	7.27±0.38 (8.19 ^a)
新鲜贝柱	76.88 ^a ±1.41	14.81±0.66 (86.95 ^a)	0.50±0.03 (2.16 ^b)	1.78±0.12 (5.24 ^b)	1.39±0.01 (6.03 ^b)
真空冷冻干燥贝柱	4.56 ^a ±0.66	81.10±2.77 (84.97 ^a)	2.49±0.05 (2.61 ^b)	4.59±0.35 (4.81 ^b)	6.68±0.07 (7.21 ^b)

注：括号外数据为湿基含量，括号内为干基含量，表3~5同；同列肩标不同字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

由表1可知，3种样品的粗蛋白质量分数均在75%以上，且无显著性差异；粗脂肪含量相对较低，扇贝柱及其干制品是一种高蛋白低脂肪的营养食品。热加工处理组与新鲜贝柱比较扇贝柱总糖和灰分含量差异显著（ $P<0.05$ ），灰分含量的增加主要与热加工过程中盐水煮制和浸泡有关。高含量的蛋白质和糖有助于扇贝柱热加工过程中美拉德反应的进程，同时也为风味前体物质的形成提供了保障。

2.2 热加工处理组和对照组扇贝柱呈味成分分析

表2 热加工处理和对照组游离氨基酸含量及TAV

Table 2 Free amino acid composition and TAVs of heat processed and control samples

氨基酸	呈味特性 ^[11-12]	阈值 ^[12] (mg/100 mL)	新鲜贝柱		真空冷冻干燥贝柱		热加工干贝	
			含量/ (mg/100 g)	TAV	含量/ (mg/100 g)	TAV	含量/ (mg/100 g)	TAV
天冬氨酸Asp [*]	鲜甜(+++)	100	54.84	0.55	14.67	0.15	<5	
谷氨酸Glu [*]	酸(++)/鲜(++)	30	685.56	22.85	681.06	22.70	147.03	4.90
丝氨酸Ser [*]	甜(++)/鲜(+)	150	73.13	0.49	23.05	0.15	14.71	0.10
甘氨酸Gly [*]	甜(++)	130	4936.01	37.97	4086.34	31.43	1866.73	14.36
苏氨酸Thr	甜(++)/苦(+)	260	123.40	0.47	53.44	0.21	18.10	0.07
组氨酸His	苦(++)	20	41.59	2.08	12.57	0.63	15.84	0.79
丙氨酸Ala [*]	甜(++)	60	379.34	6.32	513.41	8.56	62.22	1.04
精氨酸Arg	苦(+++)/甜(+++)	50	1828.15	36.56	1592.62	31.85	859.83	17.20
酪氨酸Tyr	苦(+)		91.41		12.57		8.82	
缬氨酸Val	甜(+)/苦(+++)	40	132.54	3.31	28.29	0.71	8.03	0.20
蛋氨酸Met	苦甜(+)	30	50.27	1.68	23.05	0.66	10.41	0.20
苯丙氨酸Phe	苦(+++)	90	109.69	1.22	23.05	0.26	6.22	0.12
异亮氨酸Ile	苦(+++)	90	109.69	1.22	13.62	0.15	7.92	0.07
亮氨酸Leu	苦(+++)	190	173.67	0.91	13.62	0.07	7.92	0.04
赖氨酸Lys	甜(++)/苦(++)	50	137.11	2.74	38.77	0.78	20.36	0.41
脯氨酸Pro [*]	甜(+++)/苦(+++)	300	105.12	0.35	50.29	0.17	19.23	0.06
游离氨基酸总量			9031.54		7177.28		3071.41	

注：表中含量均以干基计；TAV.呈味强度值（taste active value）；*.主要呈味氨基酸；+.呈味强度，+越多呈味强度越大，表3同。

贝肉的滋味成分主要是指水溶性抽提物中的小分子成分，包括含氮成分（游离氨基酸、小分子肽、ATP关联化合物、有机碱等）和非含氮成分（小分子糖、有机酸、无机盐等）。游离氨基酸不仅是海产品鲜味的主要来源，同时还体现出甜味、苦味等多种复杂的滋味特征，更重要的是还可以与核苷酸类物质一起，有显著提

升海产品总体滋味品质的效果，甚至有些氨基酸对调节贝类体内的渗透压有重要作用。甜菜碱是贝肉中常见的含氮碱，对提升体系的甜味、鲜味、海产风味和总体风味有重要贡献。贝类富含琥珀酸，主要由糖酵解反应生成，影响贝类的风味。此外，还含有不可或缺的辅助呈味成分无机离子。

如表2所示，华贵栉孔扇贝柱的游离氨基酸主要有谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸和精氨酸。呈鲜味的氨基酸主要是谷氨酸，其刺激阈值较低，可改善贝类总体风味，使贝类的味道更加鲜美。热加工处理的干贝游离氨基酸总量由鲜贝柱的9031.54 mg/100 g减少到3071.41 mg/100 g，氨基酸总量的减少可能是热加工经历了煮制和漂洗阶段使得氨基酸流失所致。真空冷冻干燥过程因低温低压对扇贝柱氨基酸损失影响较小，因此，游离氨基酸总含量高于热加工干贝，为7177.28 mg/100 g。

表3 热加工处理和对照组ATP及其关联化合物含量及TAV

Table 3 Concentrations and TAVs of ATP-related compounds in heat processed and control samples

核苷酸 关联物	呈味 特性 ^[14]	阈值 ^[15] (mg/100 mL)	新鲜贝柱		真空冷冻干燥贝柱		热加工干贝	
			含量/ (mg/100 g)	TAV	含量/ (mg/100 g)	TAV	含量/ (mg/100 g)	TAV
IMP	鲜(+)	25	4.29±0.06 (19.59 ^a)	0.78	15.63±0.20 (16.37 ^a)	0.65	14.85±0.57 (16.80 ^b)	0.67
ATP	鲜(+)		3.27±0.05 (14.95 ^a)		7.36±0.18 (7.72 ^a)		1.53±0.04 (1.73 ^a)	
ADP	鲜(+)		10.70±0.17 (48.91 ^a)		30.55±0.43 (32.01 ^a)		19.58±0.11 (22.15 ^a)	
Hx	鲜(+)		63.45±0.78 (289.99 ^a)		193.22±4.02 (202.45 ^a)		59.17±0.81 (66.95 ^a)	
AMP	鲜(+)	50	25.27±0.20 (115.49 ^a)	2.31	61.26±1.67 (95.62 ^a)	1.91	109.59±1.43 (123.99 ^a)	4.96
HxR	鲜(+)		38.36±0.56 (175.30 ^a)		113.20±2.41 (118.61 ^a)		43.01±0.51 (48.66 ^a)	

注：同行肩标不同字母表示差异显著（ $P<0.05$ ），表4、5同。

如表3所示，ATP及其关联化合物是水产品鲜味产生的主要因素。甲壳类动物中，因为AMP脱氨酶活性较低，易积累^[13]，因此热加工处理和对照组贝柱的AMP含量普遍较高。对贝类风味有突出贡献的IMP可以在单独呈味的同时又与谷氨酸钠起到相辅的作用，使鲜味增强^[13]。有报道称^[14]，海洋无脊椎动物中ATP降解途径与鱼类的不太一致，在降解过程中主要以AMP的形式积累，IMP的含量相对较少，但这一观点尚存在争议。例如，王丹妮等^[15]对冷藏条件下文蛤和缢蛏ATP关联产物的降解途径进行了探究，并推测出缢蛏和文蛤有2条代谢途径，分别为ATP→ADP→AMP→IMP→HxR→Hx→Xt和ATP→ADP→AMP→AdR→HxR→Hx→Xt。由表3可以看出，3种不同组的华贵栉孔扇贝柱中IMP的含量均较低，热加工处理使贝柱中的ATP及其关联化合物（除AMP）含量显著降低（ $P<0.05$ ），真空冷冻干燥处理的贝柱中ATP关联物含量均显著减少（ $P<0.05$ ）。

琥珀酸是贝类呈味相关的主要有机酸^[17]，其丰富的含量主要源于贝类体内含有丰富的糖原。如表4所示，与新鲜华贵栉孔扇贝柱相比，热加工处理的贝柱琥珀酸含量显著下降（ $P<0.05$ ），由9.41 mg/g下降到5.46 mg/g，

损失了近41.98%。相反,真空冷冻干燥贝柱中琥珀酸含量却显著增加到了12.57 mg/g。甜菜碱是一类季铵类化合物,是一种重要的甜味物质,热加工处理对其影响显著($P<0.05$),含量比鲜贝柱增加了6.70 mg/g,而真空冷冻干燥处理对其影响不显著。

表 4 热加工处理、对照组琥珀酸和甜菜碱含量及TAV
Table 4 Concentrations and TAVs of succinic acid and betain in heat processed and control samples

有机酸、碱	呈味特性 ^[16]	阈值 ^[16] (mg/100 mL)	新鲜贝柱		真空冷冻干燥贝柱		热加工干贝	
			含量/(mg/g)	TAV	含量/(mg/g)	TAV	含量/(mg/g)	TAV
琥珀酸			2.06±0.05 (9.41 ^a)		12.00±0.44 (12.57 ^b)		4.83±0.05 (5.46 ^c)	
甜菜碱	甜	25	0.73±0.12 (3.34 ^a)	13.36	2.19±0.03 (2.29 ^a)	9.16	8.87±0.29 (10.04 ^b)	40.16

表 5 热加工处理和对照组无机离子含量及TAV
Table 5 Concentrations and TAVs of inorganic ions in heat processed and control samples

无机离子	阈值 ^[21] (mg/100 mL)	新鲜贝柱		真空冷冻干燥贝柱		热加工干贝	
		含量/(mg/100 g)	TAV	含量/(mg/100 g)	TAV	含量/(mg/100 g)	TAV
Na ⁺	180	126.00 (575.87)	3.20	626.00 (655.91)	3.64	3 180.00 (3 597.69)	19.99
K ⁺	130	291.00 (1 329.98)	10.23	1 510.00 (1 582.15)	12.17	500.00 (565.67)	4.35
Cl ⁻ *		0.24±0.02 (1.11 ^a)		1.27±0.03 (1.33 ^a)		4.85±0.13 (5.49 ^b)	
PO ₄ ³⁻	130	137.55±14.51 (628.65 ^a)	4.84	477.09±13.00 (500.35 ^b)	3.85	196.26±8.15 (222.04 ^c)	1.71

注: *.数据单位%。

无机离子是海产品中不可或缺的辅助呈味成分。一般认为,鱼、贝类的呈味主要与Na⁺、K⁺、Cl⁻、PO₄³⁻等无机离子的关系密切,尤其是Na⁺和Cl⁻,对呈味的影响更大^[18]。Na⁺的缺失可导致贝类甜味、咸味、鲜味和特征风味的明显劣化,Cl⁻的缺失使合成抽提物几乎无味,而K⁺的缺失会降低贝类的鲜味和总体风味^[19]。PO₄³⁻对呈味起修饰作用,其缺失会使咸味、甜味、鲜味稍有下降。热加工处理的干贝经过盐水煮制和漂洗阶段,因此,其Na⁺和Cl⁻的含量显著增加($P<0.05$),适量食盐不但能改善扇贝的风味,还可抑制细菌的繁殖;相反,K⁺和PO₄³⁻由于热加工过程煮制阶段造成的汁液流失,其含量也随之显著降低。真空冷冻干燥处理对华贵栉孔扇贝柱中几种无机离子的影响不太明显。

2.3 热加工处理组和对照组扇贝柱挥发性成分分析
用HS-SPME-GC-MS联用法检测3种不同处理组样品挥发性风味化合物成分,得到GC-MS总离子流图,见图2。

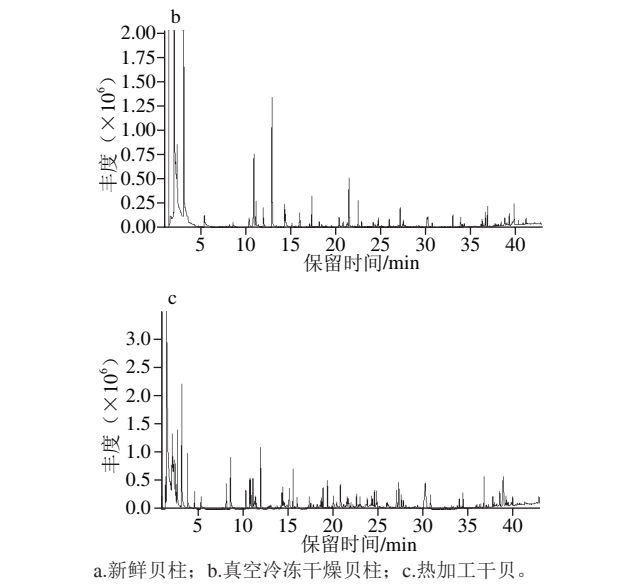
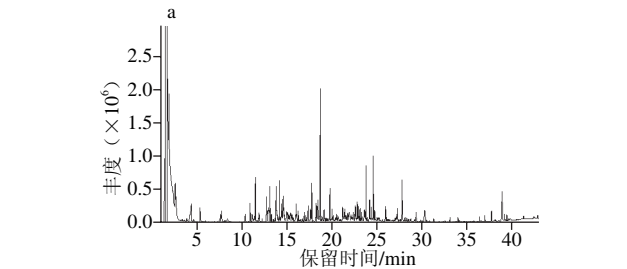


图 2 热加工处理和对照组样品挥发性化合物GC-MS总离子流图
Fig. 2 GC-MS total ion current chromatogram of volatile compounds of heat processed and control samples

热加工处理和对照组各组分质谱经计算机谱库检索比对,分析并鉴定出的挥发性气味成分按类别统计见表6。

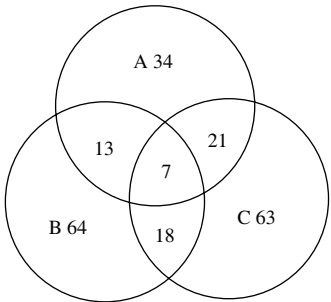
表 6 热加工处理和对照组主要挥发性成分HS-SPME-GC-MS分析结果
Table 6 Main volatile components identified by SPME-GC-MS in heat processed and control samples

类别	化合物名称	相对含量/%			阈值/ (μg/kg)	气味描述 ^[22,23]
		新鲜贝柱	真空冷冻干燥贝柱	热加工干贝		
醇类	庚醇 <i>n</i> -heptanol	1.35	—	0.99	3 ^[20]	酒香
	¹⁵ 1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	3.70	0.37	1.04	10 ^[21]	蘑菇味、泥土味
	2-乙基-1-己醇 2-ethylhexanol	17.22	—	0.28		
	反-2-辛烯-1-醇 <i>trans</i> -2-octen-1-ol	3.15	—	0.64		
	顺-2-戊烯-1-醇 (2Z)-2-penten-1-ol	—	0.21	0.25		生水果味,柑橘味
	环己甲醇 cyclohexanemethanol	—	1.70	—		
	四氢薰衣草醇 1-hexanol,5-methyl-2-(1-methylethyl)-	—	1.20	—		
	1-戊醇-3-醇 1-penten-3-ol	—	—	0.94	400 ^[21]	烤洋葱味
	1-戊醇 1-pentanol	—	—	1.61	120 ^[21]	酒香,醚香,柔和甜瓜味
	反-2-十一烯醇 2-undecen-1-ol, (2E)-	—	—	1.11		
醛类	总计	26.20	6.59	8.60		
	⁹ 壬醛 1-nonanal	0.30	0.48	1.23	1 ^[21]	青草味、脂肪味
	十一醛 undecanal	0.33	—	0.37		油脂味
	肉豆蔻醛 tetradecanal	4.11	—	3.03		
	戊醛 pentanal	—	—	3.29	12~14 ^[21]	
	己醛 hexanal	—	—	0.52	4.5 ^[21]	青草味、花香味
	庚醛 heptaldehyde	—	—	1.08	3 ^[21]	清香味
	苯甲醛 benzaldehyde	—	—	1.06	350~3 500 ^[20]	杏仁香、坚果香
	辛醛 octanal	—	—	3.11		蜂蜜样香气
	癸醛 decanal	—	—	0.80		奶油香、甜味、坚果香
	十三醛 tridecanal	—	—	1.65		
	总计	5.31	0.67	16.78		
	氨基甲酸甲酯 methyl carbamate	6.05	—	—		
	⁹ 邻苯二甲酸二乙酯 1,2-benzenedicarboxylic acid diethyl ester	1.73	0.70	4.47		
	⁹ 邻苯二甲酸二异丁酯 diisobutyl phthalate	0.34	0.35	1.82		

续表6

类别	化合物名称	相对含量/%			阈值/ (μg/kg)	气味描述 ^[22-23]
		新鲜 贝柱	真空冷冻 干燥贝柱	热加工 干贝		
酯类	二己酸二辛酯 dioctyl adipate	2.05	2.64	3.08		
	邻苯二甲酸二丁酯 dibutyl phthalate	0.42	—	1.39		
	苯丙氨酸 phenylpropanoate	—	0.24	0.35		
	磷酸三丁酯 tributyl phosphate	—	2.02	1.59		
	总计	10.60	5.94	13.45		
酮类	2-壬酮 2-nonanone	0.54	—	0.89	5~200 ^[21]	
	甲基壬基甲酮 2-undecanone	6.90	—	0.57		
	香叶基丙酮 geranylacetone	0.91	0.27	0.54		
	3-辛酮 3-octanone	—	0.23	0.39	28 ^[21]	水果香、熟香蕉味
	2,3-辛二酮 2,3-octanedione	—	—	0.39		
酸类	植酮 perhydrofarnesyl acetone	—	—	0.64		
	总计	8.63	2.02	3.43		
	乙酸 acetic acid glacial	9.36	24.99	1.69	22 000 ^[21]	醋味、酸味
	丙酸 propionic acid	—	2.78	—		
	丁酸 butyric acid	—	2.61	—		臭味、发酵味
炔类	2-乙基丁酸 2-ethylbutyric acid	—	—	1.19		
	总计	9.80	30.84	4.92		
	1-十三烯 1-tridecene	0.87	—	0.44		
	十四烷 tetradecane	0.82	0.33	—		
	甲苯 toluene	—	0.19	—	200 ^[21]	塑料、化学气味
其他	2,2,4,6,6-五甲基庚烷 2,2,4,6,6-pentamethyl-heptane	—	3.16	0.21		
	2,2,3,4-四甲基戊烷 pentane,2,2,3,4-tetramethyl-	—	1.71	—		
	2,2,5-三甲基己烷 hexane,2,2,5-trimethyl-	—	1.81	—		
	3-甲基十一烷 undecane, 3-methyl-	—	1.55	—		
	1-十二烯 1-dodecene	—	1.23	—		
其他	十二烷 dodecane	—	4.93	—		
	二十三烷 tricosane	0.44	0.64	0.55		
	十七烷 heptadecane	—	2.21	1.34		
	3-亚甲基十三烷 tridecane, 3-methylene-	—	1.21	—		
	十六烷 hexadecane	2.95	2.69	0.58		
其他	2,6,10,14-四甲基十五烷 2,6,10,14-tetramethylpentadecane	—	—	0.26		清香和甜香
	十八烷 octadecane	—	—	1.07		
	总计	5.89	29.38	6.19		
	三甲胺 trimethyl amine	5.38	18.66	32.93	0.37~1.06 ^[24]	鱼腥味
	甲基磺酸酐 methanesulfonic anhydride	18.08	—	3.34		
其他	四硝基甲烷 tetranitromethane	6.78	2.07	0.98		
	甲基磺酰甲磺酸 methyl sulfone	—	—	3.74		
	2-苯基咪唑啉 2-benzylimidazoline	—	—	5.09		
	总计	33.58	23.81	46.60		

注：— 未检出；※. 3 种样品共有成分。



A.新鲜贝柱；B.真空冷冻干燥贝柱；C.热加工干贝。

图3 热加工处理和对照组挥发性物质种类分析

Fig. 3 Volatile species analysis of heat processed and control samples

新鲜贝柱、真空冷冻干燥贝柱、热加工干贝中分别鉴定出34、64种和63种挥发性成分。其中挥发性成分主要有醇类、酮类、醛类、酸类、酯类和炔类等化合物。对三者的挥发性物质种类进行比较，如图3所示，真空冷冻干燥贝柱和热加工干贝的挥发性物质种类接近，两者共有18种相同挥发性物质；但其与新鲜贝柱的挥发性物质差异较大，且分别与新鲜贝柱有13种和21种物质相同。三者综合比较，发现共有7种相同的挥发性化合物。

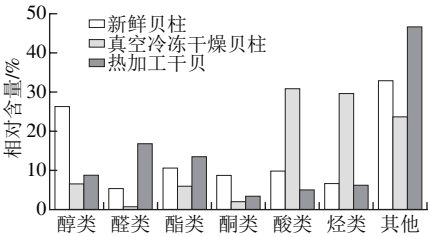


图4 热加工处理和对照组挥发性物质相对含量对比

Fig. 4 Comparison of volatile compounds of heat processed and control samples

热加工处理和对照组的挥发性成分如表6、图4所示。挥发性物质主要可以分为7类：醇类、醛类、酯类、酮类、酸类、炔类和其他。总体来看，3种样品的其他类挥发性物质相对含量占有较大的比例，这主要因为在3种样品中都检测出了较高含量的三甲胺，相对含量分别为5.38%、18.66%和32.93%。

其余6类化合物中，新鲜贝柱中醇类化合物相对含量最高，占26.20%；酯类、酮类、酸类相对含量相差不大，分别为10.60%、8.63%和9.80%。真空冷冻干燥贝柱相对含量较高的有酸类和炔类，分别占30.84%和29.38%，醛类化合物相对含量最低，仅有0.67%；而在真空冷冻干燥处理的海湾扇贝柱^[3]中检测出94种挥发性物质，其中醛类、酯类和炔类含量分别为9.77%、13.91%和13.44%。热加工干贝挥发性风味化合物中醛类相对含量最高，为16.78%，其次是酯类，占13.45%；从120℃处理的栉孔扇贝柱^[2]和热风干燥海湾扇贝柱^[3]中分别检测到7、79种挥发性化合物，且栉孔扇贝柱的挥发性物质主要以醇类（82.86%）为主，酸类化合物含量仅为0.47%，而海湾扇贝中酯类（15.85%）和芳香族化合物（14.22%）含量最高。由此可知，从不同种类扇贝柱中检测的挥发性化合物，在种类和含量上均有明显的差异性，由其加工而成的干贝也会呈现不同的整体风味。

总体而言，相对于新鲜贝柱，经过热加工处理的干贝中醇类、酮类、酸类和炔类化合物呈减少趋势，而醛类和酯类则呈上升趋势。

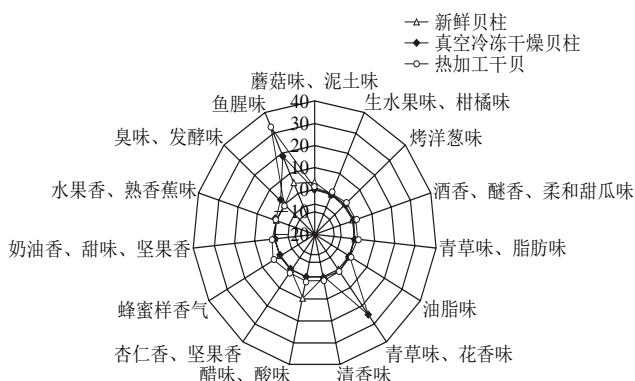


图5 热加工处理和对照组贝柱风味雷达图

Fig. 5 Flavor radar map of heat processed and control samples

由图5可知,新鲜贝柱和真空冷冻干燥贝柱风味特征主要以醋味、酸味和鱼腥味为主,而经过热加工的干贝除了较突出的鱼腥味,还产生了一些新的具有烤洋葱味、酒香、醚香、杏仁、坚果香、蜂蜜样等香气特征的挥发性成分。

2.3.1 热加工处理贝柱与对照组中醇类化合物对比分析

一般来说,醇类物质由于自身高阈值的特点,对食品的风味贡献不明显^[25]。热加工处理和对照组贝柱鉴定的醇类物质中均有1-辛烯-3-醇,俗称蘑菇醇,且热加工的干贝中1-辛烯-3-醇相对含量有减少的趋势,由鲜贝柱的3.70%减为1.04%,其作为一种亚油酸氢过氧化物的降解产物,能产生一种类似蘑菇的气味^[2]。在新鲜贝柱中检测到的醇类物质主要还有2-乙基-1-己醇、庚醇和反-2-辛烯-1-醇,2-乙基-1-己醇可以表现出蘑菇的味道^[24],其相对含量随着热加工处理而减少,由17.22% (鲜贝柱)降到0.28% (热加工干贝);另2种风味物质反-2-辛烯-1-醇和庚醇相对含量随着热加工也有所减少,分别由3.15%、1.35% (与新鲜贝柱)降到0.64%、0.99% (热加工干贝)。热加工处理过后的干贝与新鲜贝柱相比,还含有一些特有的醇类物质,如顺-2-戊烯-1-醇、1-戊烯-3-醇、1-戊醇和反-2-十一烯醇,其中1-戊烯-3-醇具有水果香气^[24],这些醇类物质对热加工干贝主要贡献出蘑菇味、生水果、柑橘味、烤洋葱味和酒香等香气特征。

2.3.2 热加工处理贝柱与对照组中醛类化合物对比分析

醛类化合物由于其阈值比醇类的低,所以对气味的的影响相对于醇类重要^[19],一般具有青香、果香、坚果香和甜香。新鲜贝柱和真空冷冻干燥贝柱中醛类物质相对含量分别为5.31%和0.67%,但热加工干贝中其相对含量明显升高,为16.78%。不同的醛类呈现不同的气味, $C_3 \sim C_4$ 醛类化合物具有强烈的刺激气味; $C_5 \sim C_9$ 醛类具有青香、油蜡和油腻味; $C_{10} \sim C_{12}$ 醛类具有橘皮和柠檬味^[26]。热加工干贝中的壬醛相对含量比其余2种样品均高,作为低阈值醛类,可能对热加工干贝的风味有重要影响。而热加工干贝中独有的戊醛、己醛、庚醛、苯甲醛、羊

脂醛、癸醛和十三醛,这些低阈值醛类即使在痕量条件下,也有很强的与其他风味物质重叠的风味效应^[5]。其中羊脂醛在高度稀释后具有愉快的蜂蜜样香气^[27],对构成热加工干贝的香味具有贡献作用。苯甲醛被认为是烤花生的主要香气化合物,具有令人愉快的杏仁香、坚果香和水果香^[28]。热加工干贝中醛类物质是鲜贝柱的3倍多,这些醛类物质可能是区别新鲜贝柱和干贝特征风味的因素之一。

2.3.3 热加工处理贝柱与对照组中酯类化合物对比分析

酯类物质是发酵或脂质代谢产物生成的羧酸和醇酯化作用的产物^[29],赋予食品甜香、水果香和花香^[30-31]。由表3可知,3种样品中酯类物质种类并不多,分别为5、5种和7种,但其总的相对含量在挥发性物质中占有较高的比例,分别为10.60%、5.94%和13.45%。其中3种处理组共有的酯类化合物为邻苯二甲酸二乙酯、邻苯二甲酸二异丁酯和己二酸二辛酯,且热加工后相对含量均有上升趋势。

2.3.4 热加工处理贝柱与对照组中酮类化合物对比分析

酮类物质很可能是多不饱和脂肪酸受热氧化和降解的产物,其往往具有甜的花香和果香^[32]。相对新鲜贝柱,真空冷冻干燥贝柱和热加工干贝的酮类物质总量均有所减少,热加工干贝中酮类由鲜贝柱的8.63%降为3.43%。而在种类上却比新鲜贝柱多了3种,分别为3-辛酮(0.39%)、2,3-辛二酮(0.39%)和植酮(0.64%)。有研究证实^[33],由于脂质氧化,2,3-辛二酮是肉制品预煮异味的主要贡献物之一。3-辛酮有温和的水果味、熟香蕉味,同时呈似薰衣草的草药气味^[34],正是这些物质的存在,赋予了热加工干贝的香气特征。

2.3.5 热加工处理贝柱与对照组中酸类化合物对比分析

新鲜贝柱和真空冷冻干燥贝柱中均检测出较高相对含量的乙酸,分别为9.36%和24.99%,乙酸主要是由饱和脂肪酸受热分解所产生,主要呈现不良的酸败臭味,是鱼臭味的特征成分^[19],而何炘^[35]研究表明乙酸是贻贝蒸煮液的有效香气成分。热加工干贝中乙酸相对含量较之前两者大大减少,仅为1.69%。

2.3.6 热加工处理贝柱与对照组中烃类和其他化合物对比分析

通常大多数烃类化合物具有清香和甜香风味,特别是具有支链的烷烃,是由脂质衍生出来的,对海产贝类风味有非常重要的作用,但是烃类化合物阈值一般较高,对食品整体风味贡献较小^[2]。新鲜贝柱和热加工干贝相对于真空冷冻干燥贝柱而言,检测到了较少的烃类物质,分别为7种和11种,其总量分别为5.89%和6.19%,热加工干贝烃类相对含量有所减少。而真空冷冻干燥贝柱中鉴定出的烃类物质有26种,相对含量达到29.38%,可见烃类化合物主要是真空冷冻干燥贝柱风味物质。报道称2,6,10,14-四甲基十五烷呈现清香和甜香^[36-37],在加

工后的虾和蟹肉中均被检测到,而在3种样品中仅干贝中被检测到该物质(0.26%),赋予了干贝独特的清香、甜香气味。

此外,热加工干贝中亦存在多种($C_{13} \sim C_{22}$)的烃类,也有一些相对含量较高的甲基磺酸酐(3.34%),甲基磺酰甲烷(3.74%)和2-苯甲基咪唑啉(5.09%),其中甲基磺酰甲烷和2-苯甲基咪唑啉是干贝中独有的,新鲜贝柱和真空冷冻干燥贝柱中均未发现,这些物质可能对热加工干贝整体风味也有一定的贡献。

综上所述,对热加工干贝风味影响最大的是醛类和醇类物质。与其他两组相比,热加工处理能产生不同于新鲜贝柱的特征肉香味的原因主要是煮制、烘制和日晒过程中脂肪、蛋白质的氧化降解和Maillard反应所致。

3 结论

利用HPLC和HS-SPME-GC-MS法,鉴定干贝特征风味化合物的组成。与新鲜华贵栉孔扇贝柱相比,热加工处理使AMP、甜菜碱和 Cl^- 含量显著增加($P < 0.05$), Na^+ 含量也明显增加;游离氨基酸和 K^+ 含量明显降低,且ATP及其关联化合物(除AMP)、琥珀酸和 PO_4^{3-} 含量显著降低($P < 0.05$),热加工处理的变化比真空冷冻干燥处理的变化更为明显。对热加工干贝的滋味贡献较大的成分主要有谷氨酸、甘氨酸、精氨酸、AMP、甜菜碱、 Na^+ 和 Cl^- 。对热加工干贝香气成分有贡献的物质主要有1-辛烯-3-醇、顺-2-戊烯-1-醇、1-戊烯-3-醇、1-戊醇、壬醛、十一醛、己醛、庚醛、苯甲醛、羊脂醛、癸醛、3-辛酮和三甲胺,这些成分可能是热加工干贝的特征香气成分。

本研究主要对华贵栉孔扇贝柱特别是热加工干贝的风味组成探讨提供了一些初步的数据,也为今后继续对华贵栉孔扇贝柱干贝的生产加工以及热加工过程中风味的变化规律与蛋白、脂质氧化之间的相关性研究提供理论参考。

参考文献:

- [1] 李书红,王颖,宋春风,等.不同干燥方法对即食扇贝柱理化及感官品质的影响[J].农业工程学报,2011,27(5):373-377. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2011.05.065.
- [2] 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):99-102. DOI:10.7506/spkx.1002-6630-201604018.
- [3] 刘征.扇贝干燥关键技术研究[D].保定:河北农业大学,2012:48-53.
- [4] CHUNG H Y, YUNG I K S, MA W C J, et al. Analysis of volatile components in frozen and dried scallops (*Patinopecten yessoensis*) by gas chromatography/mass spectrometry[J]. Food Research International, 2002, 35: 43-53. DOI:10.1016/S0963-9969(01)00107-7.
- [5] SHAHIDI F. 肉制品与水产品的风味[M].李洁,朱国斌,译.北京:中国轻工业出版社,2001:143-175.
- [6] 杨月欣,王光亚.实用食物营养成分分析手册[M].北京:中国轻工业出版社,2002:41-42.
- [7] 陈德慰,苏健,颜栋美,等.广西北部湾常见水产品中甜菜碱含量测定及呈味效果评价[J].现代食品科技,2011,27(4):468-472. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2011.04.031.
- [8] 翁丽萍,戴志远,赵芸.养殖大黄鱼和野生大黄鱼特征滋味物质的分析和比较[J].中国食品学报,2015,15(4):254-261. DOI:10.16429/j.1009-7848.2015.04.034.
- [9] 刘亚,章超桦,陆子峰.高效液相色谱法检测水产品中的ATP关联化合物[J].食品与发酵工业,2010,36(6):137-141. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2010.06.027.
- [10] 刘亚,邱创平.高效液相色谱法检测贝类中的乳酸和琥珀酸[J].食品科学,2012,37(1):268-274. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2012.01.010.
- [11] 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. DOI:10.3724/SPJ.1118.2014.00351.
- [12] 翁丽萍,赵芸,陈飞东,等.养殖大黄鱼滋味成分及其呈味贡献的研究[J].食品工业科技,2015,36(3):82-90. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.03.008.
- [13] 薛长湖,陈修白.养殖和海捕两类中国对虾尝味成分的分析比较[J].青岛海洋大学学报(自然科学版),1991,21(3):91-100.
- [14] ARAI K I, SAITO T. Changes in adenine nucleotides in the muscle of some marine invertebrates[J]. Nature, 1961, 480: 451-452. DOI:10.1038/192451a0.
- [15] 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):230-233. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201609039.
- [16] 王晓谦,秦小明,郑惠娜,等.超高压杀菌处理和热处理对香港牡蛎肉品质的影响[J].食品与发酵工业,2015,41(11):94-99. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201511017.
- [17] 沈新月.水产食品学[M].北京:中国农业出版社,2001.
- [18] 汤辰婧,王锡昌,刘源,等.水产品滋味成分研究及开发利用进展[J].水产科技情报,2013,40(3):164-168. DOI:10.3969/j.issn.1001-1994.2013.03.012.
- [19] 章超桦,解万翠.水产风味化学[M].北京:中国轻工业出版社,2012:40-41;92-102.
- [20] 孙保国,何坚.香精概论:生产、配方与应用[M].北京:化学工业出版社,2006:446-456.
- [21] 卢春霞,翁丽萍,王宏海,等.3种网箱养殖鱼类的主体风味成分分析[J].食品与发酵工业,2010,36(10):163-169. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2010.10.032.
- [22] 李来好,丁丽丽,吴燕燕,等.咸鱼中的挥发性风味成分[J].水产学报,2012,36(6):980-988. DOI:10.3724/SPJ.1231.2012.27682.
- [23] 史孝霞.牛脂酶解-温和加热氧化形成特征风味前体的研究[D].无锡:江南大学,2013.
- [24] 蔺佳良,缪芳芳,蔡江佳,等.中华绒螯蟹不同部位挥发性物质的研究[J].核农学报,2014,28(2):259-269. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2014.02.0259.
- [25] 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. DOI:10.1016/j.foodres.2012.06.033.
- [26] 高瑞昌,苏丽,黄星奕,等.水产品风味物质的研究进展[J].水产科学,2013,32(1):59-62. DOI:10.16378/j.cnki.1003-1111.2013.01.014.
- [27] 孙宝国.食用调香术[M].北京:化学工业出版社,2003:22-346.
- [28] HSIEH T C Y, VEJAPHAN W, WILLIAMS S S, et al. Volatile flavor components in thermally processed louisiana red swamp crayfish and blue crab[J]. American Chemical Society, 1989, 4(9): 386-395. DOI:10.1021/bk-1989-0409.
- [29] 李伟青,王颖,孙剑锋,等.贮存过程中即食贝柱风味成分分析[J].食品工业,2011,32(10):103-105.
- [30] 缪芳芳,丁媛,蔺佳良,等.应用电子鼻和气质联用仪研究不同采收季节浙苔的挥发性物质[J].现代食品科技,2014,30(8):258-263. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.08.010.
- [31] KEENAN D F, BRUNTON N P, MITCHELL M, et al. Flavour profiling of fresh and processed fruit smoothies by instrumental and sensory analysis[J]. Food Research International, 2012, 45(1): 17-25. DOI:10.1016/j.foodres.2011.10.002.
- [32] 金燕,杨荣华,周凌霄,等.蟹肉挥发性成分的研究[J].中国食品学报,2011,11(1):234-238. DOI:10.16429/j.1009-7848.2011.01.023.
- [33] GRIGORAKIS K, FOUNTOULAKI E, GIOGIOS I, et al. Volatile compounds and organoleptic qualities of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) fed commercial diets containing different lipid sources[J]. Aquaculture, 2009, 290(1/2): 116-121. DOI:10.1016/j.aquaculture.2009.02.006.
- [34] 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):160-165. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201505029.
- [35] 何妍.贻贝蒸煮液调味品香气成分及其酿造工艺的研究[D].杭州:浙江工商大学,2007:22-23.
- [36] CADWALLADER K R, TAN Q, CHEN F, et al. Evaluation of the aroma of cooked spiny lobster tail meat by aroma extract dilution analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(9): 2432-2437. DOI:10.1021/jf00057a022.
- [37] CHUNG H Y, CADWALLADER K R. Volatile components in blue crab (*Callinectes sapidus*) meat and processing by-product[J]. Journal of Food Science, 1993, 58(6): 1203-1207. DOI:10.1111/j.1365-2621.1993.tb06148.x.