

# 超声波和碱性蛋白酶处理对克氏原螯虾 脱壳及虾仁品质的影响

张喜才<sup>1,2</sup>, 张新林<sup>3</sup>, 黄业传<sup>2</sup>, 陈清婵<sup>2</sup>

(1.荆楚理工学院 农业生物技术研究,湖北 荆门 448000;2.荆楚理工学院 生物工程学院,湖北 荆门 448000;3.荆门(中国农谷)农业科学研究院,湖北 荆门 448000)

**摘要:**为研究超声波和碱性蛋白酶处理对克氏原螯虾脱壳及虾仁品质的影响,通过壳分离功、虾仁得率、虾仁质地、色泽、气味、嫩度、离心损失、肌原纤维蛋白含量等指标进行分析,确定克氏原螯虾脱壳的最佳前处理方式。结果表明:相对于传统加工方式,0.5%碱性蛋白酶和300W超声波联合处理,能有效降低壳分离功21.8%,提高虾仁得率31%,并且显著提高了虾仁的嫩度和肌原纤维蛋白含量,硬度有所下降,气味和色泽方面无显著变化,研究结果为克氏原螯虾加工工艺的优化提供参考。

**关键词:**克氏原螯虾;碱性蛋白酶;超声波;脱壳;虾仁品质

## Effects of Ultrasonic Wave and Alkaline Protease Treatment on Shelling and Quality of *Procambarus clarkii*

ZHANG Xicai<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinlin<sup>3</sup>, HUANG Yechuan<sup>2</sup>, CHEN Qingchan<sup>2</sup>

(1. Institute of Agricultural Biotechnology, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, Hubei, China; 2. College of Bioengineering, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, Hubei, China; 3. Jingmen (China Agricultural Valley) Academy of Agricultural Sciences, Jingmen 448000, Hubei, China)

**Abstract:** In order to study the effects of ultrasonic wave and alkaline protease treatment on the shelling and quality of *Procambarus clarkii*, the shell separation work, shrimp yield, shrimp texture, color, smell, tenderness, centrifugal loss, myofibrillar content, and other indicators were analyzed to determine the best pretreatment method for the shelling of *Procambarus clarkii*. The results showed that compared with traditional processing methods, the combined treatment of 0.5% alkaline protease and 300 W ultrasonic waves could effectively reduce the shell separation work by 21.8% and increase the shrimp yield by 31%, and it significantly improved the tenderness of shrimp and the myofibrillar content. The hardness had decreased, and there was no significant change in smell and color. The research results provide a reference for the optimization of the processing technology of *Procambarus clarkii*.

**Key words:** *Procambarus clarkii*; alkaline protease; ultrasonic wave; shelling; quality of shrimp

引文格式:

张喜才,张新林,黄业传,等.超声波和碱性蛋白酶处理对克氏原螯虾脱壳及虾仁品质的影响[J].食品研究与开发,2024,45(5):90-96.

ZHANG Xicai, ZHANG Xinlin, HUANG Yechuan, et al. Effects of Ultrasonic Wave and Alkaline Protease Treatment on Shelling and Quality of *Procambarus clarkii*[J]. Food Research and Development, 2024, 45(5): 90-96.

克氏原螯虾俗称小龙虾,其蛋白质含量高、营养丰富全面,深受广大消费者的欢迎,市场价值达千亿规模,而湖北是小龙虾的重要产地,2021年全省小龙虾

的养殖面积达597 733.3公顷,产量约占到了全国的一半<sup>[1-2]</sup>。小龙虾的加工品以速冻虾仁为主,但是小龙虾虾壳较为坚硬,虾肉与虾壳紧密相连,导致脱壳十分困

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划资助项目(D20214303);荆楚理工学院校级科研项目(ZD202103)

作者简介:张喜才(1982—),男(汉),副教授,博士,研究方向:水产品贮藏与加工。

难,小龙虾的工厂加工仍然以工人手工操作为主,生产效率低,劳动强度大<sup>[3]</sup>,国内目前采用的工艺是将小龙虾进行蒸煮热烫,然后常温水冷却水冷却处理、脱壳,但是这种方法存在虾仁营养流失、品质不够新鲜、产品得率较低的问题,超高压处理可以一定程度上提高脱壳效率和虾仁品质,但是设备成本和操作费用昂贵<sup>[4]</sup>,因此小龙虾如何高效、经济脱壳成为了工厂化加工的技术瓶颈。

虾类腹部结构分为三部分,由内到外分别为肌肉(虾仁)、表皮和外壳,表皮与肌肉通过广泛交叉的连接组织牢固地结合,有研究表明连接结构的结缔组织主要是由胶原蛋白组成,所以脱壳的关键点在于破坏此结构的胶原蛋白,从而使其连接部位松动<sup>[4]</sup>。研究表明虾类体内的内源酶和来自微生物的外源性蛋白酶可以促进壳肉分离,内切蛋白酶能够显著促进北极甜虾的脱壳<sup>[5]</sup>。碱性蛋白酶是食品行业应用广泛的内切蛋白酶,能够降解表皮和真皮的连接蛋白<sup>[6-7]</sup>,对于胶原蛋白具有良好的水解效应<sup>[5]</sup>。超声波是指频率高于人类听觉范围(>20 kHz)的声波,应用于食品加工可以产生空化效应、热效应和机械效应,空化是一种气泡形成、生长和破裂的现象,空化气泡的破裂会产生冲击波、微射流、湍流和剪切力等物理效应<sup>[8]</sup>,据报道超声波处理可以促进番茄的去皮,改善番茄的去皮效果<sup>[9]</sup>。相关研究表明,超声波可以增强酶对底物的亲和力,使酶的结构转变,暴露催化中心和结合位点,以及使物料结构松动便于酶进入内部,从而促进酶促降解效应<sup>[10]</sup>。截止目前,尚未有超声波和酶处理用于促进克氏原螯虾脱壳的报道。

相对于热烫冷却壳肉分离的加工工艺,本研究在减少热烫时间的基础上,采用碱性蛋白酶和超声波对克氏原螯虾进行处理,比较分析传统热烫加工及不同浓度的酶和不同功率超声波处理对克氏原螯虾壳肉分离功、产品得率以及虾仁品质的影响,以期对克氏原螯虾的加工工艺优化提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

鲜活克氏原螯虾(小龙虾)[质量(40±2)g]:湖北仁尚仁食品有限公司;碱性蛋白酶(200 U/mg):湖北裕盈生物科技有限公司;2,4-二硝基苯肼(分析纯)、KCl-Tris 缓冲液(化学纯)、氯化钠(分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

质构仪(TA.XT Plus):英国 stable micro system 公司;色差仪(CR-400):日本柯尼卡美能达公司;离心机(H-2050R-1):湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;嫩度仪(C-LM3B):北京天翔飞域科技有限公司;紫外可

见分光光度计(WFZ UV-2100):尤尼柯(上海)仪器有限公司;Bradford 蛋白浓度试剂盒:南京建成生物工程有限公司;超声波清洗仪(GT1222):深圳冠博科技有限公司;电子鼻(PEN3):德国 Aairsense 公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 样品的处理

将小龙虾清洗干净后,随机分为9组,每组30只,分别处理如下。

对照组:沸水热烫4 min 常温水及冷水依次冷却。

组2:沸水热烫1 min,室温下0.5%碱性蛋白酶酶液浸泡2 h,冷水漂洗,标记为0.5%。

组3:沸水热烫1 min,室温下1.0%碱性蛋白酶酶液浸泡2 h,冷水漂洗,标记为1.0%。

组4:沸水热烫1 min,室温下300 W 超声波处理2 h,冷水漂洗,标记为300 W。

组5:沸水热烫1 min,室温下600 W 超声波处理2 h,冷水漂洗,标记为600 W。

组6:沸水热烫1 min,室温下0.5%碱性蛋白酶酶液、300 W 超声处理2 h,冷水漂洗,标记为0.5%+300。

组7:沸水热烫1 min,室温下0.5%碱性蛋白酶酶液、600 W 超声波处理2 h,冷水漂洗,标记为0.5%+600。

组8:沸水热烫1 min,室温下1.0%碱性蛋白酶酶液、300 W 超声波处理2 h,冷水漂洗,标记为1.0%+300。

组9:沸水热烫1 min,室温下1.0%碱性蛋白酶酶液、600 W 超声波处理2 h,冷水漂洗,标记为1.0%+600。

#### 1.3.2 壳分离功

参考杨肖杰<sup>[11]</sup>的方法并略作改动,将经过预处理的小龙虾去除头部并称重,背部划线,然后将虾仁其中一端用探针穿过并固定在质构仪的底板上,夹具固定尾部与质构仪探头连接,在张力模式下测试,触发力5.0 g,以1 mm/s的速度将壳拉离60 mm的距离。根据Load-距离曲线计算壳肉分离所需要的总功,然后除以脱壳后所称质量得到壳分离功。

#### 1.3.3 虾仁得率

称量鲜活小龙虾的质量及所得虾仁的质量,虾仁得率为虾仁质量与鲜活小龙虾质量的比值,以百分数表示。

#### 1.3.4 虾仁完整率

脱壳后对虾仁进行观察,以虾仁的肌肉是否完整和尾部是否断裂作为判断依据,虾仁完整率为完整虾仁数与虾仁总数的比值,以百分数表示。

#### 1.3.5 离心损失

参考汪兰等<sup>[12]</sup>的方法,将取得的虾仁称重,然后在4 500 r/min 下离心10 min 后称重。离心损失为离心后虾仁质量损失与新鲜虾仁质量的比值,以百分数表示。

#### 1.3.6 嫩度

以剪切力作为嫩度指标,根据陈佳奇等<sup>[13]</sup>的方法

测定,每组6个重复。

### 1.3.7 虾仁质构

选择 P/36R 探头,取虾仁中间部位进行质地多面剖析法(texture profile analysis, TPA)模式测定,速度设置为测前 2 mm/s,测后 2 mm/s,来回循环两次,每组 6 个重复,得到不同试验组小龙虾虾仁的硬度、弹性、咀嚼性、内聚性。

### 1.3.8 虾仁色泽

利用色差仪对虾仁的背部和腹部在 Lab 模式下进行测定,考察不同处理组亮度  $L^*$  值、红绿  $a^*$  值及黄蓝  $b^*$  值的变化。

### 1.3.9 虾仁气味

参照沙小梅等<sup>[14]</sup>的方法,采用电子鼻检测无任何处理的新鲜虾仁、对照组、超声 300 W 处理组、0.5%+300 处理组、1.0%+600 处理组,对 5 个组的所有传感器响应值进行主成分分析(principal component analysis, PCA)。

### 1.3.10 肌原纤维蛋白含量、酶活

依据张喜才<sup>[15]</sup>的方法,分别测定不同处理组的肌原纤维蛋白含量、蛋白酶活性。

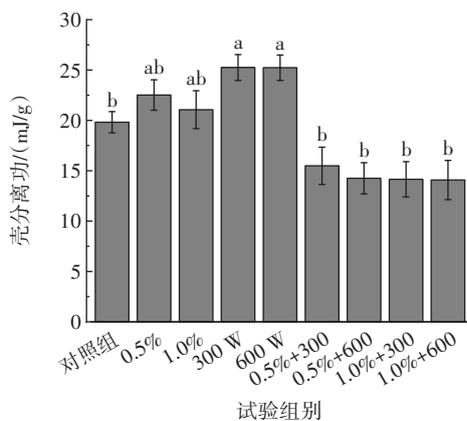
## 1.4 数据统计与处理

所有样品取样随机重复 3 次,试验除注明外均重复 3 次,采用 SPSS 软件对所有数据统计分析,数据以平均值±标准差表示, $p<0.05$  被认为具有显著差异,采用 Origin 2018 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理方式对小龙虾壳分离功的影响

小龙虾的外壳与虾仁之间通过结缔组织紧密连接,壳分离功的大小取决于剥离过程中外壳肌肉连接的松紧程度,壳分离功越小,意味着脱壳越容易。不同处理组的壳分离功如图 1 所示。



不同字母表示不同处理组差异显著( $p<0.05$ )。

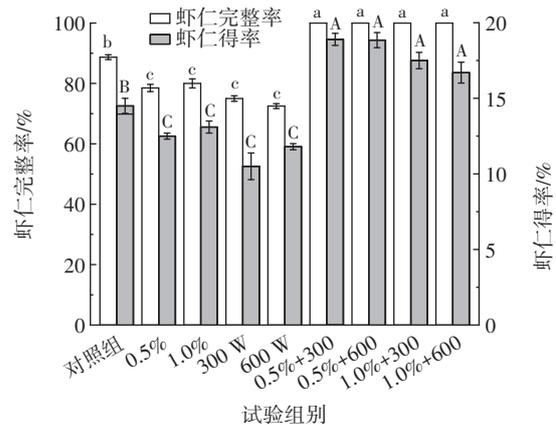
图 1 不同处理方式对小龙虾壳分离功的影响

Fig.1 Effects of different treatment methods on separation work of *Procambarus clarkii* shells

由图 1 可知,对照组的壳分离功低于单独的碱性蛋白酶处理组,而单独采用超声波处理的壳分离功最大,显著高于对照组。对照组由于采用了 4 min 的热烫工艺,显著降低了壳分离功,李高尚等<sup>[16]</sup>的研究结果也表明热烫可以提高脱壳效率,这也是目前工厂采用热烫法脱壳的主要原因。碱性蛋白酶虽然可以高效水解连接部位的胶原蛋白,但是试验结果表明无论是 0.5% 或者 0.1% 的浓度,效果都不理想,主要原因可能是因为小龙虾外壳坚硬致密,蛋白酶溶液不能充分与连接部位接触。0.5%+300 处理组相对于对照组,壳分离功降低了约 21.8%,说明碱性蛋白酶和超声波联合使用,具有良好的壳肉松动的效果。超声具有空化效应,产生大量的气泡冲击<sup>[17]</sup>,削弱了肌肉-壳的连接紧密程度,有利于碱性蛋白酶溶液发挥水解作用。但是 0.5%+600、1.0%+300、1.0%+600 处理组的壳分离功相对于 0.5%+300 处理组,并没有显著差异,说明 0.5%+300 处理组对于小龙虾壳肉连接部位的水解已接近上限。

### 2.2 不同处理方式对小龙虾虾仁完整率和虾仁得率的影响

不同处理方式对小龙虾虾仁完整率和虾仁得率的影响如图 2 所示。



同一指标不同字母表示不同处理组差异显著 ( $p<0.05$ )。

图 2 不同处理方式对小龙虾虾仁完整率和虾仁得率的影响

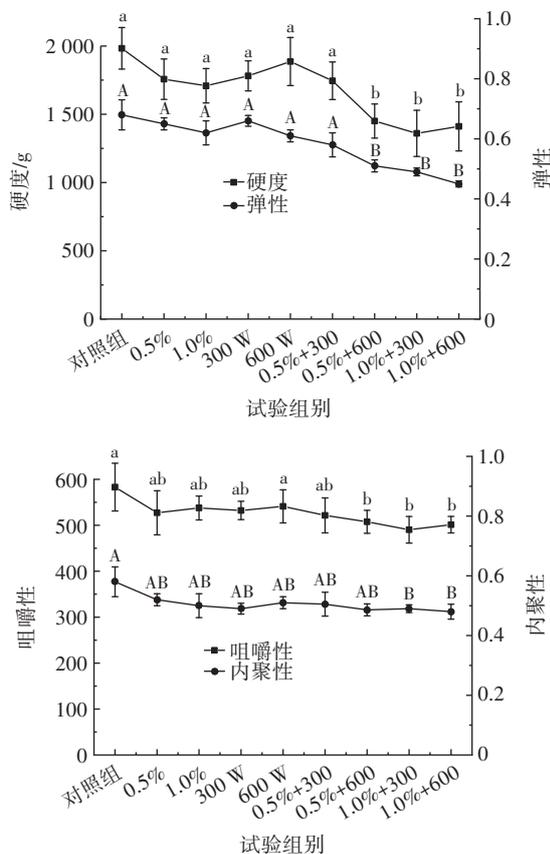
Fig.2 Effects of different treatment methods on shrimp completeness rate and yield of *Procambarus clarkii*

由图 2 可知,单独碱性蛋白酶处理组和超声波处理组的虾仁完整率低于对照组,说明延长热烫时间有利于虾仁与虾壳的脱离,但是对照组的虾仁完整率只有 89%,有部分虾仁的肌肉与外壳黏连、虾尾局部断裂,而碱性蛋白酶-超声波联合处理组虾仁完整率均达到了 100%,说明碱性蛋白酶-超声波协同作用有利于提高虾仁的完整率。对照组的虾仁得率高于单独酶处理组和超声处理组,0.5%+300 处理组相对于对照组则有显著提升,提高了约 31%。0.5%+300 处理组与其他 3 组联合处理组差异不显著,但是 1.0%+300、1.0%+600

处理组虾仁得率呈现出下降趋势,有可能是碱性蛋白酶的水解作用过度,破坏肌原纤维的结构,溶解了部分肌原纤维蛋白,导致虾仁得率降低<sup>[18]</sup>。

### 2.3 不同处理方式对小龙虾质构的影响

质构是评价虾仁品质的重要指标,不同处理方式的小龙虾虾仁质构如图3所示。



同一指标不同字母表示不同处理组差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图3 不同处理方式对小龙虾虾仁质构的影响

Fig.3 Effects of different treatment methods on shrimp texture of *Procambarus clarkii*

由图3可知,对照组相比其他处理组硬度、弹性、咀嚼性更大,因为对照组热烫时间较长,而热烫可以导致肌原纤维蛋白变性,进而导致虾仁硬度增大,同时弹性也有一定的增强,这与汪兰等<sup>[12]</sup>的研究结果一致,传统意义上认为硬度较高是虾仁的良好指标,但是在实际的感官评定中,加热过程中过高的硬度会导致口感粗糙<sup>[19]</sup>。0.5%与1.0%的碱性蛋白酶处理,导致硬度和弹性下降,原因是碱性蛋白酶降解部分结缔组织和肌原纤维蛋白,导致虾仁的结构变得松弛。高功率的超声波(600 W)也可以导致部分蛋白变性,结缔组织结构变得松散,一定程度上降低硬度和弹性。热处理同样可以提高咀嚼性和内聚性,主要原因是肌原纤维三、四级结构的破坏,空间结构的改变导致肌纤维密度改变<sup>[20]</sup>。0.5%+300处理组相对于对照组在硬度、弹

性、咀嚼性上略有降低,但是差异并不显著,而0.5%+600、1.0%+300、1.0%+600 3个处理组在质构上相对于对照组有明显变化。

### 2.4 不同处理方式对小龙虾虾仁色泽的影响

色泽是影响虾仁感官评定的重要指标,不同处理方式的小龙虾虾仁色泽变化如表1所示。

表1 超声波和酶处理对小龙虾虾仁色泽的影响

Table 1 Effect of ultrasound wave and enzyme treatment on color of *Procambarus clarkii* shrimp

试验组别	$L^*$ 值	$a^*$ 值	$b^*$ 值
对照组	68.72±1.59 <sup>a</sup>	5.77±0.38 <sup>a</sup>	9.25±0.22 <sup>a</sup>
0.5%	64.21±1.21 <sup>ab</sup>	2.21±0.16 <sup>c</sup>	7.37±0.67 <sup>ab</sup>
1.0%	60.05±1.58 <sup>ab</sup>	2.55±0.21 <sup>bc</sup>	6.91±0.12 <sup>b</sup>
300 W	65.58±2.18 <sup>a</sup>	2.06±0.13 <sup>c</sup>	6.76±0.33 <sup>b</sup>
600 W	65.21±2.33 <sup>ab</sup>	2.65±0.08 <sup>bc</sup>	6.52±0.70 <sup>b</sup>
0.5%+300	62.45±1.58 <sup>ab</sup>	2.49±0.16 <sup>bc</sup>	7.65±0.27 <sup>ab</sup>
0.5%+600	58.77±1.01 <sup>b</sup>	3.45±0.11 <sup>b</sup>	7.91±0.48 <sup>a</sup>
1.0%+300	52.38±1.34 <sup>c</sup>	3.14±0.17 <sup>b</sup>	8.21±0.39 <sup>a</sup>
1.0%+600	51.79±2.02 <sup>c</sup>	3.63±0.06 <sup>b</sup>	8.53±0.39 <sup>a</sup>

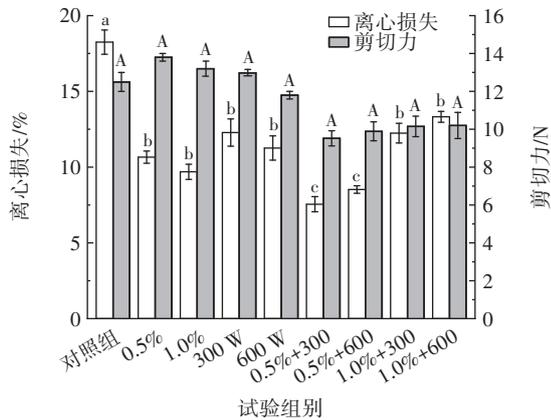
注:同列不同小写字母表示不同处理组差异显著 ( $p < 0.05$ )。

由表1可知,热烫对于虾仁的亮度 $L^*$ 值有一定的提升,其原因是热烫使肌原纤维蛋白与肌浆蛋白变性聚集,虾仁表面发生光散射,导致亮度增加<sup>[21]</sup>,而其他处理组 $L^*$ 值、 $a^*$ 值、 $b^*$ 值低于对照组。有研究表明加热使虾仁表面色泽变红,推测原因主要有两方面,一是虾仁肌肉中的血红素不稳定,与其结合的蛋白质受热变性解离,导致血红素的游离;二是蛋白质变性使虾仁中的虾青素游离,虾仁表面变红<sup>[22]</sup>,除对照组外,其他处理组虾仁亮度略低,但是保持了较低的红度和黄度。表1的结果表明单独超声波处理对虾仁色泽影响很小,研究表明超声对虾青素的提取有一定的促进效果<sup>[23]</sup>。超声-蛋白酶联合处理则对虾仁的亮度 $L^*$ 值影响较大,0.5%+300处理组虽然亮度低于对照组,差异并不显著, $a^*$ 值则显著低于对照组,因此0.5%+300处理组虾仁表面色泽综合评价优于对照组。

### 2.5 不同处理方式对小龙虾虾仁离心损失和嫩度的影响

离心损失和嫩度直接影响到虾仁的口感,是鲜度评价的重要指标,不同处理组的小龙虾虾仁持水力和嫩度如图4所示。

水产品的离心损失象征肌肉的持水力,与蛋白质的结构和性质密切相关<sup>[15]</sup>;嫩度则与虾仁组织的含水量密切相关,可以用剪切力来表示<sup>[24]</sup>。由图4可以看出,对照组的离心损失显著高于其他处理组,单独的酶处理和超声处理组之间的差异不大,超声处理组略高于酶处理组,说明虾仁受热之后蛋白变性,持水能力下



同一指标不同字母表示不同处理组差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图4 不同处理方式对小龙虾虾仁离心损失和嫩度的影响

Fig.4 Effects of different treatment methods on centrifugal loss and tenderness of *Procambarus clarkii* shrimp

降,品质劣化。碱性蛋白酶-超声波联合处理 0.5%+300 处理组离心损失最低,而 1.0%+600 处理组离心损失较 0.5%+300 处理组有显著的增加。不同处理组的剪切力变化与离心损失的变化趋势相近,说明持水能力与嫩度密切相关,0.5%+300 处理组与其他几组相比具有最高的嫩度,适度的蛋白水解和超声处理可以提高虾仁的持水力和嫩度,但是过度的水解和过高功率的超声处理则可能带来相反的作用。高功率超声处理引起虾仁嫩度下降及口感粗糙,其原因可能与肌原纤维蛋白的机械结构遭到破坏有关,这与唐福元等<sup>[25]</sup>的研究结果相一致。

#### 2.6 不同处理方式对小龙虾虾仁气味的影响

电子鼻的 10 个传感器分别对应不同的挥发性化合物,而这些代表性的化合物组成了虾仁的独特气味,经过对不同处理组的传感器数据进行 PCA 分析,结果如图 5 所示。

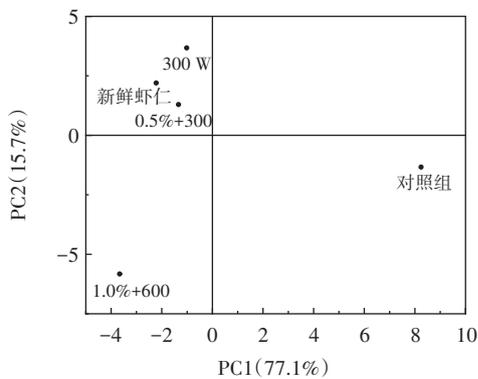


图5 不同处理方式对小龙虾虾仁气味的影响

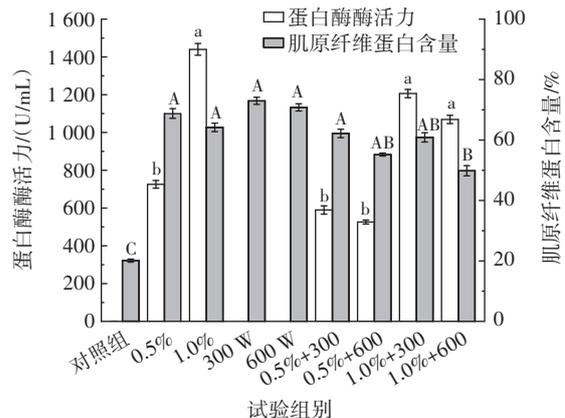
Fig.5 Effects of different treatment methods on smell of *Procambarus clarkii* shrimp

PCA 可以将多重数据降维,对样本的多个指标简

化为二维数据进行分析,一般 PC1 与 PC2 的和不低于 85%,即认为可以代表样品指标的主要信息<sup>[14]</sup>。由图 5 可知,PC1 与 PC2 的总贡献率为 92.8%,说明该分析结果具有代表性,能够表征新鲜虾仁、对照组、300 W、0.5%+300、1.0%+600 5 组样品的气味。图中每个处理组所处的位置以及不同组之间的距离可以代表其差异性。从图 5 可以看到,对照组与新鲜虾仁气味明显,主要是长时间的加热,挥发性物质损失较多,脂肪与蛋白氧化严重<sup>[26]</sup>,而 300 W 和 0.5%+300 处理组则与新鲜虾仁的气味较为接近,不过 1.0%+600 处理组与新鲜虾仁的差异相对明显,推测是肌肉蛋白质的过度降解,产生了游离氨基酸等风味物质,对虾仁的气味造成了影响。

#### 2.7 不同处理方式对小龙虾虾仁肌原纤维蛋白含量及蛋白酶酶活力的影响

肌原纤维蛋白是小龙虾虾仁的重要营养成分,加热、超声波以及蛋白酶都可能影响肌原纤维的结构,引起肌原纤维蛋白的变性和降解。不同处理方式对小龙虾虾仁肌原纤维蛋白含量及蛋白酶酶活力的影响如图 6 所示。



同一指标不同字母表示不同处理组差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图6 不同处理方式对小龙虾虾仁肌原纤维蛋白含量及蛋白酶酶活力的影响

Fig.6 Effects of different treatment methods on myofibrillar content and protease enzyme activity of *Procambarus clarkii* shrimp

由图 6 可知,对照组的肌原纤维蛋白含量显著低于其他处理组,说明 4 min 的热处理对肌原纤维蛋白造成了严重破坏,虾仁的营养品质下降严重。单独的碱性蛋白酶处理或者超声波处理,则对肌原纤维蛋白含量影响不大,但是由于碱性蛋白酶-超声波联合处理能够促进肌原纤维蛋白的降解,肌原纤维蛋白含量低于单独的碱性蛋白酶或者超声波处理组,不过 0.5%+300 组与单独超声波和碱性蛋白酶处理组差异不显著,而 1.0%+600 处理组的肌原纤维蛋白含量则显著降低,原因是蛋白质的过度水解,综上所述,采用 1 min

热烫能够有效保留虾仁的肌原纤维蛋白。高浓度的蛋白酶结合高强度的超声波处理对肌原纤维、线粒体等造成破坏<sup>[27]</sup>,有可能造成肌原纤维蛋白的进一步降解而造成营养损失。

为了探索碱性蛋白酶-超声波联合处理促进脱壳的机理,对所有处理组的蛋白酶活力进行检测。超声对蛋白酶存在两种效应:促进酶活或者导致酶结构改变而失活。由图6可知,超声没有提高碱性蛋白酶的活力,反而使酶活性有了一定程度的下降,特别是1.0%+600处理组相对于1.0%+300处理组,酶活力下降了约12%。另外,对照组和单独超声处理未发现蛋白酶活性,说明超声和加热均不会诱导内源性蛋白酶的活性。因此,超声-蛋白酶促进小龙虾的壳肉分离,其主要原因应该是超声首先导致外壳与肌肉产生缝隙,使碱性蛋白酶与壳肉连接组织充分接触,促进了连接组织蛋白质的降解。

### 3 结论

相对于现行传统处理方式,在减少热烫时间的同时,采用碱性蛋白酶和超声波联合处理,能有效降低壳分离功,提高虾仁的完整率和得率,保留较高的肌原纤维蛋白含量,并改善虾仁的嫩度和表面色泽,而过高的酶浓度和超声功率则会造成营养流失和质构劣变。因此,克氏原螯虾热烫1 min后采用0.5%碱性蛋白酶和300 W超声波联合处理,可提高虾仁品质,降低壳肉分离的难度,为克氏原螯虾的加工工艺优化提供理论依据和技术支持。

### 参考文献:

- [1] 周迪. 湖北:推动小龙虾产业链向2000亿元奋进[N]. 中国财经报, 2022-02-24(008).  
ZHOU Di. Hubei: Promote the crayfish industry chain to 200 billion yuan[N]. China Financial News, 2022-02-24 (008).
- [2] 张恒, 陈莉莉. 成本增,效益减!湖北小龙虾养殖出现新变化!饲料、动保厂家的机会来了[J]. 当代水产, 2022, 47(8): 31-32.  
ZHANG Heng, CHEN Lili. Cost increases, benefit decreases! There are new changes in crayfish culture in Hubei! Here comes the opportunity for feed and animal protection manufacturers[J]. Current Fisheries, 2022, 47(8): 31-32.
- [3] 吴电建, 张三强, 杨光友. 克氏原螯虾头尾自动定向装置参数优化及试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 44-52.  
WU Dianjian, ZHANG Sanqiang, YANG Guangyou. Parameter optimization and experiment for the automatic head and tail orientation device of *Procambarus clarkii*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9): 44-52.
- [4] DANG T T, GRINGER N, JESSEN F, et al. Emerging and potential technologies for facilitating shrimp peeling: A review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 45: 228-240.
- [5] DANG T T, GRINGER N, JESSEN F, et al. Enzyme-assisted peeling of cold water shrimps (*Pandalus borealis*) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 127-135.
- [6] 何凤云. 耐高温碱性蛋白酶生产菌20101的选育及酶学性质研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012.  
HE Fengyun. Selection and breeding of a thermostable strain 20101 producing alkaline protease and protease properties[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012.
- [7] 刘璐. 酶解罗非鱼皮胶原蛋白制备抗冻多肽及其活性改良的初步研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019.  
LIU Lu. Preparation of antifreeze peptides from tilapia skin collagen by enzymatic hydrolysis and preliminary study on their activity improvement[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019.
- [8] ASHOKKUMAR M. The characterization of acoustic cavitation bubbles - An overview[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4): 864-872.
- [9] 王丽娟, 姜鹏, 邹明明, 等. 功率超声对番茄去皮的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(2): 185-191.  
WANG Lijuan, JIANG Peng, ZOU Mingming, et al. The effect of power ultrasound on tomato peeling[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(2): 185-191.
- [10] GAQUERE-PARKER A, TAYLOR T, HUTSON R, et al. Low frequency ultrasonic-assisted hydrolysis of starch in the presence of  $\alpha$ -amylase[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 41: 404-409.
- [11] 杨肖杰. 预处理剥壳对南美白虾品质的影响及剥壳机理探究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.  
YANG Xiaojie. The effect of pretreatment assisted peeling on the quality of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and the mechanism of peeling[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [12] 汪兰, 何建军, 贾喜午, 等. 超高压处理对小龙虾脱壳及虾仁性质影响的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(14): 138-141, 147.  
WANG Lan, HE Jianjun, JIA Xiwu, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on shucking and meat properties of red swamp crayfish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(14): 138-141, 147.
- [13] 陈佳奇, 刘天毅, 贾逾泽, 等. 水煮鱼微波烹任过程中鱼肉水分及组织变化对嫩度的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 51-55.  
CHEN Jiaqi, LIU Tianyi, JIA Yuze, et al. Effects of moisture and tissue changes on tenderness of boiled fish during microwave cooking[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 51-55.
- [14] 沙小梅, 蒋文丽, 李鑫, 等. 不同烹饪方式小龙虾的风味特征分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(13): 288-296.  
SHA Xiaomei, JIANG Wenli, LI Xin, et al. Analysis of flavor characteristics of *Procambarus clarkia* in different cooking methods[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(13): 288-296.
- [15] 张喜才. 石斑鱼冷藏过程中品质评价、蛋白变化以及内源性蛋白酶作用机制研究[D]. 上海海洋大学, 2020.  
ZHANG Xikai. Study on quality evaluation, protein changes and mechanism of endogenous protease of grouper (*Epinephelus coioides*) during refrigerated storage[D]. Shanghai Ocean University, 2020.
- [16] 李高尚, 陈燕婷, 宣仕芬, 等. 不同处理方式对虾脱壳效率及肌肉品质的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(8): 1551-1558.  
LI Gaoshang, CHEN Yanting, XUAN Shifen, et al. Effect of different treatments on the shelling efficiency and muscle quality of *Oratosquilla oratoria*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(8): 1551-1558.
- [17] MEROUANI S, HAMD AOUI O, REZGUI Y, et al. Effects of ultrasound frequency and acoustic amplitude on the size of sonochemically active bubbles - Theoretical study[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(3): 815-819.
- [18] 刘瑞, 李睿智, 王崑, 等. 碱性蛋白酶降解鲢鱼肌原纤维蛋白的组学分析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(3): 43-52.  
LIU Rui, LI Ruizhi, WANG Wei, et al. Proteomics analysis of myofibrillar proteins of silver carp in degraded by alcalase[J]. Journal

- of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(3): 43-52.
- [19] 李凤舞, 许学勤, 单继航. 无磷保水剂对预调理冷冻虾仁持水品质的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(6): 342-345.  
LI Fengwu, XU Xueqin, SHAN Jihang. Effect of phosphorus-free water retaining agent on quality of water retention of pre-conditioning frozen shrimp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(6): 342-345.
- [20] 董志俭, 王庆军, 黄静雅, 等. 南美白对虾蒸煮过程中水分状态及质构的变化[J]. 中国食品学报, 2015, 15(2): 231-236.  
DONG Zhijian, WANG Qingjun, HUANG Jingya, et al. Change of moisture status and texture for shrimp(*Penaeus vannamei*) during steaming[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(2): 231-236.
- [21] 黄万有, 刘书成, 吉宏武, 等. 超高压处理条件下的虾仁品质变化动力学[J]. 食品工业科技, 2013, 34(22): 100-105, 115.  
HUANG Wanyou, LIU Shucheng, JI Hongwu, et al. Kinetics of quality change of peeled shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by ultrahigh pressure[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(22): 100-105, 115.
- [22] 张旭, 冉景丞, 杨卫诚, 等. 贵州草海小龙虾青素提取条件及含量测定[J]. 河北渔业, 2019(4): 14-18.  
ZHANG Xu, RAN Jingcheng, YANG Weicheng, et al. Extraction conditions and content determination of astaxanthin from crayfish in Lake Caohai, Guizhou Province[J]. Hebei Fisheries, 2019(4): 14-18.
- [23] ZHANG H, TANG B K, ROW K H. A green deep eutectic solvent-based ultrasound - assisted method to extract astaxanthin from shrimp byproducts[J]. Analytical Letters, 2014, 47(5): 742-749.
- [24] 徐言, 陈季旺, 楚天奇, 等. 盐煮工艺对即食小龙虾品质的影响[J]. 武汉轻工大学学报, 2020, 39(5): 1-8.  
XU Yan, CHEN Jiwang, CHU Tianqi, et al. Effect of salt-boiling process on quality attributes of ready-to-eat crayfish[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2020, 39(5): 1-8.
- [25] 唐福元, 刘晓庚, 毛匡奇, 等. 超声辅助无花果叶蛋白酶复合嫩化剂对猪脯肉嫩度的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(12): 204-210.  
TANG Fuyuan, LIU Xiaogeng, MAO Kuangqi, et al. Optimization of pork tenderization using ultrasound treatment combined with tenderizer combination[J]. Food Science, 2017, 38(12): 204-210.
- [26] 顾赛麒, 戴王力, 鲍嵘斌, 等. 煮制工艺对中国对虾品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 276-283.  
GU Saiqi, DAI Wangli, BAO Rongbin, et al. Effect of cooking on the quality of *fenneropenaeus chinensis*[J]. Food Science, 2020, 41(2): 276-283.
- [27] 张坤, 邹焯, 王道营, 等. 肉品嫩化方法及超声波技术应用于肉品嫩化的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 33-37.  
ZHANG Kun, ZOU Ye, WANG Daoying, et al. Research progress of meat tenderization method and ultrasonic technology applied to meat tenderization[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(2): 33-37.

加工编辑: 张岩蔚  
收稿日期: 2023-01-05