

不同热加工方式对栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响

邢 龙, 高 琪, 黄心怡, 王 叶, 刘 学, 段 凡, 董 平*

(中国海洋大学食品科学与工程学院, 青岛 266404)

摘要: **目的** 探究不同热加工方式对栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)中维生素 A 类化合物的影响。**方法** 采用微波、蒸制、煮制 3 种热加工方式对 6 种维生素 A 类化合物标准品及栉孔扇贝进行处理, 通过高效液相色谱-二极管阵列检测法(high performance liquid chromatogram-diode array detection, HPLC-DAD)测定维生素 A 类化合物含量。**结果** 3 种热加工方式均会造成维生素 A 类化合物的损失, 微波加热造成的损失最低。经微波处理后, 维生素 A 类化合物标准品保留率高于 85.00%, 栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的含量无显著性变化。在 100°C 条件下煮制和蒸制 20 min 处理后, 维生素 A 类化合物标准品保留率均低于 70.00%, 栉孔扇贝中维生素 A 类化合物保留率在 58.13%~76.72% 范围内。**结论** 不同的热加工方式会对维生素 A 类化合物标准品和栉孔扇贝中维生素 A 类化合物造成不同程度的损失。微波加热可有效保留栉孔扇贝中的维生素 A 类化合物。

关键词: 栉孔扇贝; 维生素 A 类化合物; 不同热加工处理方式; 高效液相色谱-二极管阵列检测法

Effects of different thermal processing methods on vitamin A substances in *Chlamys farreri*

XING Long, GAO Qi, HUANG Xin-Yi, WANG Ye, LIU Xue, DUAN Fan, DONG Ping*

(College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of different thermal processing methods on vitamin A substances in *Chlamys farreri*. **Methods** Six kinds of vitamin A substances standards and *Chlamys farreri* were processed by 3 kinds of thermal processing methods, including microwave, steaming and boiling, the content of vitamin A substances was determined by high performance liquid chromatogram-diode array detection (HPLC-DAD). **Results** The loss of vitamin A substances was caused by 3 kinds of thermal processing methods, and the loss was lowest by microwave heating. After microwave treatment, the retention rates of vitamin A substances standards were higher than 85.00%, and the content of vitamin A substances in *Chlamys farreri* had no significant change. After boiling and steaming for 20 min at 100°C, the retention rates of vitamin A substances standards were both lower than 70.00%, and the retention rates of vitamin A substances in *Chlamys farreri* ranged from 58.13% to 76.72%. **Conclusion** Different thermal processing methods can cause different degrees of loss of vitamin A substances in the standard products and in *Chlamys*

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0901105)、山东省重点研发计划项目(鲁渝科技协作, 2021LYX2009)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD0901105), and the Key Research and Development Program of Shandong Province (Shandong Chongqing Science and Technology Cooperation, 2021LYX2009)

*通信作者: 董平, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋生物资源营养与利用。E-mail: dongping@ouc.edu.cn

*Corresponding author: DONG Ping, Ph.D, Professor, College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, China. E-mail: dongping@ouc.edu.cn

farreri. Microwave heating can effectively retain vitamin A substances in *Chlamys farreri*.

KEY WORDS: *Chlamys farreri*; vitamin A substances; different thermal processing methods; high performance liquid chromatogram-diode array detection

0 引言

维生素 A 是最早被发现的具有全反式视黄醇生物活性的一组脂溶性维生素^[1-2]。作为人体正常生长发育不可或缺的一类维生素,对于维持正常的视觉功能,提高机体免疫力、抗氧化等方面具有重要意义^[3-6]。人体自身不能合成此类维生素,极易造成机体缺乏,缺乏维生素 A 会导致干眼症、胚胎生长发育异常、免疫系统受损等危害^[7-10]。维生素 A 缺乏作为四大营养缺乏病之一,对于一些低收入国家或地区来说是一个重要的公共卫生问题。为保证日常所需要从外界摄取,维生素 A 有两种来源方式,其一是动物性来源的维生素 A 醇,动物肝脏和鱼肝油中较丰富^[11-15];另一类是含有丰富维生素 A 原-类胡萝卜素的水果和蔬菜,经人体消化转变成维生素 A 后被利用^[16-19]。作为来源于海洋的食品资源,贝类以富含类胡萝卜素的藻类为食,其体内会积聚一定量的类胡萝卜素,其中 β -胡萝卜素可转变成维生素 A,因而贝类中可能会存在不同形式的维生素 A 类化合物^[20-21]。然而,现有研究对其加工过程中的变化情况鲜有报道,影响了其食用价值的解析。

据统计^[22],2021 年我国扇贝水产养殖量约为 182 万 t。栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)产自我国威海、大连等北部沿海地区^[23],是我国主要的贝类养殖品种之一^[24],其富含维生素、蛋白质、脂肪酸等营养物质^[25]。贝类普遍以热加工为主要的食用方式,常用热加工方式主要有蒸制、煮制、微波加热等^[26]。经热加工处理,食品原料中的有害微生物被杀灭,但各类营养物质也会被破坏,使其营养价值降低^[27-29]。尤其是维生素 A 类化合物,在高温、氧气、紫外线照射下,损失较为严重^[30-33]。关于维生素 A 类化合物在烹调加工过程中的损失情况,也有学者进行了相关研究。RIBEIRO 等^[34]和 DHUIQUE 等^[35]通过实验探究发现存在于食品中的全反式 β -胡萝卜素在热加工过程中更易发生热降解和异构化。屠瑞莹等^[36]对番茄进行了焯煮、蒸制、炖煮、油炒、微波处理后发现,经微波 5 min 和水煮 15 min 处理, β -胡萝卜素的保存率分别为 60.31% 和 48.96%,蒸制和水焯后 β -胡萝卜素的保存率约为 90.0%。祝海珍^[37]探究了经水煮和油炒后动物肝脏中维生素 A 含量的变化情况,油炒破坏情况更严重,经油炒 15 min 处理,不同肝脏中维生素 A 约为新鲜肝脏的 80.0%。KAO 等^[38]和 MIGLIO 等^[39]评估了煮沸、炒制和油炸对蔬菜中类胡萝卜素的影响,发现煮制能够有效保留类胡萝卜素,而炒制和油炸处理后类胡萝卜素的总量显著降低。但对于海洋经济贝类中维生素 A 类化合

物经热处理加工影响情况的研究鲜有报道,导致其具体变化情况未知,这对于我们摄食经热加工处理的贝类产品所获取维生素 A 带来了极大的不确定性。因此,日常饮食中选取合理的加工方式能够有效减少贝类中维生素 A 类化合物的损失。

本研究针对 6 种维生素 A 类化合物标准品和栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)中的维生素 A 类化合物在蒸制、煮制及微波热处理条件下的变化情况进行深入探究,明确不同形式维生素 A 类化合物在热加工过程中的损失情况,为减少维生素 A 类营养物质在热加工过程的流失,选取高效精准的加工方式提供重要理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)购自于青岛市海鲜市场。

维生素 A 标准品(纯度 $\geq 96\%$)、维生素 A 醛标准品(纯度 $\geq 98\%$)、维生素 A 酸标准品(纯度 $\geq 99\%$)、维生素 A 醋酸酯标准品(纯度 $\geq 99\%$)、维生素 A 棕榈酸酯标准品(纯度 $\geq 96\%$)、 β -胡萝卜素标准品(纯度 $\geq 98\%$)、甲醇、甲基叔丁基醚(色谱纯,德国默克公司);氢氧化钾、无水乙醇、抗坏血酸、石油醚、无水硫酸钠、三氯甲烷(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

METTLER TOLEDO AB135-S 型万分之一电子天平(瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司); Milli-Q 型超纯水机(美国 Merck Millipore 公司); KQ-300DE 型数控超声波清洗器(昆山舒美超声仪器有限公司); MX-S 型涡旋振荡仪(美国 Scilogex 公司); RE-52AA 型旋转蒸发器、SHZ-III 循环水真空泵(上海亚荣生化仪器厂); Agilent Technologies 1100 Infinity 高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司); DHG-9030A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); YMC- β carotene (250 mm \times 4.6 mm, 3 μ m)色谱柱(日本 YMC 公司); FH1500 型通风柜(青岛金泰来实验室设备有限公司); Panasonic 微波炉(日本松下电器有限公司); THZ-82A 型电热恒温水浴锅(青岛创合盛科教仪器设备有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 不同热加工方式对维生素 A 类化合物的影响

(1)微波加热时间对维生素 A 类化合物的影响

1)微波加热时间对裸露维生素 A 类化合物的影响

分别吸取固定浓度 6 种维生素 A 类化合物标准品溶液

10 μL , 将其置于若干 10 mL 透明具塞玻璃瓶中, 在微波中低火(功率 400 W)条件下加热 2、4、6 min 处理, 以未进行处理的混合标准品溶液作为对照, 用无水乙醇将其稀释定容至 5 mL, 过膜后进行高效液相色谱分析, 探究 6 种维生素 A 类化合物标准品在不同微波加热时间下浓度的变化情况。

2)微波加热时间对栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响

分别称取 10.0 g 栉孔扇贝匀浆将其置于若干透明具塞玻璃瓶中, 在微波中低火条件下加热 2、4、6 min 处理, 扇贝匀浆经微波中低火加热 6 min 后, 已达熟制状态。将未进行微波处理的栉孔扇贝匀浆作为对照, 将其进行前处理后进行高效液相色谱分析, 探究不同微波加热时间对栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响情况。

(2)煮制时间对维生素 A 类化合物的影响

1)煮制时间对裸露维生素 A 类化合物的影响

分别吸取固定浓度 6 种维生素 A 类化合物标准品溶液 10 μL , 将其置于若干 10 mL 透明具塞玻璃瓶中, 在 100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下煮制 5、10、15、20 min 处理, 以未进行处理的混合标准品溶液作为对照, 将其稀释定容至 5 mL 后进行高效液相色谱分析, 探究 6 种维生素 A 类化合物标准品在不同煮制时间下浓度的变化情况。

2)煮制时间对栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响

分别称取 10.0 g 栉孔扇贝匀浆将其置于若干透明具塞玻璃瓶中, 在 100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下煮制 5、10、15、20 min 处理, 扇贝匀浆经煮制 20 min 后, 已达熟制状态。将未进行煮制处理的栉孔扇贝匀浆作为对照, 将其进行前处理后进行高效液相色谱分析, 探究不同煮制时间对栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响情况。

(3)煮制温度对维生素 A 类化合物的影响

1)煮制温度对裸露维生素 A 类化合物的影响

分别吸取固定浓度 6 种维生素 A 类化合物标准品溶液 10 μL , 将其置于若干 10 mL 透明具塞玻璃瓶中, 在 40、60、80、100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下加热 10 min 处理, 以未进行处理的混合标准品溶液作为对照, 将其稀释定容至 5 mL 后进行高效液相色谱分析, 探究 6 种维生素 A 类化合物标准品在不同煮制温度下浓度的变化情况。

2)煮制温度对栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响

分别称取 10.0 g 栉孔扇贝匀浆将其置于若干透明具塞玻璃瓶中, 在 40、60、80、100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下加热 10 min 处理, 将未进行煮制处理的栉孔扇贝匀浆作为对照, 将其进行前处理后进行高效液相色谱分析, 探究不同煮制温度对栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响情况。

(4)蒸制时间对维生素 A 类化合物的影响

1)蒸制时间对裸露维生素 A 类化合物的影响

分别吸取固定浓度 6 种维生素 A 类化合物标准品溶液 10 μL , 将其置于若干 10 mL 透明具塞玻璃瓶中, 在 100 $^{\circ}\text{C}$

条件下蒸制 5、10、15、20 min 处理, 以未进行处理的混合标准品溶液作为对照, 将其稀释定容至 5 mL 后进行高效液相色谱分析, 探究 6 种维生素 A 类化合物标准品在不同蒸制时间下浓度的变化情况。

2)蒸制时间对栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响

分别称取 10.0 g 扇贝匀浆将其置于若干透明具塞玻璃瓶中, 在 100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下蒸制 5、10、15、20 min 处理, 扇贝匀浆经蒸制 20 min 后, 已达熟制状态。将未进行蒸制处理的栉孔扇贝匀浆作为对照, 将其进行前处理后进行高效液相色谱分析, 探究不同蒸制时间对栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响情况。

1.3.2 检测方法

(1)前处理方法

参照 XING 等^[40]的研究方法并做改动。将 90 mL 无水乙醇分 3 次加入到扇贝匀浆中, 为减少待测物质被破坏向其中加入 2.0 g 抗坏血酸, 在 60 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行超声辅助提取 30 min, 将 3 次提取液合并, 用 50 mL 石油醚萃取 3 次, 将萃取液合并后经 40 $^{\circ}\text{C}$ 旋转蒸发, 待旋蒸瓶中剩余 1~2 mL 萃取液时停止浓缩, 经氮气吹干, 用无水乙醇三氯甲烷混合溶液溶解残渣后定容至 2 mL, 经 0.22 μm 有机膜过滤处理后进高效液相色谱仪分析。

(2)高效液相色谱-二极管阵列检测法测定 6 种维生素 A 类化合物

参照 XING 等^[40]的研究方法并做改动。YMC- β carotene (250 mm \times 4.6 mm, 3 μm) 色谱柱, 进样量为 20 μL , 流速为 0.8 mL/min, 柱温为 30 $^{\circ}\text{C}$, 检测波长分别设置为维生素 A、维生素 A 醋酸酯、维生素 A 棕榈酸酯 325 nm, 维生素 A 酸为 350 nm, 全反式维生素 A 醛为 380 nm, β -胡萝卜素为 460 nm, 流动相为 A 甲醇、B 超纯水、C 甲基叔丁基醚, 梯度洗脱程序如表 1 所示。

表 1 梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution procedure

时间/min	A/%	B/%	C/%
0	90	1	9
8.0	90	1	9
8.1	35	0	65
16.0	35	0	65
16.1	90	1	9

1.4 数据分析

每组实验需要进行 3 次平行测定, 采用 IBM SPSS Statistic Version 26.0 统计软件分析处理数据, 组间比较采用单因素方差分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)进行分析, 利用 t 检验进行显著性分析, $P < 0.05$ 时认为有显著差异。高效液相色谱测定结果采用安捷伦 1260 数据处理工作站进行处理。

2 结果与分析

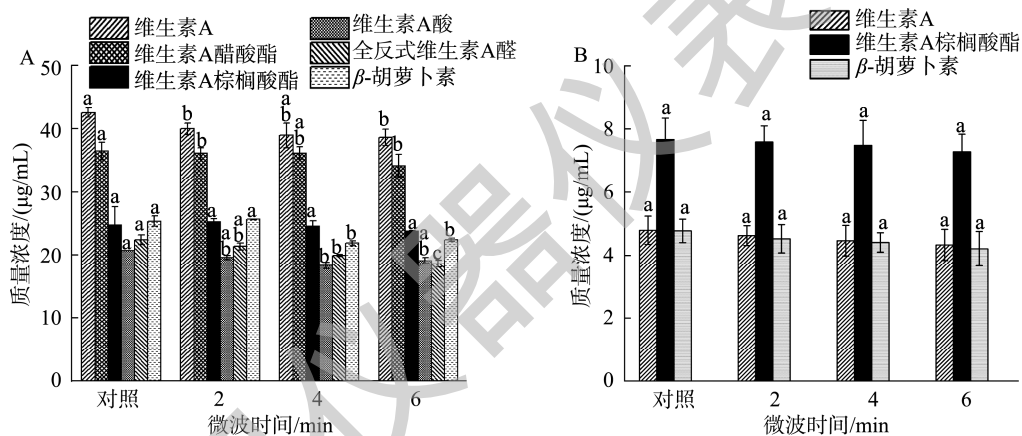
2.1 微波加热时间对裸露形式及栉孔扇贝中维生素A类化合物的影响

图1A表明,中低火微波热处理对不同形式维生素A类化合物的影响较小,经微波加热6 min处理后,6种维生素A类化合物标准品保留率高于85.00%,维生素A、全反式维生素A醛和 β -胡萝卜素的损失率约为10%,维生素A棕榈酸酯的损失率约为5%,其中维生素A酸的稳定性较高,保留率高达96.91%。该结果与GATTI等^[41]对药物中维甲酸的稳定性研究结果相一致,在黑暗条件下,维甲酸在90 d的时间里保留率达到87%,远高于其他形式类视黄醇物质。图1B显示,经高效液相色谱分析明确了扇贝中主要有3种维生素A类化合物,分别为维生素A、维生素A棕榈酸酯及 β -胡萝卜素。微波加热处理对扇贝中维生素A类化合物的影响较小,与对照组相比,维生素A、维生素A棕榈酸酯和 β -胡萝卜素的含量无显著性变化。这与SIEBER等^[42]对微波处理后牛奶中维生素A损失情况的研究结果相一致。微波能量会影响

维生素的含量,但对维生素A和E的影响较小。

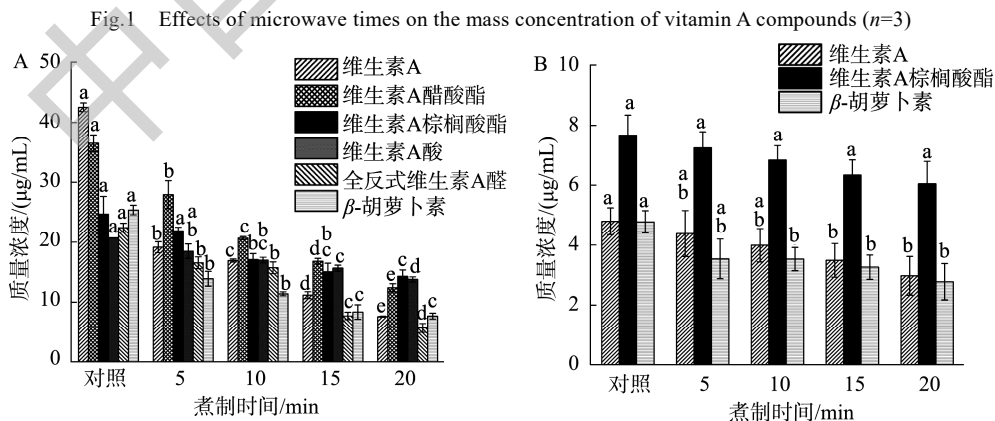
2.2 煮制时间对裸露形式及栉孔扇贝中维生素A类化合物的影响

图2A表明,在100°C条件下随着煮制时间的延长,6种维生素A类化合物的损失率逐渐增大,经煮制20 min处理,维生素A类化合物标准品保留率均低于70.00%。维生素A的保留率仅为17.91%,全反式维生素A醛和 β -胡萝卜素的保留率分别为25.37%、30.35%,其中维生素A棕榈酸酯和维生素A酸在不同煮制时间下受影响程度较小,损失率低于45%。从图2B可知,长时间高温处理使得扇贝中的部分维生素A类化合物被破坏产生损失。经过煮制15和20 min后,扇贝中维生素A和 β -胡萝卜素的含量显著降低,在100°C加热温度下煮制20 min后,维生素A和 β -胡萝卜素的保留率分别为62.06%和58.13%,但两者的保留率远高于裸露状态下,而维生素A棕榈酸酯的含量无显著性降低。根据KAO等^[38]的研究发现 β -胡萝卜素浓度降低的原因是过度的热处理使其发生了热降解或异构化。相较于维生素



注: A. 裸露形式; B. 栉孔扇贝中。不同小写字母表示经过不同微波时间处理后维生素A类化合物的质量浓度之间存在显著性差异($P < 0.05$)。

图1 微波时间对维生素A类化合物质量浓度的影响($n=3$)



注: A. 裸露形式; B. 栉孔扇贝中。不同小写字母表示经过不同煮制时间处理后中维生素A类化合物的质量浓度之间存在显著性差异($P < 0.05$)。

图2 煮制时间对维生素A类化合物质量浓度的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of cooking times on the mass concentration of vitamin A compounds ($n=3$)

A 族化合物标准品, 由于食品基质对 3 种维生素 A 族化合物的保护作用, 其损失率有很大程度的降低, 扇贝本身的肌肉及含有丰富的多糖、肽等抗氧化活性物质可能会对其所含有的维生素 A 族化合物具有一定的保护作用^[43-44]。

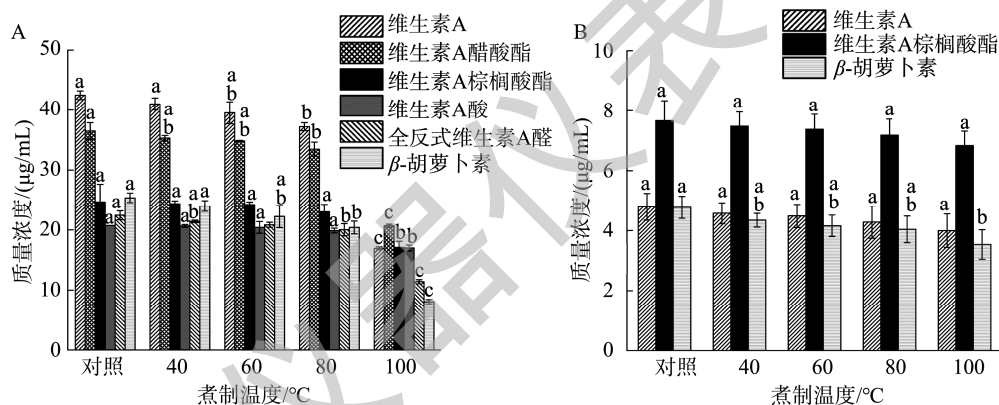
2.3 煮制温度对裸露形式及栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响

如图 3A 所示, 在不同煮制温度下不同形式维生素 A 类化合物会产生不同程度的损失, 其中损失较为严重的是维生素 A、全反式维生素 A 醛、 β -胡萝卜素; 当煮制温度为 100°C 时, 三者的保留率较低, 分别为 39.81%、50.81% 及 31.74%, 另外维生素 A 醋酸酯、维生素 A 棕榈酸酯及维生素 A 酸的保留率均高于 50%, 维生素 A 酸的保留率高达 82.02%。当煮制温度低于 80°C 时, 6 种维生素 A 类化合物的保留率在 80.34%~95.92% 范围内。因此, 当煮制温度低于 100°C 时, 维生素 A 类化合物能够保持较高的稳定性。栉孔扇贝中 3 种维生素 A 族化合物受煮制温度的影响较小。图 3B 结果显示, 在不同的煮制温度下, 扇贝中的维生素 A 和

维生素 A 棕榈酸酯的含量无显著性变化。在 100°C 条件下煮制 10 min 后, β -胡萝卜素的损失率约为 25.96%, 与裸露状态维生素 A 族化合物的损失情况相一致, 但是与 DHUIQUE 等^[35]所得出的维生素 A 原类胡萝卜素具有更高热稳定性的研究结果相反, 分析可能是由于食品基质性质的影响。

2.4 蒸制时间对裸露形式及栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响

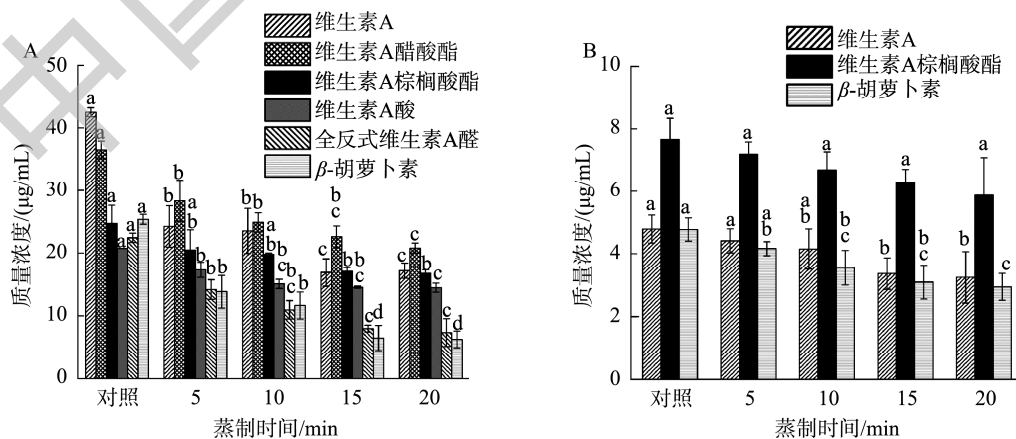
图 4A 表明, 维生素 A 类化合物浓度与蒸制时间成反比, 在 100°C 条件下经蒸制 20 min 处理, 维生素 A 类化合物标准品保留率均低于 70.00%。维生素 A 的保留率约为 40.28%, 维生素 A 醋酸酯、维生素 A 棕榈酸酯及维生素 A 酸的保留率高于 50.00%, 全反式维生素 A 醛及 β -胡萝卜素的保留率分别为 32.68% 和 24.59%, 在相同的热处理条件下, 维生素 A 醋酸酯、维生素 A 棕榈酸酯及维生素 A 酸的损失率远低于维生素 A、全反式维生素 A 醛及 β -胡萝卜素。从图 4B 可知, 在 100°C 条件下蒸制 10 min 处理与煮制 10 min 处理, 扇贝中维生素 A 类化合物受影响



注: A. 裸露形式; B. 栉孔扇贝中。不同小写字母表示经过不同煮制温度处理后维生素 A 类化合物的质量浓度之间存在显著性差异($P < 0.05$)。

图 3 煮制温度对维生素 A 类化合物质量浓度的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of cooking temperature on the mass concentration of vitamin A compounds ($n=3$)



注: A. 裸露形式; B. 栉孔扇贝中。不同小写字母表示经过不同蒸制时间处理后维生素 A 类化合物的质量浓度之间存在显著性差异($P < 0.05$)。

图 4 蒸制时间对维生素 A 类化合物质量浓度的影响($n=3$)

Fig.4 Effects of steaming time on the mass concentration of vitamin A compounds ($n=3$)

程度相近, 损失最严重的是 β -胡萝卜素, 保留率为 61.51%, 其次是维生素 A, 损失率为 67.70%, 维生素 A 棕榈酸酯的保留率为 76.72%, 因此, 扇贝的 3 种维生素 A 类化合物中, 维生素 A 棕榈酸酯的稳定性是最好的, 在相同的热处理条件下, 维生素 A 棕榈酸酯的损失率最低。

3 结 论

本研究采用微波、蒸制、煮制 3 种不同的热加工方式对 6 种维生素 A 类化合物标准品和栉孔扇贝进行处理, 通过高效液相色谱-二极管阵列检测法测定维生素 A 类化合物含量, 探究 3 种热加工方式对栉孔扇贝中维生素 A 类化合物的影响。结果表明, 在不同的热加工处理条件下, 维生素 A 类化合物标准品以及栉孔扇贝中的维生素 A 类化合物均会产生不同程度的损失。与蒸制和煮制相比, 微波中低火短时间加热对维生素 A 类化合物的影响较小。随着煮制时间和蒸制时间的延长, 维生素 A 类化合物的损失率逐渐增大, 其中, 维生素 A、全反式维生素 A 醛以及 β -胡萝卜素极易受到高温的破坏, 损失情况较为严重。因此, 为减少此类营养物质的流失, 在食品加工过程中要严格控制加热温度和时间。对真实食物中维生素 A 类化合物的加工变化, 应结合基质成分综合考虑。相对而言, 维生素 A 棕榈酸酯及维生素 A 酸较为稳定, 不容易被破坏, 在不同热加工处理方式下, 损失率较低, 可以考虑将此类稳定性较强的物质应用于日常膳食补充及生产加工过程中, 能够有效降低生产成本, 扩大应用范围。

参考文献

- [1] LIU H, WANG D, WAN K, *et al.* Simultaneous quantification of fat-soluble vitamins A, 25-hydroxyvitamin D and vitamin E in plasma from children using liquid chromatography coupled to orbitrap mass spectrometry [J]. *J Chromatogr B*, 2021, 1177: 122795.
- [2] 郑煜斌. 食品中维生素 A、D、E 的检测方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
ZHENG YB. Study on detection methods of vitamins A, D and E in food [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [3] 金鹿, 闫素梅, 史彬林, 等. 维生素 A 抗氧化功能的机制[J]. *动物营养学报*, 2015, 27(12): 3671–3676.
JIN L, YAN SM, SHI BL, *et al.* Mechanism of antioxidant function of vitamin A [J]. *J Anim Nutr*, 2015, 27(12): 3671–3676.
- [4] OLUBUKOLA SO, FOLORUNSHO AA, OLABISI OL, *et al.* Vitamins as antioxidants [J]. *J Food Sci Nutr Res*, 2019, 2(3): 214–235.
- [5] ZHOU HB, HUANG XY, BI Z, *et al.* Vitamin A with L-ascorbic acid sodium salt improves the growth performance, immune function and antioxidant capacity of weaned pigs [J]. *Animal*, 2021, 15(2): 100133.
- [6] TAKAHASHI N, SAITO D, HASEGAWA S, *et al.* Vitamin A in health care: Suppression of growth and induction of differentiation in cancer cells by vitamin A and its derivatives and their mechanisms of action [J]. *Pharmacol Therapeut*, 2022: 230: 107942.
- [7] SEE AWM, KAISER ME, WHITE JC, *et al.* A nutritional model of late embryonic vitamin A deficiency produces defects in organogenesis at a high penetrance and reveals new roles for the vitamin in skeletal development [J]. *Dev Biol*, 2008, 316(2): 171–190.
- [8] SOMMER A. Vitamin A deficiency and the global response [J]. *Forum Nutr*, 2003, 56: 33–35.
- [9] HAKIM A. Vitamin A deficiency as a global public health threat: A concern in nutritional victimization [J]. *J Nutr Health Food Eng*, 2016, 4(5): 508–509.
- [10] VIDAILHET M. Vitamin A in pediatrics: An update from the nutrition committee of the French society of pediatrics [J]. *Arch Pediat*, 2017, 24(3): 288–297.
- [11] ANDRÉS V, VILLANUEVA MJ, TENORIO MD. Simultaneous determination of tocopherols, retinol, ester derivatives and β -carotene in milk-and soy-juice based beverages by HPLC with diode-array detection [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 58(2): 557–562.
- [12] GOMIS DB, FERNÁNDEZ MP, GUTIÉRREZ-ALVAREZ MD. Simultaneous determination of fat-soluble vitamins and provitamins in milk by microcolumn liquid chromatography [J]. *J Chromatogr A*, 2000, 891(1): 109–114.
- [13] BOOTH SL, JOHNS T, KUHNLEIN HV. Natural food sources of vitamin A and provitamin A [J]. *Food Nutr Bull*, 1992, 14(1): 1–15.
- [14] 刘波, 郎昭滨, 殷晓红, 等. 高效液相色谱法测定乳粉中维生素 A、D [J]. *中国乳品工业*, 2003, (2): 36–38.
LIU B, LANG ZB, YIN XH, *et al.* Determination of vitamin A and D in dairy product by high performance liquid chromatography [J]. *Chin Dairy Ind*, 2003, (2): 36–38.
- [15] BERTOLÍN JR, JOY M, RUFINO-MOYA PJ, *et al.* Simultaneous determination of carotenoids, tocopherols, retinol and cholesterol in ovine lyophilised samples of milk, meat, and liver and in unprocessed/raw samples of fat [J]. *Food Chem*, 2018, 257: 182–188.
- [16] 汪之顷, 荫士安. β -胡萝卜素转化为维生素 A 的机制、调节和生物学意义[J]. *环境卫生学杂志*, 2003, (5): 283–287.
WANG ZX, YIN SAN. Mechanism, regulation and biological significance of the conversion of β -carotene to vitamin A [J]. *J Environ Hyg*, 2003, (5): 283–287.
- [17] CHICHILI GR, NOHR D, SCHAFFER M, *et al.* β -carotene conversion into vitamin A in human retinal pigment epithelial cells [J]. *Invest Ophth Vis Sci*, 2005, 46(10): 3562–3569.
- [18] SAINI RK, NILE SH, PARK SW. Carotenoids from fruits and vegetables: Chemistry, analysis, occurrence, bioavailability and biological activities [J]. *Food Res Int*, 2015, 76: 735–750.
- [19] SCOTT KJ, RODRIQUEZ-AMAYA D. Pro-vitamin A carotenoid conversion factors: Retinol equivalents—fact or fiction? [J]. *Food Chem*, 2000, 69: 125–127.
- [20] 张倩, 郑怀平, 刘合露, 等. 海产贝类体内类胡萝卜素的研究进展[J]. *海洋通报*, 2011, 30(1): 108–112.
ZHANG Q, ZHENG HP, LIU HL, *et al.* Research progress of carotenoids in marine mollusks [J]. *Mar Sci Bull*, 2011, 30(1): 108–112.
- [21] VENUGOPAL V, GOPAKUMAR K. Shellfish: Nutritive value, health benefits, and consumer safety [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2017, 16(6): 1219–1242.
- [22] 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. 2022 年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of People's Republic of China, National fisheries technology extension center, China society of fisheries. 2022 China fishery statistics yearbook [M]. Beijing: China Agricultural

- Publishing House, 2022.
- [23] 李丽, 曹亚男, 姜雯, 等. 栉孔扇贝中蛋白质的提取条件优化[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2021, 37(2): 157-161.
LI L, CAO YN, JIANG W, *et al.* Optimized extraction conditions of protein from scallop *Chlamys farreri* [J]. J Ludong Univ (Nat Sci Ed), 2021, 37(2): 157-161.
- [24] 裴继伟, 曹亚男, 丁连坤, 等. 活性炭法制备栉孔扇贝高F值寡肽的工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8284-8289.
PEI JW, CAO YN, DING LK, *et al.* Optimization of preparation of high F-value oligo-peptide from *Chlamys farreri* by activated carbon method [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(22): 8284-8289.
- [25] 严超, 牟建楼, 陈志周, 等. 栉孔扇贝酶解液制备条件优化及其抗氧化性研究[J]. 中国调味品, 2017, 42(12): 1-6.
YAN C, MOU JL, CHEN ZZ, *et al.* Study on optimization of preparation conditions and antioxidant activity of enzymatic hydrolysate of *Chlamys farreri* [J]. China Cond, 2017, 42(12): 1-6.
- [26] 许雪萍. 不同加工方式处理对猪肉中脂质的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
XU XP. Effects of different processing methods on lipids in pork [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [27] 王敏, 谭志侠. 微波加热对食品品质的影响[J]. 粮食流通技术, 2002, (5): 44-45.
WANG M, TAN ZX. Effect of microwave heating on food quality [J]. Grain Distrib Technol, 2002, (5): 44-45.
- [28] 王垚. 蒸制对大菱鲆肌肉品质影响的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2015.
WANG Y. Study of the effect of steam cooking on the quality of turbot (*Scophthalmus maximus*) muscle [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2015.
- [29] 万本屹, 董海洲, 刘传富. 微波加热对食品中维生素的影响[J]. 食品与机械, 2001, (4): 11-12.
WAN BY, DONG HZ, LIU CF. Study on the microwave effects on food vitamins [J]. Food Mach, 2001, (4): 11-12.
- [30] 王倩倩. 常用烹调方法对慈姑感官品质及营养成分影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
WANG QQ. Study on the effects of common cooking methods on sensory quality and nutritional composition of *ciguatera* [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013.
- [31] 赵洪雷, 冯媛, 徐永霞, 等. 海鲈鱼肉蒸制过程中品质及风味特性的变化[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 145-151.
ZHAO HL, FENG Y, XU YX, *et al.* Changes in quality and flavor characteristics of sea bass muscle during steaming [J]. Food Sci, 2021, 42(20): 145-151.
- [32] 刘雁铭. 试分析不同烹调方法对食品营养素的影响[J]. 食品安全导刊, 2015, (36): 96.
LIU YM. Experimental analysis of the effects of different cooking methods on food nutrients [J]. Chin Food Saf Magaz, 2015, (36): 96.
- [33] FAN H, FAN D, HUANG J, *et al.* Cooking evaluation of crayfish (*Procambarus clarkia*) subjected to microwave and conduction heating: A visualized strategy to understand the heat-induced quality changes of food [J]. Innov Food Sci Emerg, 2020, 62: 102368.
- [34] RIBEIRO EMG, CHITCHUMROONCHOKCHAI C, MARIA JDCL, *et al.* Effect of style of home cooking on retention and bioaccessibility of pro-vitamin A carotenoids in biofortified pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) [J]. Food Res Int, 2015, 77: 620-626.
- [35] DHUIQUE MC, TBATOU M, CARAIL M, *et al.* Thermal degradation of antioxidant micronutrients in citrus juice: Kinetics and newly formed compounds [J]. J Agric Food Chem, 2007, 55(10): 4209-4216.
- [36] 屠瑞莹, 赵裕, 李兵, 等. 烹调方式对番茄中番茄红素和 β -胡萝卜素的影响[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(19): 2333-2337.
TU RY, ZHAO R, LI B, *et al.* Effect of cooking treatments on lycopene and β -carotene in tomatoes [J]. Chin J Health Lab Technol, 2021, 31(19): 2333-2337.
- [37] 祝海珍. 烹饪方式及冷藏时间对肝脏中维生素A含量的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(4): 43-47.
ZHU HZ. Effect of different cooking methods and refrigerated time on contents of vitamin A in liver [J]. Food Res Dev, 2018, 39(4): 43-47.
- [38] KAO FJ, CHIU YS, TSOU MJ, *et al.* Effects of Chinese domestic cooking methods on the carotenoid composition of vegetables in Taiwan [J]. LWT-Food Sci Technol, 2012, 46(2): 485-492.
- [39] MIGLIO C, CHIAVARO E, VISCONTI A, *et al.* Effects of different cooking methods on nutritional and physicochemical characteristics of selected vegetables [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(1): 139-147.
- [40] XING L, GAO Q, HUANG XY, *et al.* Simultaneous determination of six vitamin A substances by multi-wavelength HPLC and application to different marine shellfishes [J]. J Food Comp Anal, 2023, 115: 105039.
- [41] GATTI R, GIOIA MG, CAVRINI V. Analysis and stability study of retinoids in pharmaceuticals by LC with fluorescence detection [J]. J Pharmaceut Biomed, 2000, 23(1): 147-159.
- [42] SIEBER R, EBERHARD P, FUCHS D, *et al.* Effect of microwave heating on vitamins A, E, B₁, B₂ and B₆ in milk [J]. J Dairy Res, 1996, 63(1): 169-172.
- [43] WANG ZX, LIU XY, XIE HK, *et al.* Antioxidant activity and functional properties of alcalase-hydrolyzed scallop protein hydrolysate and its role in the inhibition of cytotoxicity *in vitro* [J]. Food Chem, 2021, 344: 128566.
- [44] HAN JR, HAN YT, LI XW, *et al.* Antioxidant activity of yesso scallop (*Patinopecten yessoensis*) female gonad hydrolysates-ribose Maillard reaction products extracted with organic reagents, before and after *in vitro* digestion [J]. Food Biosci, 2021, 43: 101262.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



邢龙, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生物资源营养与利用。
E-mail: x117860789611@163.com



董平, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋生物资源营养与利用。
E-mail: dongping@ouc.edu.cn