

文章编号:1000-8551(2020)08-1770-06

汽爆处理对鳙鱼骨酶解特性的影响

董 烨¹ 张益奇^{1,2,3,*} 姚洪正⁴ 何光喜⁴ 戴志远^{1,2,3,*}¹浙江工商大学海洋食品研究院,浙江 杭州 310035;²浙江省水产品加工技术研究联合重点实验室,浙江 杭州 310035;³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 116000;⁴杭州千岛湖发展集团有限公司,浙江 杭州 311701)

摘 要:为研究汽爆预处理对鱼骨蛋白酶解特性的影响,以鳙鱼骨为研究对象,采用 Alcalase 酶解鳙鱼鱼骨,研究不同保压时间、汽爆压力对鳙鱼骨的水解度、蛋白质回收率、三氯乙酸(TCA)可溶性氮得率的影响。结果表明,汽爆预处理能显著提高鳙鱼骨蛋白的溶出率。0.6 MPa、2.0 min 汽爆预处理鱼骨经 Alcalase 酶解 3.0 h 后,酶解产物的水解度为 8.69%,蛋白质回收率为 32.69%,TCA 可溶性氮得率为 28.79%,均显著高于未处理组;酶解产物相对分子质量主要分布在 1 000 Da 以下,高达 93%。本研究结果为鱼骨资源利用提供了一定的技术支持。

关键词:汽爆;鱼骨;酶解;相对分子质量分布

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.08.1770

鳙鱼(*Aristichthys nobilis*)俗称胖头鱼,是我国主要淡水经济鱼类,其繁殖速度快,产量大。据统计,2018 年我国鳙鱼产量达 309.6 万 t^[1]。鳙鱼头肥而味美,富含蛋白质和不饱和脂肪酸,深受消费者喜爱^[2]。但鳙鱼头的畅销不可避免地导致鱼骨、鱼鳞、鱼皮等下脚料亟待处理。鱼骨作为鱼头、鱼片加工过程的主要副产物之一,其胶原蛋白及钙含量丰富,而目前国内对于鱼骨的综合利用技术比较滞后,大多只是被用作动物饲料或直接丢弃,利用率低,寻找合适的处理方法提高鱼骨的利用价值,对我国水产品加工行业的发展具有重要意义。

目前,鱼骨的处理方法主要有酸碱法^[3-5]、酶解法^[6-8]和高压蒸煮法^[9-11]等。但酸碱法处理通常会对环境造成污染,而且在连续的加工步骤中操作困难,得率低、耗时长^[12],限制了鱼骨的有效利用;酶解法虽然温和可控,但鱼骨内部的胶原蛋白是由 3 条螺旋链相互缠绕而成的螺旋结构,其基质附着羟基磷灰石,使得鱼骨非常坚固,难以被有效酶解^[13];高压蒸煮法虽然可以提高酶解效率,但所需时间较长,效率较低,而且可能导致一些热敏性氨基酸损失^[14]。因此开发一

种环境友好、简便的鱼骨预处理方法具有重要的研究意义。近年来,汽爆技术^[15]作为一种先进的物理化学预处理技术受到了广泛的关注,其原理是将高压蒸汽压入物料内部空隙,保压一段时间后,瞬间泄压,容器内蒸汽通过膨胀对外做功,产生冲击波对物料进行机械剪切,使得物料组分间紧密结构破坏、解离。该技术相比于传统的高压蒸煮法具有短时、高效、能耗低的优势。

本试验以鳙鱼骨为研究对象,经汽爆处理后,采用碱性蛋白酶酶解,以水解度、蛋白质回收率、三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCA)可溶性氮得率为指标,研究不同汽爆处理条件对鳙鱼鱼骨酶解特性的影响,进一步探究鱼骨酶解产物分子量的分布情况,旨在建立一种简单高效环保的预处理方法,为高效利用水产加工副产物提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鳙鱼鱼骨,购自杭州千岛湖;碱性蛋白酶 Alcalase

收稿日期:2019-11-11 接受日期:2019-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31701543),“蓝色粮仓”国家重点研发计划项目(2019YFD090200)

作者简介:董烨,女,主要从事水产品加工与贮藏研究。E-mail: dy12686@163.com

* 通讯作者:张益奇,男,助理研究员,主要从事水产品加工与高值化利用研究。E-mail: zhangyq@zjgsu.edu.cn;

戴志远,男,研究员,主要从事水产品加工与贮藏研究。E-mail: dzy@zjgsu.edu.cn。同为通讯作者。

3.0 T, 丹麦诺维信公司中国天津分公司; 二喹啉甲酸 (bicinchoninic acid, BCA) 蛋白浓度试剂盒, 上海碧云天生物技术有限公司; 碳酸酐酶 (29 000 Da)、细胞色素 C (12 400 Da)、抑肽酶 (6 500 Da)、马尿酸-组氨酸-亮氨酸 (N-hippuryl-histidyl-leucine, HHL) (429 Da) 等, 均购自美国 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

QBS 200B 汽爆机, 正道生物能源公司; e2695 高效液相色谱, 美国 Waters 公司; 400Y 多功能粉碎机, 永康市铂欧五金制品有限公司; DGG-9123A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海森信实验仪器有限公司; K-360 凯氏定氮仪、K-425 快速消解仪, 瑞士 Buchi 公司; DSHZ-300A 旋转式恒温振荡器, 太仓市实验设备厂。

1.3 试验方法

1.3.1 鱼骨原料的前处理 将新鲜鱼骨用清水冲洗后沥干, 用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 溶液浸泡 4 h, 每 2 h 换一次溶液, 除去杂蛋白, 流水冲至中性, 沥干备用。

1.3.2 汽爆处理工艺 将汽爆机预热至所需压力, 取 200 g 经 1.3.1 处理的鱼骨置于汽爆机内, 保压一定时间后瞬间泄压, 将样品喷至接收器中, 完全收集汽爆后的样品于 40°C 烘干, 粉碎后于 -20°C 保存备用。

1.3.3 汽爆处理单因素及酶解试验 保压时间的影响: 在汽爆压力 0.6 MPa、酶解温度 50°C 、酶添加量 2.0%、酶解时间 3 h、初始 pH 值 8.0 条件下, 设定保压时间为 0、0.5、1.0、2.0、3.0 min。

汽爆压力的影响: 在酶解温度 50°C 、酶底比 2.0%、酶解时间 3 h、初始 pH 值 8.0, 保压时间 3.0 min 条件下, 设定汽爆压力为 0、0.3、0.6、1.0 MPa。

配制质量分数 6.0% 的鱼骨溶液, 按酶底比 1:50 加碱性蛋白酶, pH 值调至 8.0 后, 于恒温振荡水浴锅中 50°C 恒温酶解 3.0 h。将酶解液于沸水浴中灭酶 10 min, $8\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 取上清液过滤备用。

1.3.4 水解度的测定 水解度采用甲醛滴定法^[16]测定。

1.3.5 蛋白质回收率的测定 采用 BCA 试剂盒测定上清液中的蛋白质浓度, 原料中的蛋白质含量采用凯氏定氮法测定。按照公式计算蛋白质回收率:

蛋白质回收率 = (上清液中蛋白质量 / 原料总蛋白质量) $\times 100\%$ (1)。

1.3.6 TCA 可溶性氮得率的测定 将 20% TCA 与酶解液等体积比混合, 然后于 4°C 静置 1 h, $3\,000 \times g$ 离心 10 min, 采用 BCA 试剂盒测定上清液可溶性蛋白含量。按照公式计算 TCA 可溶性氮得率:

TCA 可溶性氮得率 = (上清液中蛋白质量 / 原料总

蛋白质量) $\times 100\%$ (2)。

1.3.7 酶解液分子量分布 参照涂丹等^[17]的方法。色谱条件为: TSKgel G2000 SWxl ($7.8 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, Tosoh) 色谱柱, Waters e2695 HPLC 系统和 UV/Vis 检测器, 检测波长 220 nm, 流动相为乙腈 45% - 水溶液 (0.1% TFA) 55%, 流速 $0.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样量 10 μL , 时间 40 min。相对分子质量校正曲线所用标准品为: HHL (429 Da)、抑肽酶 (6 500 Da)、细胞色素 C (12 400 Da)、碳酸酐酶 (29 000 Da)。

1.4 数据处理

试验数据以平均数 \pm 标准差 (mean \pm SD) 表示, 用 SPSS 21.0 统计软件进行方差分析 (ANOVA), 采用多重比较分析法对各组进行显著性检验 ($P < 0.05$), 用 Origin Pro 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 汽爆处理对鱼骨蛋白质回收率的影响

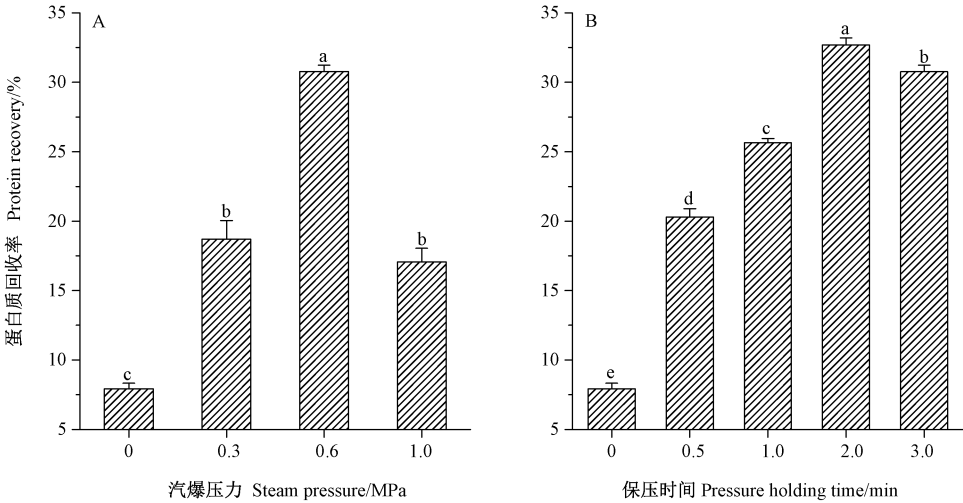
由图 1 可知, 蛋白质回收率随汽爆压力和保压时间的增加呈先增大后减小的趋势, 当汽爆压力为 0.6 MPa, 保压时间为 2.0 min 时达到 32.69%, 而未处理组仅为 7.92%, 差异显著 ($P < 0.05$), 这可能是由于汽爆作用下蛋白质结构疏展^[18-19], 降解为更多小分子物质, 低分子物质溶出, 回收率增加。而当保压时间进一步延长, 汽爆压力进一步增大, 蛋白质回收率反而下降, 这可能是由于当汽爆压力过高, 保压时间过长, 造成了可溶性蛋白的损失, 鱼骨蛋白过度水解, 从而导致了回收率下降。

2.2 汽爆处理对 TCA 可溶性氮得率的影响

TCA 可以沉淀十肽以上的蛋白质^[20], 采用 TCA 可溶性氮得率可表征酶解液的短肽得率。由图 2 可知, 当汽爆压力为 0.6 MPa, 保压时间为 2.0 min 时 TCA 可溶性氮得率为 28.79%, 较未处理组高出 22.75% ($P < 0.05$); 维持保压时间为 3.0 min, 当汽爆压力进一步增大时, TCA 可溶性氮得率反而呈下降趋势, 但是仍较未处理组高出一倍, 可见汽爆处理对于鱼骨蛋白的提取具有显著影响, 这与蛋白质回收率的趋势一致。

2.3 汽爆处理对鱼骨水解度的影响

由图 3 可知, 在保压时间为 3.0 min 条件下, 鱼骨水解度随着汽爆压力的增大逐渐增大 ($P < 0.05$), 这可能是因为随着汽爆压力的增大, 在高温高压的协同作用下, 部分蛋白质直接降解为小分子物质, 鱼骨蛋白结构展开, 三螺旋结构被破坏, 暴露出更多酶切位点, 蛋



注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same as following.

图 1 汽爆处理对鱼骨蛋白质回收率的影响

Fig.1 Effect of steam explosion treatment on protein recovery of fish bone

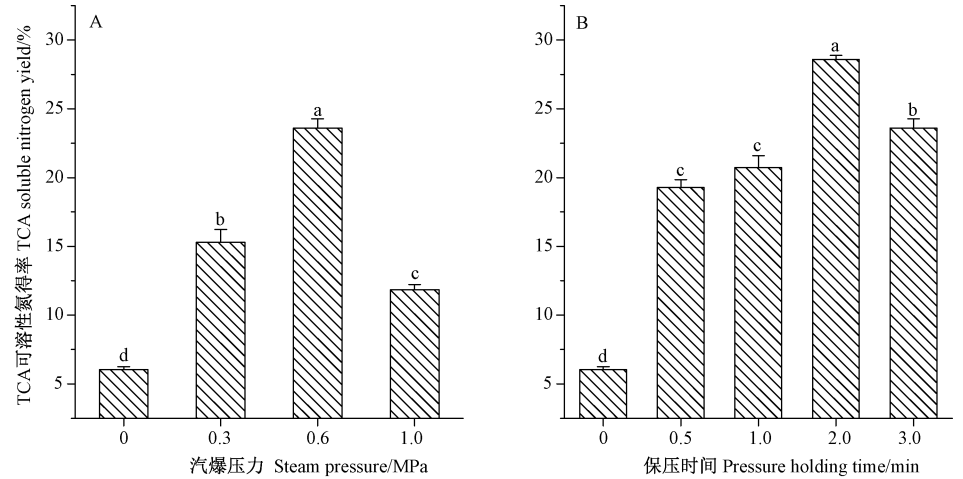


图 2 汽爆处理对鱼骨酶解液 TCA 可溶性氮得率的影响

Fig.2 Effect of steam explosion treatment on the soluble nitrogen in fish bone enzymatic hydrolysate

白质肽键不断断裂,鱼骨水解度逐渐增大。在汽爆压力为 0.6 MPa 条件下,保压时间为 0.5~2.0 min 时,鱼骨水解度随保压时间延长呈逐渐增大的趋势,在保压时间为 2.0 min 时达到 8.69%,而未处理组仅为 3.45%,差异显著($P<0.05$),但随着保压时间的进一步延长其水解度变化不显著($P>0.05$)。

2.4 鱼骨酶解液相对分子质量分布

以各标准品分子质量的对数[lg(M)]为纵坐标,保留时间(t)为横坐标作标准曲线。由图 4 可知,lg(M)与 t 呈良好的线性关系,回归方程为:lg(M) = $-0.209t + 6.992$,决定系数 $R^2 = 0.9913$ 。根据回归方程计算样品相对分子质量的分布情况。图 5 为鱼骨经汽爆压力 0.6 MPa、保压时间 2.0 min 汽爆处理后的酶

解液相对分子量分布情况。结果表明,经碱性蛋白酶酶解 3.0 h 后基本不存在大分子,1 000 Da 以下的小分子占 93%。表明经汽爆预处理后,鳙鱼骨蛋白酶解较彻底,酶解效果较好。

3 讨论

近年来,酶法制备生物活性肽受到广泛关注^[21]。鱼骨中蛋白分子通过氢键、疏水作用等次级键形成致密的纤维状结构,使得酶催化位点被包埋,阻碍了蛋白酶水解。此外,鱼骨组分中灰分含量较高,主要以羟基磷灰石形式存在,这些抗性屏障使得鱼骨难以被降解。研究发现,通过适当的高温高压处理可以破坏蛋白质

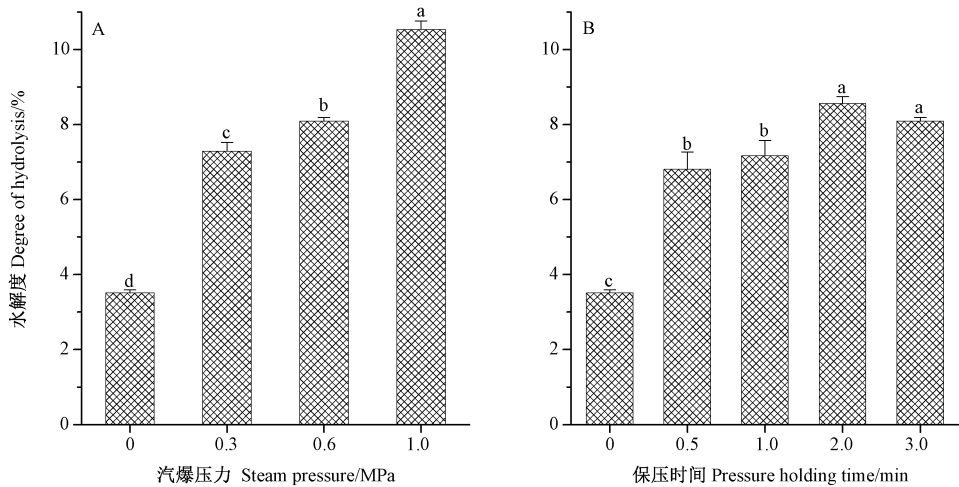


图 3 汽爆处理对鱼骨水解度的影响

Fig.3 Effect of steam explosion treatment on the degree of hydrolysis of fish bone

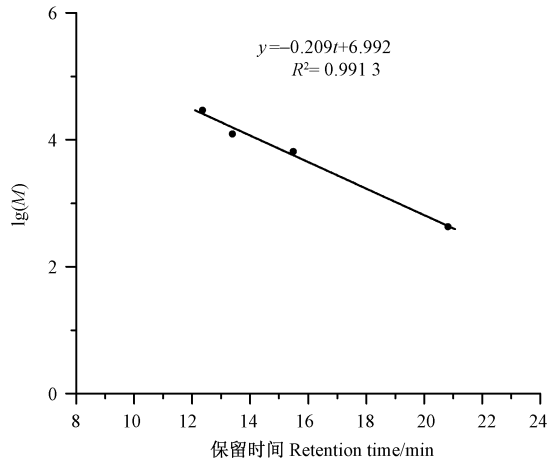


图 4 相对分子质量标准曲线

Fig.4 Standard curve of relative molecular mass

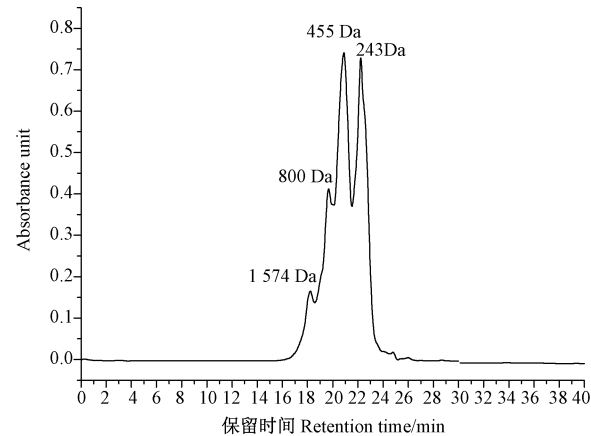


图 5 鱼骨酶解产物相对分子质量分布色谱图

Fig.5 Chromatogram of relative molecular mass distribution of fish bone hydrolysate

分子的高级结构,使蛋白质刚性结构软化,处于解离状态^[22-23],提高酶解效率。如朱文慧等^[24]采用超高压耦合酶解技术处理鳙鱼骨发现,超高压酶解液中可溶性肽含量是常压酶解液中的 1.47 倍。胡静等^[25]将金枪鱼骨于 121℃ 蒸煮 30 min 后,采用响应面优化酶解工艺,得到酶解产物水解度为 12.34%。吴克刚等^[26]发现当蒸煮压力为 0.13 MPa、蒸煮时间为 75 min 时,罗非鱼骨的软化效果最好。高压蒸煮处理在一定程度上有利于鱼骨破碎,使蛋白分子结构发生改变,提高蛋白质的溶出率,但用时相对较长。

汽爆技术作为一种绿色、高效的物理化学处理方法,已广泛应用于生物质原料的预处理,并取得了较好的效果。汽爆技术整合了高温高压蒸煮产生的热能以及瞬间泄压产生的机械能,使得物料组分间紧密结构被破坏、解离,极大地缩短了预处理时间。但将汽爆技术用于鱼骨蛋白提取的研究仍鲜见报道。本研究采用汽爆技术软化鱼骨,使鱼骨部分蛋白质溶出,蛋白质结构疏展,更易于被酶切。研究表明,当汽爆压力为 0.6 MPa,保压时间为 2.0 min 时,TCA 可溶性氮得率和蛋白质回收率分别是未处理组的 4.76 倍和 4.12 倍,汽爆预处理可显著提高鱼骨蛋白的酶解特性。相比于前人研究,本研究预处理时间更短,操作工艺更简便,能耗更低,极大地提升了效率。Tan 等^[27]将鳙鱼骨于 121℃ 处理 90 min,采用胰蛋白酶和风味蛋白酶进行酶解,得到 2 种酶解产物中主要肽的分子量在 1 000~3 000 Da 之间,1 000 Da 以下的肽分别占 23.83%和 29.63%。Fan 等^[28]将狭鳙骨架于 121℃ 处理 30 min,采用碱性蛋白酶酶解,得到酶解产物相对分子量在 1 000 Da 以下的占 29.34%。本试验所制得的

鳙鱼骨酶解产物相对分子质量在 200~1 000 Da 之间的占 93%, 相比于前人研究, 分子量较小, 分布更集中。

本研究利用汽爆技术处理鱼骨, 在高温蒸汽和机械剪切力作用下, 一方面利于鱼骨内部蛋白质从羟基磷灰石等抗性屏障溶出, 另一方面适度热处理可使蛋白质结构展开, 尤其是使胶原蛋白的三螺旋结构变得松散, 暴露出更多酶切位点, 更易于被酶切, 有效释放内部活性肽段, 在较短的酶解时间内达到较好的酶解效果。本试验初步研究了汽爆处理对鳙鱼骨蛋白酶解特性的影响, 但对鱼骨汽爆处理最优工艺参数, 以及汽爆鱼骨蛋白的构效关系还有待进一步研究。

4 结论

本研究发现汽爆处理能显著提高鱼骨蛋白溶出率和降解程度。当汽爆压力为 0.6 MPa, 保压时间为 2.0 min 时, 蛋白质回收率为 32.69%, TCA 可溶性氮得率为 28.79%, 是未处理组的 4~5 倍, 此时鱼骨水解度为 8.69%, 酶解产物相对分子质量主要分布在 1 000 Da 以下, 高达 93%。本研究只针对汽爆处理对鱼骨酶解特性进行了初步探究, 后续可从产业需求出发, 有针对性地开发具有抗氧化性、抗冻性、抗菌性等功能特性的鱼骨水解液, 进一步拓宽鱼骨蛋白资源用途。汽爆作为一种物理化学预处理技术, 具有绿色环保、短时高效等优势, 为水产加工副产物中丰富的蛋白质资源开发利用提供了一条新途径。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 2019 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 25
- [2] 谢雅雯, 叶云花, 张露, 朱敏方. 生鲜运输过程中鳙鱼头品质的变化[J]. 食品与机械, 2019, 36(6): 129-134
- [3] 谭洪亮, 郁迪, 王斌, 胡发远, 马剑茵. 金枪鱼鱼骨胶原肽的制备及抗氧化活性研究[J]. 水产学报, 2014, 38(1): 143-148
- [4] 范露, 刘茹, 熊善柏. 3 种水解方法对鱼骨蛋白水解效果影响的比较研究[J]. 食品工业, 2014, 35(2): 171-175
- [5] 王珊珊, 张朝辉, 赵雪, 侯虎, 李八方. 鳕鱼骨胶原肽的制备及其对成骨样 MG-63 细胞作用机制的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 95-99
- [6] Muralidharan N, Shakila R J, Sukumar D, Jeyasekaran G. Skin, bone and muscle collagen extraction from the trash fish, leather jacket (*Odonus niger*) and their characterization[J]. Journal of Food Science and Technology[J]. 2013, 50(6): 1106-1113
- [7] Idowu A T, Benjakul S, Sinthusamran S, Sookchoo P, Kishimura H. Protein hydrolysate from salmon frames: Production, characteristics and antioxidative activity [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(2): e12734
- [8] Bechtel P J, Watson M A, Lea J M, Bett-Garber K L, Bland J M. Properties of bone from Catfish heads and frames[J]. Food Science and Nutrition, 2019, 7(4): 1396-1405
- [9] Yang H, Wang H B, Zhao Y, Wang H Y, Zhang H J. Effect of heat treatment on the enzymatic stability of grass carp skin collagen and its ability to form fibrils in vitro[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(2): 329-336
- [10] 沙小梅, 郝君晖, 涂宗财, 胡姿姿, 王振兴, 张露, 黄涛. 基于亚临界水技术的鱼骨软化及其在鱼糜中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(2): 154-159
- [11] 任二芳, 艾静汶, 牛德宝, 陈军, 彭靖茹, 刘功德. 酶解罗非鱼骨提取胶原多肽的工艺优化[J]. 食品工业, 2017, 38(5): 1-5
- [12] Akagündüz Y, Mosquera M, Giménez B, Alemán A, Montero P, Gómez-Guillén M C. Sea bream bones and scales as a source of gelatin and ACE inhibitory peptides[J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 55(2): 579-585
- [13] 谭晓怡. 鳕鱼骨蛋白及其营养调味料制备技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
- [14] 张益奇, 赵伟, 金妙仁, 杨瑞金, 张文斌, 华霄, 徐张贤. 采用汽爆技术提高羽毛角蛋白生物效价的研究[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 41-43
- [15] Zhang Y Q, Zhao W, Yang R J. Steam flash explosion assisted dissolution of keratin from feathers[J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2015, 3(9): 2036-2042
- [16] 朱广琪, 李芳浩, 舒琳, 许佳琪, 陈圆, 励建荣, 韩晓祥. 蛋白酶分步水解制取金华火腿水解液工艺研究[J]. 核农学报, 2019, 32(12): 2388-2396
- [17] 涂丹, 张益奇, 叶繁, 戴志远. 酶解制备鱼鳞蛋白降血压肽的工艺优化[J]. 核农学报, 2019, 33(1): 126-134
- [18] 陈林, 陈建设, 于泓鹏, 吴克刚. 水热预处理提高花生分离蛋白酶解效率及其机理分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 278-284
- [19] Maria S D, Ferrari G, Maresca P. Effect of high hydrostatic pressure on the enzymatic hydrolysis of bovine serum albumin[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(10): 3151-3158
- [20] 赵培城, 唐连祥, 袁剑, 陈义方, 王求娟, 丁玉庭, 刘书来. 超声辅助酶解加工副产物制备蛋白肽[J]. 水产学报, 2017, 41(6): 919-927
- [21] 赵谋明, 赵强忠. 食物蛋白酶解理论与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017
- [22] 江连洲. 食用蛋白质柔性化加工技术概述[J]. 中国食品学报, 2015, 15(8): 1-9
- [23] 王喜波, 王健, 张泽宇, 陈爽, 高婷婷, 江连洲. 物理改性对大豆蛋白柔性及乳化性的影响及其相关性分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 339-344
- [24] 朱文慧, 杨琬琳, 步营, 李学鹏, 励建荣, 李钰金. 超高压耦合酶解鳕鱼骨的工艺优化及其对酶解液滋味的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 220-225
- [25] 胡静, 段振华, 罗伟, 万斌. 金枪鱼骨抗氧化酶解物的工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(15): 64-69
- [26] 吴克刚, 张文祥, 柴向华, 何文龙. 高压蒸煮软化罗非鱼鱼骨的

- 研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(15): 210–212
- [27] Tan X Y, Qi L, Fan F J, Guo Z X, Wang Z Y, Song W, Du M. Analysis of volatile compounds and nutritional properties of enzymatic hydrolysate of protein from cod bone[J]. Food Chemistry, 2018, 26(4): 350–357
- [28] Fan W W, Tan X Y, Xu X B, Li G D, Wang Z Y, Du M. Relationship between enzyme, peptides, amino acids, ion composition, and bitterness of the hydrolysates of Alaska pollock frame[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(4): e12801

Effect of Steam Explosion Treatment on Enzymolysis Characteristics of Bighead Carp Bone Protein

DONG Ye¹ ZHANG Yiqi^{1,2,3,*} YAO Hongzheng⁴ HE Guangxi⁴ DAI Zhiyuan^{1,2,3,*}

(¹Institute of Seafood, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310035;

²Key Laboratory of Aquatic Products Processing of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310035;

³Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian, Liaoning 116000;

⁴Hangzhou Qiandao Lake Development Group Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311701)

Abstract: In order to utilize the fish bone effectively, effect of steam explosion treatment on enzymatic hydrolysis characteristics of fish bone was evaluated. Bighead carp bone was treated by steam explosion followed by enzymatic hydrolysis using alkaline protease. The effect of steam explosion on degree of hydrolysis (DH), protein recovery (PR), TCA soluble nitrogen were investigated. The results showed that steam explosion pretreatment could significantly improve the dissolution of bighead carp bone protein. After hydrolysis for 3.0 h, the DH, PR and TCA soluble nitrogen of the hydrolysates of the fish bone treated at 0.6 MPa for 2.0 min was 8.69%, 32.69%, and 28.79%, respectively. The relative molecular weight of the hydrolysates mainly distributed in the range of 200–1000 Da. The results of this study provide some technical support for the utilization of fish bone resources.

Keywords: steam explosion, fish bone, enzymatic hydrolysis, molecular weight distribution