

四种加工方式对皱纹盘鲍制品消化特性的影响

万楚君¹, 游银川¹, 翁凌^{1,2}, 张凌晶^{1,2}, 刘光明^{1,2}, 曹敏杰^{1,2*}

(1. 集美大学食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 集美大学水产品深加工技术国家地方联合工程研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了探讨不同加工方式对皱纹盘鲍制品消化特性的影响, 分析了生鲜、煮制、罐制和干制4种方式对鲍鱼肌肉蛋白在消化酶作用下的分解情况。利用模拟胃肠液消化及SDS-PAGE比较分析不同加工方式对鲍鱼肌肉消化特性的影响, 并通过扫描电镜观察4种加工方式下鲍鱼肌肉组织微观结构的差异。结果显示, 与生鲜鲍鱼相比, 经煮制的鲍鱼较易被消化, 罐制加工产品最易被消化, 而干制鲍鱼最难被消化。不同加工方式对鲍鱼肌肉的组织结构有较大影响。进一步对不同皱纹盘鲍制品模拟胃肠液消化终产物的生物活性进行研究, 发现它们对血管紧张素转换酶(ACE)的抑制活性(IC₅₀)依次为罐制(464.2 μg/mL)<干制(665.4 μg/mL)<煮制(775.7 μg/mL)<生鲜(803.9 μg/mL)。研究表明, 不同加工方式对鲍鱼制品在机体内的消化特性及产物对ACE抑制活性存在差异, 为优化鲍鱼制品生产加工提供了一定的参考。

关键词: 皱纹盘鲍; 加工方式; 模拟胃肠液消化; ACE抑制活性

中图分类号: TS 254.4

文献标志码: A

鲍鱼隶属软体动物门(Mollusca)、腹足纲(Gastropoda)、原始腹足目(Archaeogastropoda)、鲍科(Haliotidae)、鲍属(*Haliotis*)^[1]。近年来, 随着我国人民生活水平的提高, 鲍鱼等高档海产品需求量持续增长, 养殖规模逐年扩大。据统计, 2014年我国鲍鱼总产量约11.6万t, 较2013年增长4.4%, 其中, 福建省鲍鱼产量达9.2万t, 占全国总产量的79.1%^[2]。

目前, 鲍鱼加工方式主要有冷冻、干制和罐制。生鲜鲍鱼肉质鲜美、口感好, 但对卫生条件要求高, 且活体运输成本高。因此, 我国生产的大部分鲍鱼被冷冻或加工成干鲍和罐头等制品^[3]。其中, 干鲍因独特的加工工艺, 产品滋味别致、易贮藏, 成为鲍鱼加工中的特色产品^[4]。鲍鱼罐头则因食用方便、货架期长, 在一定程度上保留了鲜鲍原有的质构与风味等, 在欧美等国深受青睐^[5]。

肌肉蛋白质结构以及氨基酸组成对肉类制品的消化率有很大影响。肉类经加热后蛋白变性凝固, 进一步加热则引起蛋白的去折叠, 增加被消化酶降解的敏感性。迄今为止, 国内外对多种肉制品的消化特性已有大量研究。García-Arias等^[6]对不同金枪鱼制品消化特性的研究发现, 熟制、罐制和生鲜制品的消化率与生物利用价值无显著差异。Deng等^[7]的研究表明, 相比于生鲜鱿鱼, 干制鱿鱼虽具有更多风味物质, 但其消化率有所降低。

另一方面, 由高血压引起的心血管疾病发病率在我国仍居高不下。研究发现, 血管紧张素转换酶(angiotensin converting enzyme, ACE)通过作用于无活性的血管紧张素I(Ang I), 使其去掉C端的2个氨基酸残基, 产生有活性的血管紧张素II(Ang II), 或者使血液中的舒缓激肽失活, 导致血压上升^[8]。因此, 抑制ACE活性是控制血压上升的重要手段之一。

收稿日期: 2016-10-12 修回日期: 2016-11-10

资助项目: 国家自然科学基金(31471640); 海洋公益性行业科研专项(201305015)

通信作者: 曹敏杰, E-mail: mjcao@jmu.edu.cn

鲍鱼作为高端水产品, 加工方式多样, 而不同加工方式的制品在机体中的消化特性是否有差异尚未见报道。特别是加工处理的鲍鱼, 经过胃肠液消化后, 终产物是否能抑制ACE活性并起到降血压作用值得研究。本研究以我国高产的皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)为对象, 通过体外模拟胃肠液消化, 探讨胃蛋白酶、胰蛋白酶及胰凝乳蛋白酶对4种不同加工方式制备的鲍鱼制品消化特性的影响, 进一步分析消化终产物的ACE抑制活性, 以期优化鲍鱼产品加工方法提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜活皱纹盘鲍[带壳平均体质量(50.0±4.0)g], 购自厦门集美市场, 去壳及内脏, 取肌肉洗净后, 用于制备不同鲍鱼制品。

SDS-PAGE用标准蛋白为Fermentas公司产品; 猪胰蛋白酶、牛胰凝乳蛋白酶、底物Hip-His-Leu (HHL)为Sigma公司产品; 猪血管紧张素转换酶、猪胃蛋白酶由本实验室制备; 甲醇和乙酸乙酯等试剂均为国产分析纯。

1.2 实验仪器与设备

组织捣碎机PT-2100, 瑞士Kinematica公司; pH计, 德国Sartorius公司; 恒温水浴锅, 德国Mettler公司; 蛋白质电泳装置, 美国Bio-Rad公司; 凝胶成像仪, 英国Syngene公司; 紫外分光光度计Lambda 35, 美国Perkin Elmer公司; 台式扫描电子显微镜Phenom-World BV, 荷兰Phenom公司。

1.3 4种鲍鱼样品的制备

制备方法: ①生鲜鲍鱼, 鲜活鲍鱼去壳及内脏, 取肉洗净; ②干制鲍鱼^[9], 生鲜鲍鱼自然晾干至水分含量低于20%, 实验前清水浸泡复发24h后, 于100℃水煮10min; ③罐制鲍鱼^[5], 生鲜鲍鱼热水烫漂、装罐, 于121℃灭菌8min; ④煮制鲍鱼^[10], 生鲜鲍鱼于100℃水煮10min。分别取4种鲍鱼制品6g并切碎(大小约为2mm×2mm×3mm), 加入60mL含0.15mol/L NaCl的去离子水, 间歇性进行组织捣碎5次, 4~5min/次, 即为不同处理方式的鲍鱼肌肉匀浆液, 用于消化试验。

1.4 模拟胃液消化试验

模拟胃液(simulated gastric fluid, SGF)消化参

照美国药典^[11]方法配制, 使用活性为250U/mg的猪胃蛋白酶, 1L模拟胃液中含2g NaCl, 用1mol/L HCl调pH至1.2。体外模拟胃液消化实验参照Thomas等^[12]方法, 并略作修改。总反应体系为550μL, 胃蛋白酶与肌肉蛋白比例为1:50(W/W)。取鲍鱼肌肉匀浆液300μL, 分置于2mL离心管中, 于37℃水浴预热10min后, 加入250μL模拟胃液, 振荡混匀, 在37℃水浴中反应不同时间(0、1、2、5、15、30、60和120min), 到达反应时间后, 迅速加入50μL 200mmol/L NaOH, 充分混匀, 终止反应。其中, 0min样品组先加入50μL 200mmol/L NaOH, 使胃蛋白酶失活。对照组不加胃蛋白酶, 其余处理条件均相同, 实验重复3次。

1.5 模拟肠液消化试验

模拟肠液(simulated intestinal fluid, SIF)参照美国药典^[11]方法配制, 参与消化反应的猪胰蛋白酶、牛胰凝乳蛋白酶活性分别为325和59.3U/mg, 1L模拟肠液中含6.8g KH₂PO₄, 用1mol/L NaOH调pH至7.5。模拟肠液消化试验参照Huang等^[13]方法, 略作修改。参与消化反应的猪胰蛋白酶、牛胰凝乳蛋白酶单独与鲍鱼肌肉匀浆液反应。体外模拟肠液消化总反应体积为550μL, 胰蛋白酶、胰凝乳蛋白酶与鲍鱼肌肉蛋白的比例均为1:50(W/W)。取300μL鲍鱼肌肉匀浆液, 分置于2mL离心管中, 在37℃水浴预热10min后, 加入模拟肠液250μL, 在37℃水浴反应不同时间(0、5、15、30、60、90、120和180min)。胰凝乳蛋白酶消化反应体系与胰蛋白酶相同, 在37℃水浴中反应0、5、15、30、60、120、180和240min。到达反应时间后, 即刻与50μL 500mmol/L HCl充分混匀, 终止反应。对照组不加蛋白酶, 其余处理条件均相同, 试验重复3次。

1.6 模拟胃肠液消化总过程

模拟胃肠液消化反应总体积700μL, 胃蛋白酶、胰蛋白酶和胰凝乳蛋白酶与肌肉匀浆液的添加量与“模拟肠液消化试验”中相同, 反应于37℃水浴中进行。首先, 300μL样品经50μL 5mg/mL胃蛋白酶消化60min后加入50μL 200mmol/L NaOH终止反应, 调节pH至7.5; 加入50μL 15mg/mL胰蛋白酶, 反应120min后, 继续加入50μL 15mg/mL胰凝乳蛋白酶, 反应240min后终止, 加蒸馏水补足总体积。用等量蒸馏水代替酶液作为对照组, 试验重复3次。

1.7 SDS-PAGE

SDS-PAGE主要参考Laemmli^[14]的方法,采用浓缩胶浓度为5%、分离胶浓度为8%的SDS-PAGE对模拟胃液消化产物进行分析;而分析模拟肠液和胃肠液总消化产物时采用浓缩胶浓度为5%、分离胶浓度为15%的SDS-PAGE。电泳结束后,以考马斯亮蓝对凝胶染色,脱色至蛋白条带清晰,用凝胶成像仪记录结果。

1.8 皱纹盘鲍肌肉微观结构分析

将待测样品置于戊二醛溶液中固定,用乙醇梯度脱水,二氧化碳临界点干燥,离子溅射喷金,扫描电镜观察^[12]。

1.9 ACE抑制活性的测定

ACE抑制活性的测定参考Cushman等^[15]方法,并略作修改。先后加入20 μL ACE溶液与20 μL模拟胃肠液总消化产物,充分混匀,37 °C预热5 min后,立即加入50 μL 6.5 mmol/L HHL溶液(100 mmol/L硼酸盐缓冲液, pH 8.3, 含0.3 mol/L NaCl),于37 °C水浴60 min。添加50 μL 1 mol/L盐酸终止反应后,继续加入300 μL乙酸乙酯,室温下2553 r/min离心5 min。吸取上清液200 μL,真空浓缩去除乙酸乙酯,加入600 μL蒸馏水充分溶解后,3610 r/min离心3 min,在波长228 nm下测定上清液的吸光值。其中,对照组用蒸馏水代替样液,空白组先加入盐酸再加入底物,其余条件不变。

$$\text{ACE抑制率(\%)} = 1 - (A_s - A_0) / (A_1 - A_0) \times 100$$

式中, A_1 为对照组的吸光值; A_s 为实验组的吸光值; A_0 为空白组的吸光值。IC₅₀代表ACE抑制率为50%时对应的样品浓度,即IC₅₀越小,该样品的ACE抑制活性越高。

2 结果

2.1 不同鲍鱼制品模拟胃液消化的SDS-PAGE分析

通过体外模拟胃液消化,可了解不同加工方式对鲍鱼肌肉消化特性的影响。对于生鲜鲍鱼制品,胃蛋白酶可在短时间(5 min)内将肌球蛋白重链(myosin heavy chain, MHC)、副肌球蛋白(paramyosin, PM)以及肌动蛋白(Actin)的主带降解完全(图1-a)。煮制鲍鱼肌肉粗提取物中已观察不到

MHC,在模拟胃液消化5 min时,PM和Actin均发生一定程度的降解,且随着消化时间的延长,其降解效果越来越明显(图1-b)。干制鲍鱼的肌肉蛋白与生鲜制品最为相似,即便被胃蛋白酶消化120 min,仍有分子量大于60 ku的蛋白条带残留(图1-c)。相比于其他3种加工方式,罐制鲍鱼中PM、Actin等蛋白在模拟胃液消化15 min后均降解完全(图1-d)。随着消化的进行,低分子量的降解条带逐渐增多,表明罐制鲍鱼最容易被胃蛋白酶消化分解。

2.2 不同鲍鱼制品模拟肠液消化SDS-PAGE分析

对于生鲜鲍鱼,胰蛋白酶可在短时间(5 min)内将MHC和PM消化完全。随着消化的进行,Actin被缓慢分解,最终残留分子量约为26 ku的降解产物(图2-a)。煮制鲍鱼在胰蛋白酶消化5 min时,PM和Actin的原始条带被降解完全,但即便消化90 min后仍有少量分子量约为26 ku的降解产物(图2-b)。干制鲍鱼经胰蛋白酶消化效果与煮制鲍鱼相似,但产生的分子量约为26 ku的降解产物多而稳定(图2-c)。而罐制鲍鱼的蛋白在消化5 min后大多降解成小分子蛋白质或肽段(图2-d)。比较4种不同加工方法制备的鲍鱼经胰蛋白酶消化后发现,尽管该酶可以有效分解肌肉中的大分子蛋白,但只对罐制鲍鱼肌肉的分解最为有效,表明高温高压处理导致的蛋白质变性有利于胰蛋白酶作用位点的暴露,从而提高酶解效果。

对于生鲜鲍鱼,MHC和PM经胰凝乳蛋白酶消化180 min后降解完全。随着时间的延长,Actin被缓慢分解,60 min后完全消失(图3-a)。煮制鲍鱼在消化5 min后,PM被降解完全;30 min后,Actin几乎被完全消化(图3-b)。与煮制鲍鱼相比,干制鲍鱼即便经240 min消化也仍有分子量为26 ku的降解产物大量残留(图3-c)。对于罐制鲍鱼,胰凝乳蛋白酶可在短时间(15 min)内有效消化大部分蛋白,成为分子量低于15 ku的小分子量物质(图3-d)。

2.3 不同鲍鱼制品模拟胃肠液总消化的SDS-PAGE分析

进一步通过体外模拟胃肠液总消化,探讨4种鲍鱼制品消化特性的差异。结果显示,不同加工方式的制品,其消化速率有一定差异。经

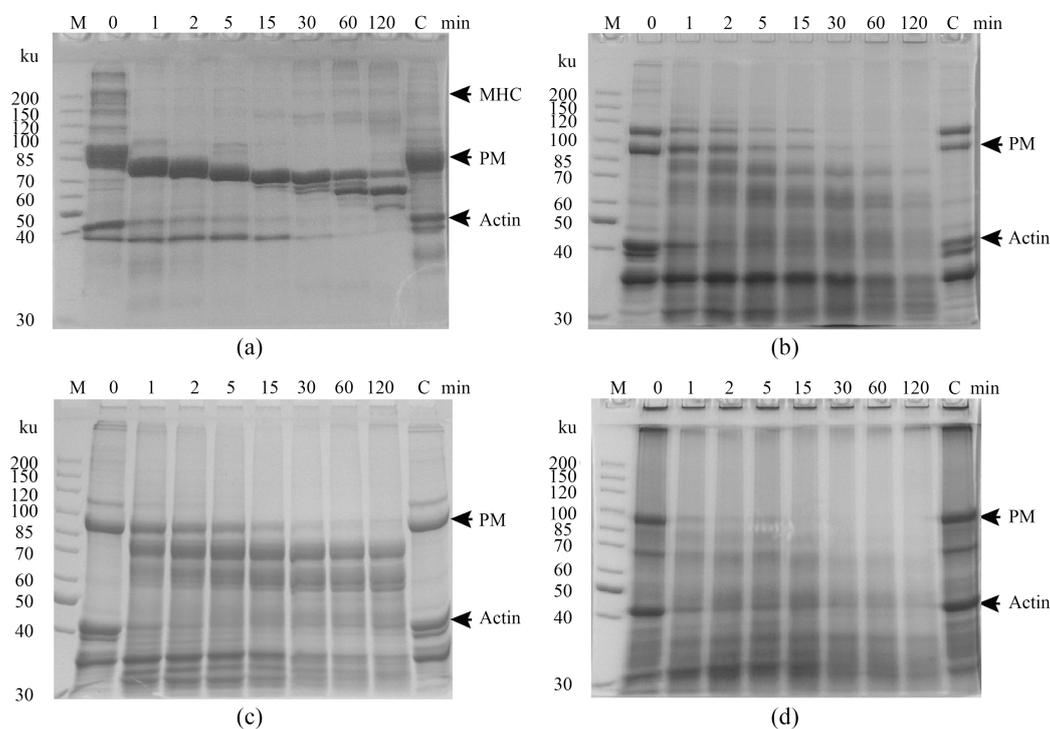


图 1 皱纹盘鲍制品肌肉蛋白模拟胃液消化的SDS-PAGE分析

(a)生鲜, (b)煮制, (c)干制, (d)罐制, M.标准蛋白, C.对照组, 下同

Fig. 1 Effect of SGF digestion on *H. discus hannai* muscular proteins prepared by different processing methods

(a) raw, (b) cooked, (c) dried, (d) canned, M. protein marker, C. control, the same below

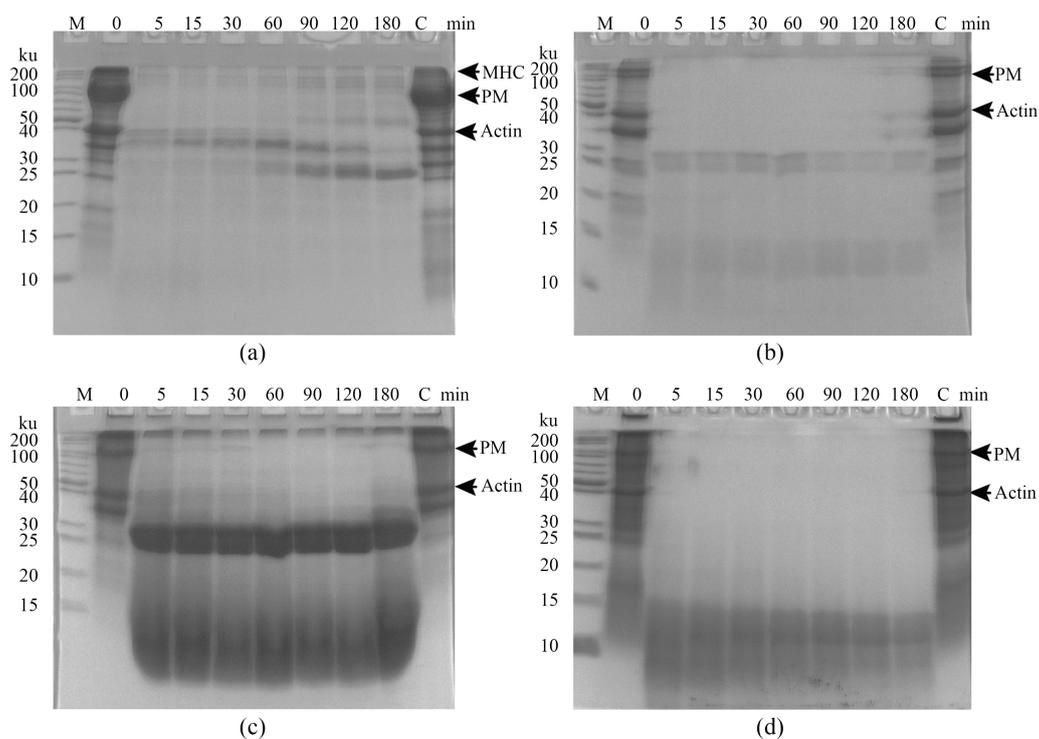


图 2 皱纹盘鲍制品肌肉蛋白经模拟肠液(胰蛋白酶)消化的SDS-PAGE分析

Fig. 2 Effect of SIF (trypsin) digestion on *H. discus hannai* muscular proteins prepared by different processing methods

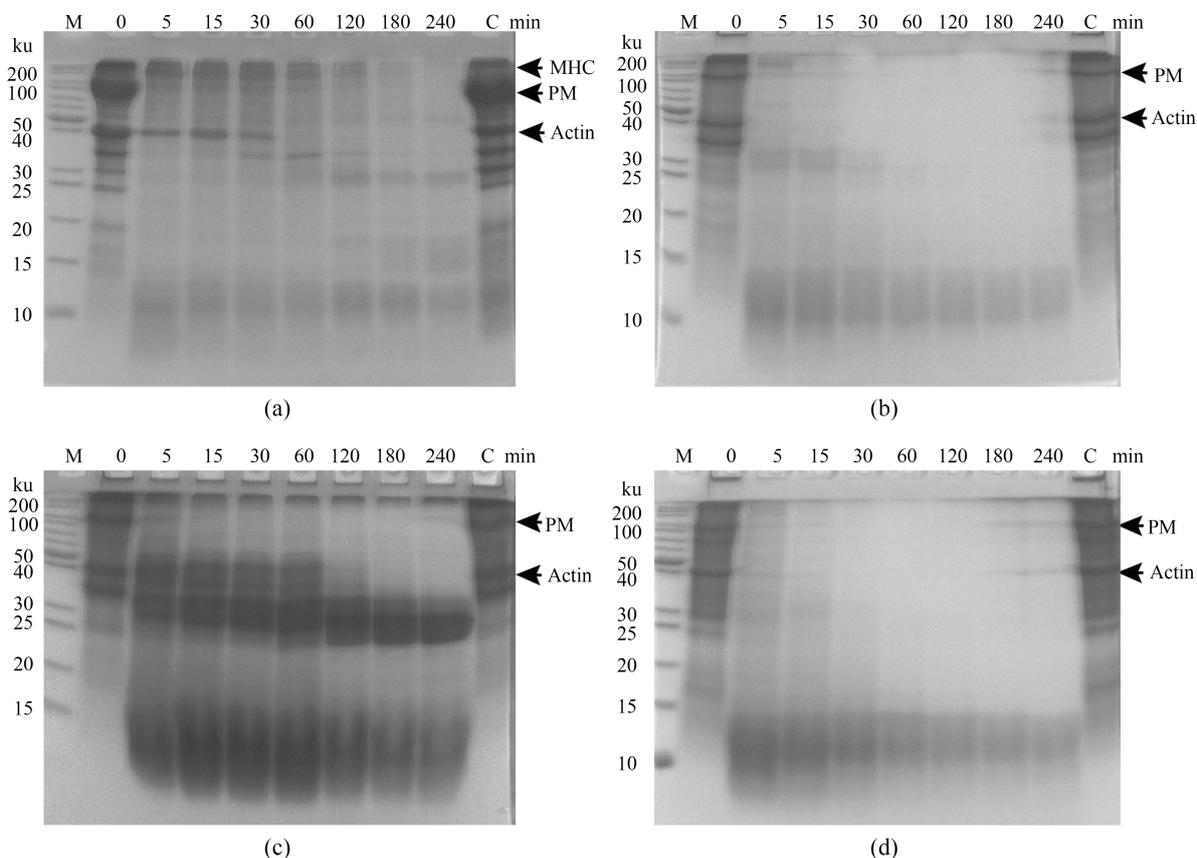


图3 皱纹盘鲍制品肌肉蛋白经模拟肠液(胰凝乳蛋白酶)消化的SDS-PAGE分析

Fig. 3 Effect of SIF (chymotrypsin) digestion on *H. discus hannai* muscular proteins prepared by different processing methods

煮制、罐制处理的鲍鱼肌肉在模拟胃肠液中的消化速率明显高于未经处理的生鲜鲍鱼,但干制处理后的肌肉蛋白较生鲜制品更难被降解。4种加工方式制备的鲍鱼肌肉经胃蛋白酶消化60 min,主要结构蛋白原始条带均被某种程度地分解,再经胰蛋白酶继续消化120 min,大部分条带已经消失。最后经胰凝乳蛋白酶单独消化240 min后,几乎所有蛋白被降解完全(图4)。

2.4 不同鲍鱼制品的微观结构分析

采用扫描电子显微镜对4种加工方式制备的鲍鱼肌肉进行观察。生鲜鲍鱼肌肉中的肌原纤维和胶原蛋白等连接致密,呈生理状态下的网状分布(图5-a)。与之相比,煮制鲍鱼肌肉的肌原纤维束和胶原结缔组织排列较为紧密,并且出现部分凝结现象(图5-b)。干制鲍鱼尽管经过复水处理,但与生鲜和煮制鲍鱼相比,肌原纤维收缩均匀,排列更为有序、致密(图5-c)。罐制鲍鱼虽经过高温处理,仍具有成束的肌原纤维,但

排列较为疏松,并形成一定的絮状结构及空隙(图5-d)。该结果与高昕等^[10]描述的煮制和干制鲍鱼肌肉组织电镜扫描结果基本一致。以上结果显示,不同加工方法制备的鲍鱼制品内部结构存在明显差异,这是由于加工过程中的蛋白变性程度以及样品失水程度不同所致,推测这也是造成产品最终在质构、消化特性等方面有差异的主要原因。

2.5 不同鲍鱼制品模拟胃肠液消化终产物的ACE抑制活性

生鲜鲍鱼模拟胃肠液消化终产物ACE抑制活性最低,IC₅₀值为803.9 μg/mL;煮制鲍鱼为775.7 μg/mL;干制品为665.4 μg/mL;而罐制品消化产物表现出最高的ACE抑制活性,IC₅₀值为464.2 μg/mL(图6)。罐制加工对鲍鱼肌肉蛋白变性最彻底,消化酶对其作用最为有效,并产生对ACE抑制活性最高的产物。推测干制鲍鱼最终消化产物IC₅₀值较低的原因是由于干制是将生鲜

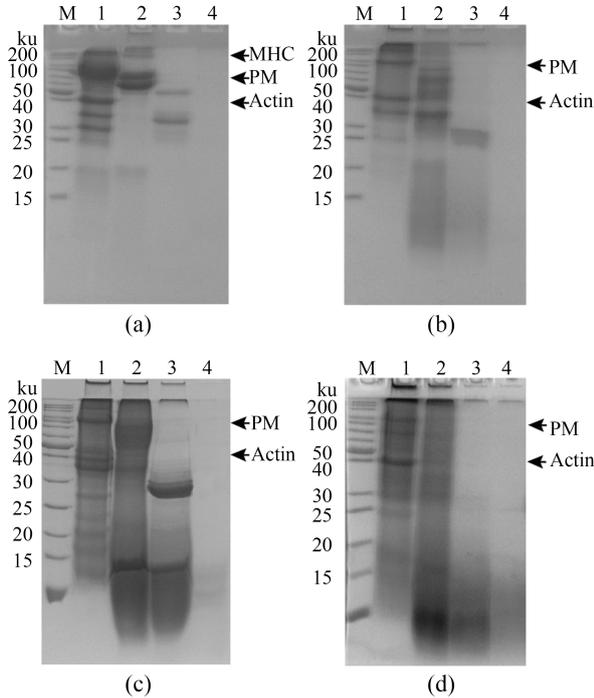


图4 皱纹盘鲍制品肌肉蛋白模拟总消化的 SDS-PAGE分析

M. 标准蛋白, 1. 对照, 2. 胃蛋白酶消化60 min, 3. 胃蛋白酶消化样品经胰蛋白酶消化120 min, 4. 胃蛋白酶和胰蛋白酶消化样品经胰凝乳蛋白酶消化240 min

Fig. 4 Effect of total digestion on *H. discus hannai* muscular proteins prepared by different processing methods

M. protein marker, 1. control, 2. pepsin digestion for 60 min, 3. pepsin digested sample digested by trypsin for 120 min, 4. pepsin and trypsin digested sample further digested by chymotrypsin for 240 min

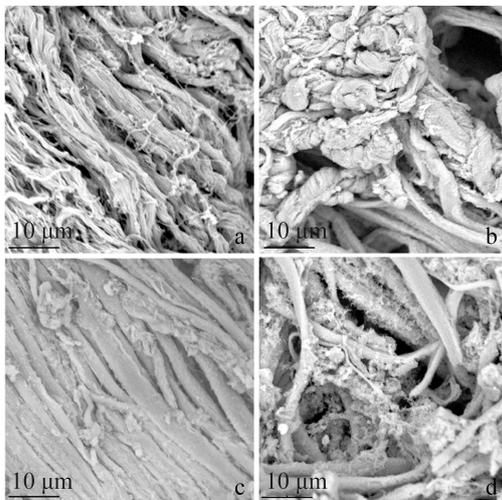


图5 皱纹盘鲍不同制品组织结构扫描电镜图

Fig. 5 Scanning electron micrographic views of *H. discus hannai* muscle by different processing methods

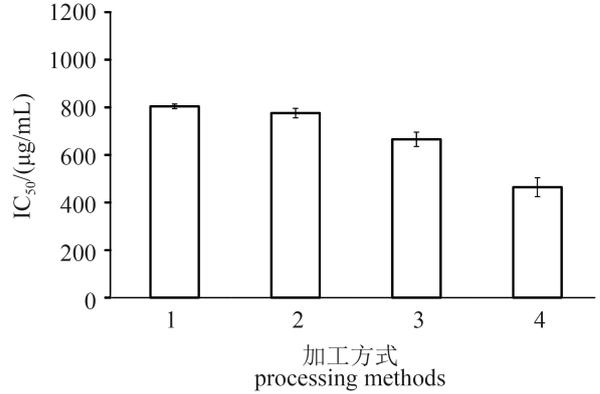


图6 4种加工方式皱纹盘鲍肌肉消化终产物的 ACE抑制活性

1. 生鲜, 2. 煮制, 3. 干制, 4. 罐制

Fig. 6 Comparison of ACE inhibitory activity of *H. discus hannai* muscular proteins prepared by 4 processing methods and digested by pepsin, trypsin and chymotrypsin

1. raw, 2. cooked, 3. dried, 4. canned

鲍鱼在常温下自然干燥, 此时肌肉中的蛋白酶仍具有活性, 在干制过程中, 酶对肌肉蛋白进行分解并产生低分子量小肽。干制鲍鱼复水后, 经100 °C 10 min加热, 蛋白变性程度进一步加大, 酶切位点增加, 在消化酶的联合作用下, 更多具有ACE抑制作用的产物生成。

3 讨论

不同加工方式对鲍鱼肌肉蛋白的相互作用或蛋白复合物的形成具有不同程度影响。Zhang等^[16]指出, 100 °C以上高温处理狭鳕(*Theragra chalcogramma*)鱼糜后, 在SDS-PAGE上可观察到MHC和Actin条带减弱现象。在本研究中, 经罐制加工的鲍鱼肌肉在SDS-PAGE上同样出现了MHC和Actin条带减弱, 推测是由于形成了分子量远大于200 ku的高分子量蛋白复合物所致。

在人体的主要消化酶中, 除胃蛋白酶外, 肠液中的胰蛋白酶和胰凝乳蛋白酶对食物蛋白的消化起重要作用。Do等^[17]的研究表明, 牛奶中致敏蛋白经酸变性和胃蛋白酶消化后, 致敏性会降低, 但对于胃病患者, 由于体内胃蛋白酶活性低, 仍会出现严重过敏反应。因此, 单独研究肠液中重要的胰蛋白酶和胰凝乳蛋白酶对蛋白的消化作用是必要的。模拟胃肠液消化结果显示, 不同消化酶作用所产生的降解产物

存在明显差异,这是由于不同消化酶对肽段的特异性分解位点不同所致。如胃蛋白酶有较广泛的底物特异性,但优先选择Phe或Tyr残基的C端降解,胰蛋白酶特异选择P₁位为Lys和Arg残基的位点,而胰凝乳蛋白酶则优先选择P₁位为芳香族氨基酸(Tyr、Trp、Phe)和Leu的残基^[18]。

不同加工方式对鲍鱼肌肉模拟肠液的影响与模拟胃液结果相似,也即干制鲍鱼最难被蛋白酶降解,而罐制鲍鱼最容易被分解消化。与单独消化不同,在模拟总消化过程中,4种不同方式加工鲍鱼的肌肉蛋白经胃蛋白酶、胰蛋白酶和胰凝乳蛋白酶消化后均可被完全降解。推测是由于经过胃蛋白酶消化,肌肉蛋白中可被胰蛋白酶和胰凝乳蛋白酶作用的位点暴露较为完全,加快了消化的进程,间接证明了胃蛋白酶对于蛋白消化的重要性。

ACE抑制肽的活性与其结构密切相关,Hernández-Ledesma等^[19]发现C端含有脯氨酸、苯丙氨酸和酪氨酸残基,N端含有缬氨酸或异亮氨酸残基的肽段可以高效抑制ACE活性。一般而言,低分子量肽较高分子量肽更容易被机体吸收^[20]。本研究发现3种主要消化酶联合作用对4种鲍鱼制品均能产生有效降解,且降解产物对ACE具有不同的抑制效果。

本研究探讨了生鲜、煮制、干制及罐制4种不同加工方式对鲍鱼肌肉消化特性及结构的影响。模拟胃肠液消化结果显示,加工方式对鲍鱼肌肉消化特性有一定影响。不同加工制品体外胃液消化率、肠液消化率及胃肠液总消化率高低均依次为罐制>煮制>生鲜>干制。消化终产物表现的ACE抑制活性(IC₅₀)依次为罐制(464.2 μg/mL)<干制(665.4 μg/mL)<煮制(775.7 μg/mL)<生鲜(803.9 μg/mL)。因此,对鲍鱼采用罐制加工方式可以有效提高其消化率,且产物具有较好的ACE抑制活性。电镜观察结果显示,不同加工方式的皱纹盘鲍肌肉微观结构存在明显差异,直接影响其质构。

参考文献:

- [1] 张亚琦. 鲍鱼的物性学研究及加工工艺探讨[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
Zhang Y Q. Study on the processing methods of abalone and its rheological characteristic[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008 (in Chinese).
- [2] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业年鉴-2015[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 218.
The People's Republic of China Ministry of Agriculture, Fisheries Bureau. China Fisheries Yearbook-2015[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 218 (in Chinese).
- [3] 白利霞, 方婷, 陈锦权. 鲍鱼深加工技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2011(12): 528-531.
Bai L X, Fang T, Chen J Q. Research progress of the processing technologies for abalone[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011(12): 528-531(in Chinese).
- [4] 刘倩. 鲍鱼干制水发和贮藏过程中质构及流变学特性变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Liu Q. Changes in structure and rheological properties of abalone during drying and storage process[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).
- [5] 黄菊青, 方婷, 陈锦权. 酱汁鲍鱼硬罐头杀菌工艺及流变学性质研究[J]. 食品科学, 2011, 32(14): 67-71.
Huang J Q, Fang T, Chen J Q. Sterilization process and rheological properties of canned abalone with sauce[J]. Food Science, 2011, 32(14): 67-71(in Chinese).
- [6] García-Arias M T, Navarro M P, García-Linares M C. Effects of different thermal treatments and storage on the proximate composition and protein quality in canned tuna[J]. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 2004, 54(1): 112-117.
- [7] Deng Y, Luo Y L, Wang Y G, *et al.* Drying-induced protein and microstructure damages of squid fillets affected moisture distribution and rehydration ability during rehydration[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 123: 23-31.
- [8] Wu Q, Jia J, Yan H, *et al.* A novel angiotensin-I converting enzyme (ACE) inhibitory peptide from gastrointestinal protease hydrolysate of silkworm pupa (*Bombyx mori*) protein: Biochemical characterization and molecular docking study[J]. Peptides, 2015, 68: 17-24.
- [9] 刘凡, 唐伟伟, 韩飞, 等. 两种干鲍样品复水涨发过程中质构及流变学特性[J]. 食品科学, 2015, 36(21): 15-19.
Liu F, Tang W W, Han F, *et al.* Rheological properties and structural change of dried abalone meat produced by two different drying methods during rehydration[J].

- Food Science, 2015, 36(21): 15-19(in Chinese).
- [10] 高昕, 张亚琦, 许家超, 等. 不同干燥条件对鲍鱼组织结构及流变特性的影响[J]. 中国食品学报, 2008, 8(3): 108-115.
- Gao X, Zhang Y Q, Xu J C, *et al.* Effects of different drying methods on texture and rheological properties of abalone[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2008, 8(3): 108-115(in Chinese).
- [11] United States Pharmacopeial Convention, Committee of Revision. The United States Pharmacopeia USP23: The National Formulary NF 18; National Formulary Supplements 1-9[M]. Netherlands: Springer, 1987.
- [12] Thomas K, Aalbers M, Bannon G A, *et al.* A multi-laboratory evaluation of a common *in vitro* pepsin digestion assay protocol used in assessing the safety of novel proteins[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2004, 39(2): 87-98.
- [13] Huang Y Y, Liu G M, Cai Q F, *et al.* Stability of major allergen tropomyosin and other food proteins of mud crab (*Scylla serrata*) by *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(5): 1196-1201.
- [14] Laemmli U K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4[J]. Nature, 1970, 227(5259): 680-685.
- [15] Cushman D W, Cheung H S. Spectrophotometric assay and properties of the angiotensin-converting enzyme of rabbit lung[J]. Biochemical Pharmacology, 1971, 20(7): 1637-1648.
- [16] Zhang L L, Xue Y, Xu J, *et al.* Effects of high-temperature treatment (≥ 100 °C) on Alaska pollock (*Theragra chalcogramma*) surimi gels[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(1): 115-120.
- [17] Do A B, Williams K, Toomer O T. *In vitro* digestibility and immunoreactivity of bovine milk proteins[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 581-587.
- [18] Astwood J D, Leach J N, Fuchs R L. Stability of food allergens to digestion *in vitro*[J]. Nature Biotechnology, 1996, 14(10): 1269-1273.
- [19] Hernández-Ledesma B, Contreras M D M, Recio I. Antihypertensive peptides: production, bioavailability and incorporation into foods[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2011, 165(1): 23-35.
- [20] Roberts P R, Burney J D, Black K W, *et al.* Effect of chain length on absorption of biologically active peptides from the gastrointestinal tract[J]. Digestion, 1999, 60(4): 332-337.

Comparison of the digestibility of abalone (*Haliotis discus hannai*) produced by four different processing treatments

WAN Chujun¹, YOU Yinchuan¹, WENG Ling^{1,2}, ZHANG Lingjing^{1,2},
LIU Guangming^{1,2}, CAO Minjie^{1,2*}

(1. College of Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. National & Local Joint Engineering Research Center of Processing Technology for Aquatic Products,
Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to know the effect of different processing methods on protein digestion of abalone (*Haliotis discus hannai*), the effects of four processing methods including raw, boiling, canning, and drying on the digestibility of abalone muscular proteins were investigated. Simulated gastric fluid (SGF) as well as simulated intestinal fluid (SIF) was used to study the effects of *in vitro* digestion. The products were evaluated by sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE). Scanning electronic microscopy (SEM) was used to observe the differences in the fiber of the four products. The results showed that the digestibility of proteins in canned abalone was the highest among the four processing methods. Proteins from dried abalone were most resistant to digestion both in SGF and SIF. The four processing methods revealed different fiber structures under SEM. Furthermore, the angiotensin-I converting enzyme (ACE) inhibitory activity of the digested products exhibited the following order: canned (464.2 $\mu\text{g/mL}$) < dried (665.4 $\mu\text{g/mL}$) < boiled (775.7 $\mu\text{g/mL}$) < raw (803.9 $\mu\text{g/mL}$). In conclusion, our present study suggested that different processing methods of abalone significantly affect the digestibility of proteins and the ACE inhibitory activity of the final products, which may provide a reference for abalone processing and consumption.

Key words: *Haliotis discus hannai*; processing methods; simulated gastrointestinal digestion; ACE inhibitory activity

Corresponding author: CAO Minjie. E-mail: mjcao@jmu.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31471640); Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean (201305015)