DOI:10.12441/spyswjs.20230919004 [文章编号] 1673-1689(2024)08-0119-09

# 熟化工艺对脊尾白虾品质的影响

焦婷婷[1] 姜启兴[1*] 常诗洁[2] 于沛沛[1] 余达威[1] 高 沛[1]

(1. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122; 2. 江苏省沿海农业发展有限公司,江苏 南京 210004)

**摘要:**为了优化脊尾白虾(*Exopalaemon carinicauda*,*E. carinicauda*)的熟化工艺,避免不合适的熟化工艺带来的产品品质劣变与能源浪费,探究了85、90、95 ℃水煮处理和蒸汽蒸制的熟化工艺对脊尾白虾品质的影响。在测定传热曲线的基础上,以菌落总数、多酚氧化酶(polyphenol oxidase,PPO)相对酶活力、蒸煮损失率、持水力、粗蛋白质质量分数、质构特性和色泽为指标,进行综合评价。结果表明:蒸制处理1 min时PPO已基本失活,菌落总数降至可食用标准内;与相同时间下其他处理组相比,该组的蛋白质质量分数更高,弹性、内聚性和咀嚼性更好,色泽更红;但其持水力更低,水分损失更多,如果是虾熟化后继续加工成虾干制品,则干燥前较低的水分质量分数有利于干燥环节的进行。综上,蒸汽蒸制1 min是脊尾白虾的最适熟化工艺。

**关键词:**脊尾白虾;熟化;水煮;蒸制;品质

## Effect of Different Thermal Process on the Quality of *Exopalaemon carinicauda*

*JIAO Tingting*[1] *JIANG Qixing*[1*] *CHANG Shijie*[2] *YU Peipei*[1] *YU Dawei*[1] *GAO Pei*[1]

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Yanhai Agriculture Development Co., Ltd., Nanjing 210004, China)

**Abstract:** In order to improve the thermal process of *Exopalaemon carinicauda* (*E. carinicauda*) and avoid the degradation of product quality and energy waste caused by inappropriate thermal process, the author investigated the influence of boiling treatment at 85, 90, 95 ℃ and steam cooking on the quality of *E. carinicauda*. On the basis of the determination of heat transfer curve, a comprehensive evaluation was conducted using the following indicators: total bacterial count, relative enzyme activity of polyphenol oxidase (PPO), cooking loss rate, water-holding capacity, crude protein mass fraction, texture characteristic and color. The results showed that steam cooking for 1 min can effectively inactivate PPO, reduce the total bacterial count to the edible safety standard. Compared with the other groups under the same time, this group showed higher protein mass fraction, greater elasticity, cohesiveness and chewiness, as well as a more intense red color. However, it exhibited lower water-holding capacity, resulting in greater moisture loss. If the shrimp is further processed into dried shrimp products, the lower moisture mass fraction prior to drying would facilitate the drying process. In conclusion, steam cooking for 1 min is an optimal thermal process for *E. carinicauda*.

**Keywords:** *Exopalaemon carinicauda*; thermal process; boiling; steam cooking; quality

脊尾白虾是我国特有的中小型经济虾类[1-2],也是国内滩涂沿海养殖区域重要的水产养殖虾类[3],主要分布于黄渤海海域。据不完全统计,至2020年全国的脊尾白虾养殖面积已超过4万$hm^2$,其中江苏省养殖面积最大,约占全国的80%[4]。脊尾白虾滑嫩味美、营养丰富,经济价值较高,市场前景广阔,但目前有关该品种的开发利用研究较少。

新鲜虾易受到其体表丰富的微生物、活跃的内源酶及外界环境等因素的影响而发生劣变,造成经济损失与环境污染。因此,人们常常在捕捞

**基金项目:**黄渤海滩涂生态农牧化与三产融合模式示范项目(2020YFD0900704)。

**通信作者:**姜启兴(1977—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事食品加工与保藏方面的研究。E-mail:qixingj@163.com

**收稿日期:**2023-09-19 **修回日期:**2023-11-20

后立即进行热处理，然后进行冷冻、腌制或干制等处理以生产货架期较长的产品，便于长途运输和贸易。由此可见，熟化工艺对虾类产品的生产至关重要。熟化处理可以灭酶、灭菌、防止产品腐败变质，赋予产品独特的色泽和风味[5]，同时使营养物质利于人体吸收，但过度加热会导致感官品质变差，同时加速营养物质如油脂、虾青素、水溶性蛋白质等的氧化，降低产品营养价值。蒸制和水煮是常用的熟化方式，目前关于水煮操作的研究主要集中于沸水处理，但工厂实际操作中水温较高会带来能源浪费。从结合工厂实际操作和节约能源的角度出发，选择水煮温度85、90、95 ℃进行研究，以期对工业生产有实际指导意义。

作者在测定传热曲线的基础上，以菌落总数、PPO相对酶活力、蒸煮损失率、持水力、粗蛋白质质量分数、质构和色泽为指标，综合评价不同熟化工艺对脊尾白虾品质的影响，确定合适的熟化工艺，为脊尾白虾的进一步开发利用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

脊尾白虾：购于无锡老菜农超市，鲜活，体长4~5 cm，质量（2.0±0.5）g，捕获于6~9月。

平板计数琼脂培养基：青岛海博生物技术有限公司；三氯乙酸、邻苯二酚、磷酸二氢钾、磷酸氢二钠、氢氧化钠等：分析纯，国药化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

热电偶温度计：TA612C型，苏州特安斯电子有限公司；紫外可见分光光度计：UV1800型，上海天美科学仪器有限公司；自动凯氏定氮仪：K9840型，山东海能科学仪器有限公司；物性分析仪：TA-XT2i型，英国Stable Micro System公司；高品质电脑色差仪：NR110型，深圳三恩时（3nh）公司；高速冷冻离心机：4K-15型，德国Sigma公司；恒温水浴锅：ZBRTD-211型，上海力辰邦西仪器科技有限公司；高速均质乳化机：RCD-1A型，常州越新仪器制造有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 样品处理

鲜活脊尾白虾置于冰水浴中致死，用自来水冲洗干净，挑选体型完整、无黑变、大小均一的虾随机分为3组：对照组：生虾；水煮处理组：水与样品的体积质量比为15 L∶1 kg，待水温分别达到目标温度85、90、95 ℃后，将虾加入并开始计时；蒸汽蒸制组：待蒸锅产生稳定蒸汽后，将虾放入蒸笼中单层铺开并开始计时。各组分别处理不同的时间后取样并迅速置于冰水浴中冷却至室温，吸干虾体表面水分，进行各项指标测定。

#### 1.3.2 传热曲线测定

将热电偶温度计探头从脊尾白虾第一二腹节连接处插入虾的背部中心位置，测定不同熟化过程中的温度变化，前30 s每隔5 s记录样品中心温度，之后每隔10 s记录1次。

#### 1.3.3 PPO相对酶活力测定

参照文献[6]的方法并稍加修改，将带壳的整虾绞碎，称取10 g绞碎后的虾肉并加入25 mL、4 ℃的磷酸盐缓冲液（0.02 mol/L，pH 7.0），10 000 r/min均质30 s后，磁力搅拌30 min得到混合液，提取过程全部在冰浴下进行，混合液于4 ℃、10 000 *g*离心20 min，得到上清液为PPO粗酶液。

以邻苯二酚溶液（浓度0.02 mol/L、pH 7.0的磷酸盐缓冲液配制）作为酶的底物，2.8 mL底物溶液与0.2 mL的PPO粗酶液在30 ℃下反应，于420 nm处测定吸光度，空白组加入0.2 mL的磷酸盐缓冲液。底物与酶液混合开始计时，每30 s记录1次吸光度，以4 min内最初直线段的斜率计算酶活力[7]，重复测定3次取平均值。用公式（1）计算PPO相对酶活力。

$$R_1=K/K_0\times 100\% \quad (1)$$

式中：

$R_1$——相对酶活力，%；

$K$——不同熟化处理后虾中PPO的酶活力；

$K_0$——新鲜虾中PPO的酶活力。

#### 1.3.4 菌落总数测定

取带壳的整虾于超净工作台内剪碎并进行测定，参照GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》，采用琼脂培养基平板计数法测定。

#### 1.3.5 蒸煮损失率测定

蒸煮前后用厨房纸吸干样品表面水分，精确称质量并记录数据。用公式（2）计算蒸煮损失率。

$$R_2=(M-m)/M\times 100\% \quad (2)$$

式中：

$R_2$——蒸煮损失率，%；

$M$——样品处理前的质量，g；

$m$——样品处理后的质量，g。

1.3.6 水分质量分数测定

将去头、去壳的虾肉打碎，参照GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测定水分质量分数。

1.3.7 持水力测定

去头、去壳得到虾肉并剪成肉块，参照于丽霞[8]的方法，取2 g虾肉块，双层滤纸包裹置于离心管中，于4 ℃、5 000 *g*离心10 min，记录离心前后肉块的精确质量，重复测定3次取平均值。用公式（3）计算持水力。

$$R_3=m_1/m_2\times 100\% \quad (3)$$

式中：

$R_3$——持水力，%；

$m_1$——样品离心后质量，g；

$m_2$——样品离心前质量，g。

1.3.8 蛋白质质量分数测定

虾去头、去壳得到虾肉并打碎，取打碎后的虾肉进行测定。参照GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法进行测定。

1.3.9 质构测定

采用物性分析仪对带壳整虾样品的第一、二侧腹节进行二次压缩和质地剖面分析（texture profile analysis，TPA）测试，并利用其分析软件获得样品的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性结果。探头型号为平底柱形探头P/0.5R。设定参数为：测前速率2 mm/s；测试速率3 mm/s；测后速率5 mm/s；压缩比例50%。每组样品测定8个平行，去除最大值、最小值后计算平均值。

1.3.10 色泽测定

采用高品质电脑色差仪对带壳整虾样品的第一、二侧腹节进行测定，得到样品的$L^*$、$a^*$、$b^*$。其中$L^*$为亮度值，值越大代表样品越亮；$a^*$为红度值，$a^*$为正值且越大代表样品越红；$b^*$为黄度值，$b^*$为正值且越大代表样品越黄。每组样品测定8个平行，去除最大值、最小值后计算平均值。

1.3.11 数据处理方法

使用Origin 2018.0绘图，试验结果表示为平均值±标准偏差，通过SPSS 25.0对数据进行单因素方差分析（ANOVA），采用Duncan进行显著性分析，$P<0.05$表示差异显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同熟化条件下脊尾白虾的传热曲线

传热曲线能反映热处理时样品的升温速率[9]。由图1可知，不同熟化处理下脊尾白虾的中心温度变化趋势基本一致，呈倒L型，在前30 s内上升较快，后期则逐渐平缓并趋于稳定。在相同的处理时间下，温度越高，虾的传热速率越快。根据相关规范[10]，中心温度达到70 ℃为食品熟制的标准，对于85、90、95 ℃水煮处理组与蒸制处理组的样品，中心温度达到70 ℃时分别用时约31、23、17、14 s，达到85、90、95、100 ℃时分别用时约110、100、80、60 s。工业生产中可根据传热曲线确定合理的熟化参数，实现对产品稳定性与安全性的精准控制，避免过度热处理引起的品质劣变。

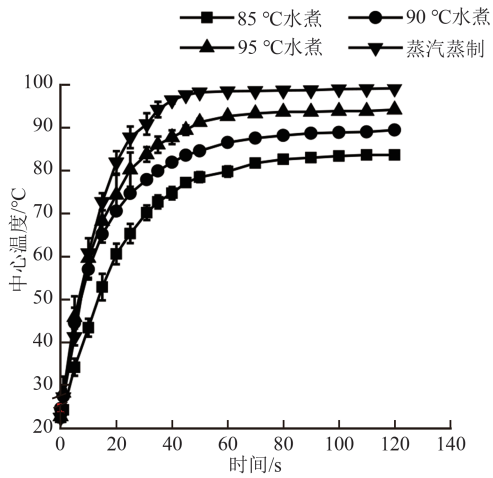
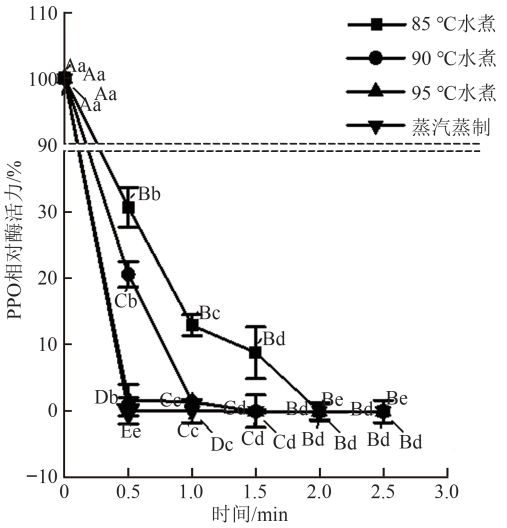



图1 不同熟化条件下脊尾白虾的传热曲线

Fig. 1 Heat transfer curves of *E. carinicauda* with different thermal processes

### 2.2 熟化条件对脊尾白虾PPO相对酶活力的影响

PPO酶系的高活性会导致虾类在贮藏和加工过程中发生酶促褐变反应（黑变），进而影响产品的市场价值，而热处理可快速钝化PPO酶活力，抑制虾体黑变。由图2可知，热处理后虾中的PPO相对酶活力显著降低。90、95 ℃水煮处理和蒸汽蒸制1 min时PPO已基本失活，其中蒸汽蒸制组的相对酶活力最低。说明热处理对PPO具有较好的灭酶效果，且蒸汽蒸制1 min时已可达到灭酶要求。




小写字母a~e表示同种熟化工艺下不同时间之间存在显著差异（$P$<0.05）；大写字母A~E表示相同处理时间下不同熟化工艺之间存在显著差异（$P$<0.05）。

图2 不同熟化条件下脊尾白虾PPO相对酶活力的测定结果

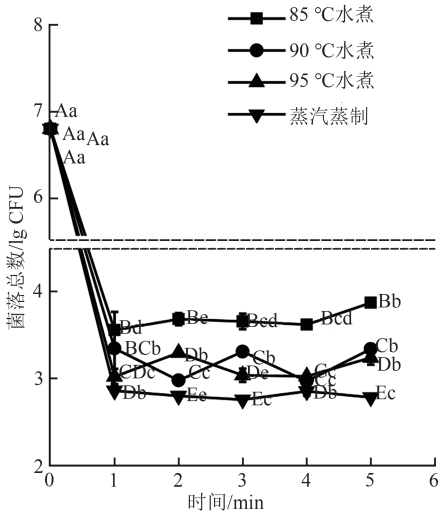
Fig. 2 Results of relative activity of PPO in *E. carinicauda* with different thermal processes

试验中蒸制处理的灭酶效果显著优于3种温度的水煮处理，这可能是由于蒸制处理组传热速率更快、最终温度更高所导致的。Williams等[11]评定了热处理对西部岩龙虾血淋巴中PPO活性的影响，结果显示PPO失活率与温度呈正相关，与本研究结果一致。结合传热曲线的测定结果，3种温度水煮与蒸汽蒸制分别处理1 min时，样品的中心温度分别为79.7、86.5、92.6、98.4 ℃，这与该部分测定的1 min时各组的PPO相对酶活力结果基本对应。由此可见，蒸汽蒸制1 min可使PPO失活，是抑制虾体黑变的有效措施。

### 2.3 熟化条件对脊尾白虾菌落总数的影响

菌落总数结果见图3，熟化处理对虾体的灭菌效果显著。相同的熟化时间下，蒸汽蒸制组的菌落总数显著低于各水煮处理组，各组处理1 min时，菌落总数均急剧下降，为4 lg CFU以下，低于国家标准中要求的最高微生物标准（5 lg CFU），其中蒸汽蒸制组的菌落总数最低，各处理组的菌落总数在1~5 min时虽略有波动但逐渐趋于平缓。可见，蒸汽蒸制1 min时具有较好的灭菌效果。

结合传热曲线测定结果，各组处理1 min时菌落总数已较低，这是因为此时的中心温度对于大部分微生物已具有致死作用，1 min后样品的菌落




小写字母a~e表示同种熟化工艺下不同时间之间存在显著差异（$P$<0.05）；大写字母A~E表示相同处理时间下不同熟化工艺之间存在显著差异（$P$<0.05）。

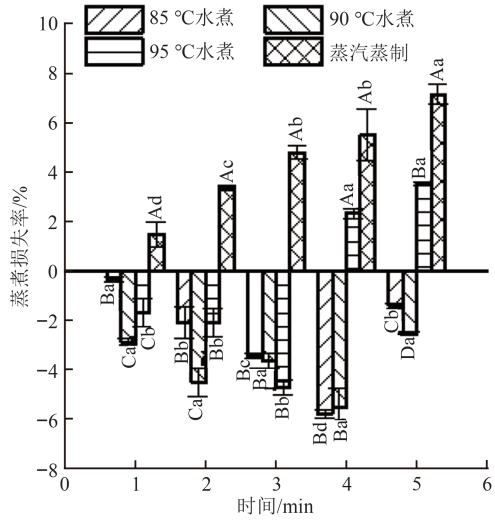
图3 不同熟化条件下脊尾白虾菌落总数的测定结果

Fig. 3 Results of total bacterial count in *E. carinicauda* with different thermal processes

总数虽略有波动但也逐渐趋于平缓，轻微波动的原因可能是个体样本之间的差异，趋于平缓的原因可能是部分耐热微生物的存在。

### 2.4 熟化条件对脊尾白虾蒸煮损失率的影响

蒸煮损失率是反映样品持水力变化的重要指标[12]。熟化处理对虾蒸煮损失率的影响见图4。




小写字母a~e表示同种熟化工艺下不同时间之间存在显著差异（$P$<0.05）；大写字母A~E表示相同处理时间下不同熟化工艺之间存在显著差异（$P$<0.05）。

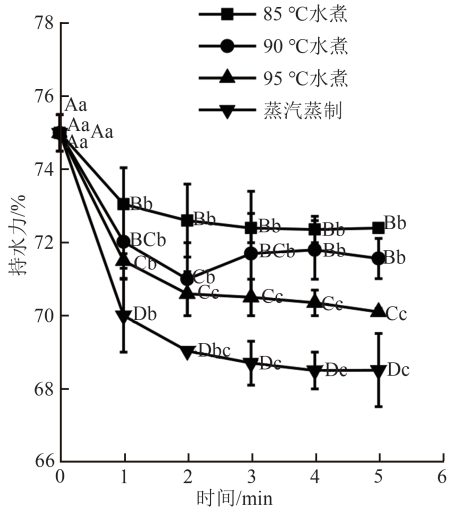
图4 不同熟化条件下脊尾白虾的蒸煮损失率变化

Fig. 4 Changes in cooking loss rate in *E. carinicauda* with different thermal processes

85、90 ℃水煮处理1~5 min时并未出现蒸煮损失，反而有增重的现象，95 ℃水煮处理1~3 min时虾体增重，4~5 min时出现质量损失，蒸汽蒸制组的蒸煮损失率则随处理时间的延长逐渐增大。试验中出现的虾体增重现象可能是由于试验所用原料为整虾，煮制过程中水分进入虾壳与虾头而引起增重。员冬玲等[13]、刘书成等[14]的试验中也有热处理后虾增重的情况。如果样品后续进行干制加工，则蒸汽蒸制是一种较优的熟化方式，利于保持样品较低的水分质量分数，进而减少干燥时间，节约成本。

### 2.5　熟化条件对脊尾白虾水分质量分数和持水力的影响

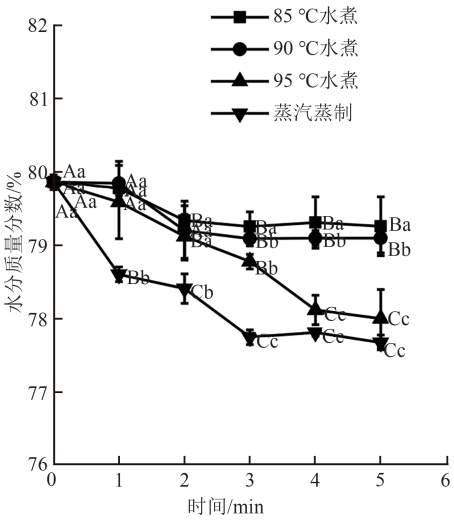
持水力可反映蛋白质的变性程度。热处理后，蛋白质发生变性凝结，离子基团水合及氢键还原作用减弱[15]，导致其结合水的能力降低。同时，肌凝蛋白和肌动蛋白的变性导致肌肉结构发生改变，肌纤维收缩，部分肌浆液被排出。此外，蛋白质网络中容纳水的可用空间减少，从而导致虾肉的持水力下降，水分质量分数降低[16]。不同熟化条件下脊尾白虾的持水力和水分质量分数变化见图5~6。随着时间的延长，持水力与水分质量分数的变化趋势基本一致，先快速下降后逐渐趋于平缓。相同的熟化时间下，水煮处理组温度越高，持水力和水分质量分数越低，蒸汽蒸制组的持水力和水分质量分数低于水煮处理组。水分质量分数与持水力的变化趋势与顾赛麒等[16]的研究基本一致，可能是由于在熟化处理前期，蛋白质的三级结构发生破坏，此时失去的水主要为自由水，随着熟化时间的延长，蛋白质二级结构展开，部分结合水被释放但这部分水占比较小，所以呈现此变化趋势。甘晓玲等[17]探究了热处理对虾仁蛋白质及其交联作用的影响，表明热处理下蛋白质会发生交联反应，这种反应与分子之间非共价键的形成有关，且交联程度随着温度的升高而加剧。




小写字母a~e表示同种熟化工艺下不同时间之间存在显著差异（$P<0.05$）；大写字母A~E表示相同处理时间下不同熟化工艺之间存在显著差异（$P<0.05$）。

图5　不同熟化条件下脊尾白虾的持水力

Fig. 5　Changes in water-holding capacity in *E. carinicauda* with different thermal processes




小写字母a~e表示同种熟化工艺下不同时间之间存在显著差异（$P<0.05$）；大写字母A~E表示相同处理时间下不同熟化工艺之间存在显著差异（$P<0.05$）。

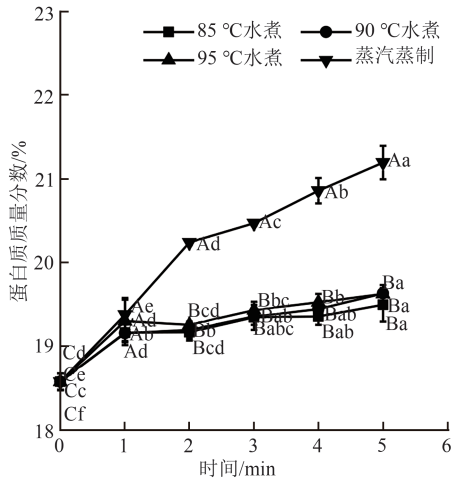
图6　不同熟化条件下脊尾白虾的水分质量分数

Fig. 6　Changes in moisture mass fraction in *E. carinicauda* with different thermal processes

### 2.6　熟化条件对脊尾白虾蛋白质质量分数的影响

蛋白质质量分数是评价肉类营养品质的重要指标[18]。由图7可知，生虾的蛋白质质量分数为（18.58±0.18）%，熟化处理后，各组的蛋白质质量分数都显著增加，且随着熟化时间的延长，各组的蛋白质质量分数均呈上升趋势，水煮处理组前期蛋白质质量分数在0~1 min时迅速上升，在1~5 min时缓慢上升但不显著，蒸制处理组显著上升。相同的熟化时间下，水煮处理温度越高，蛋白质质量分数越高，蒸汽蒸制组的蛋白质质量分数显著高于水煮处理组。

熟化处理后蛋白质质量分数上升的原因可能为加热处理使蛋白质非共价键断裂，构象改变，发




小写字母a~e表示同种熟化工艺下不同时间之间存在显著差异（$P$<0.05）；大写字母A~E表示相同处理时间下不同熟化工艺之间存在显著差异（$P$<0.05）。

图7 不同熟化条件下脊尾白虾的蛋白质质量分数变化

Fig. 7 Changes in protein mass fraction of *E. carinicauda* with different thermal processes

生凝聚变性，同时肌纤维受热收缩断裂、肌膜破裂、汁液流失，导致蛋白质质量分数相对增加。随熟化时间的延长，水分损失逐渐明显，蛋白质质量分数持续增加。蒸汽蒸制组的粗蛋白质质量分数显著高于水煮处理组，这是由于蒸制处理组的水分损失更严重（见图4）。韦婕好[19]在探究热加工方式对羊肉制品粗蛋白质质量分数的试验中也发现随着中心温度的升高，肉样中粗蛋白质质量分数总体呈增加趋势。由此可见，蒸汽蒸制的熟化方式可保持更高的蛋白质质量分数。

### 2.7 熟化条件对脊尾白虾质构的影响

质构特性是评价产品品质的重要指标[13]。硬度大的产品维持形态的能力较好，咀嚼性也相对较高；弹性大的产品肉质弹牙爽口[20]；内聚性适当的产品不易破碎，吞咽体验较好。

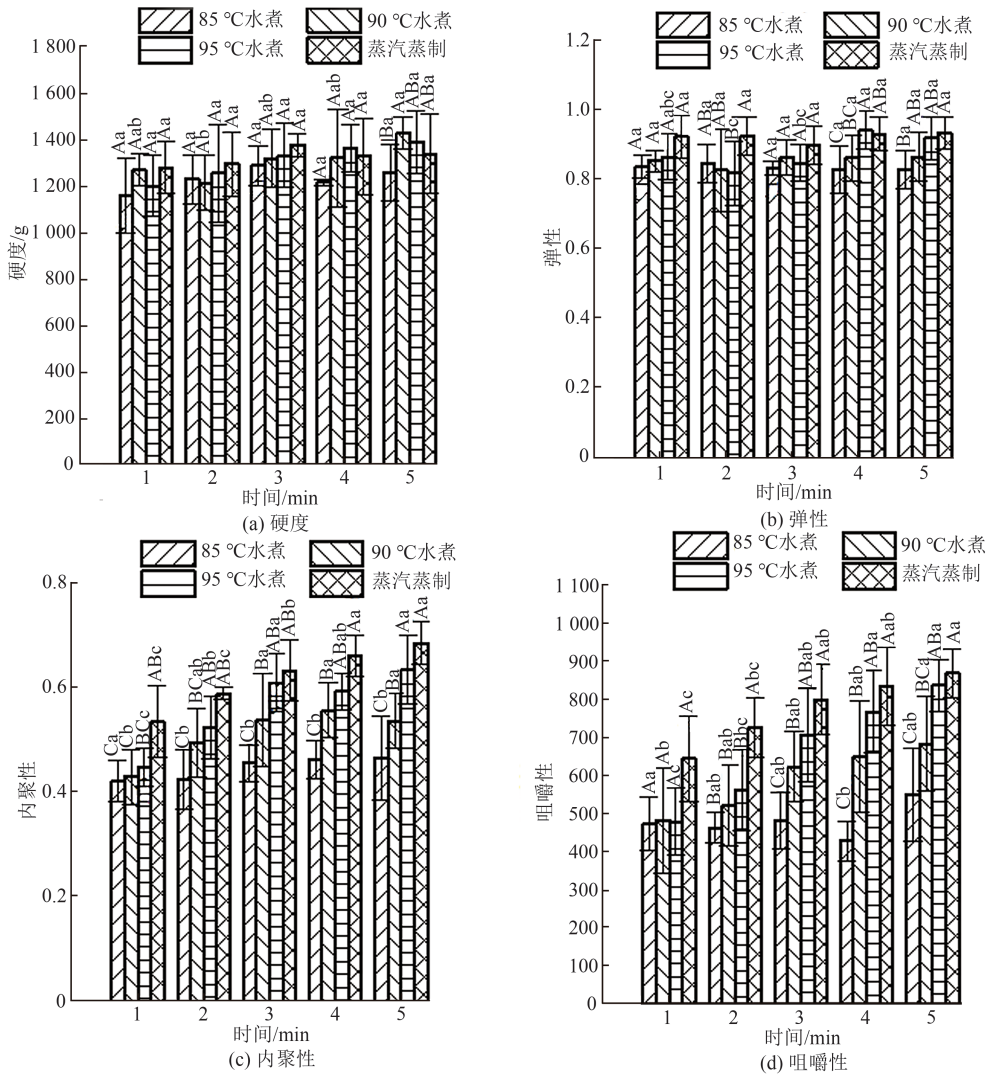
熟化条件对脊尾白虾质构特性的影响见图8。不同熟化方式处理后，各组的硬度略有增加但基本不显著，水煮处理组的弹性降低，蒸汽蒸制组的弹性升高，但基本无显著性差异，内聚性和咀嚼性都显著增加。随熟化时间的延长，各处理组的硬度、内聚性、咀嚼性逐渐升高，但硬度、弹性变化不显著。在相同的熟化时间下，不同熟化方式组的硬度基本无显著性差异，蒸汽蒸制组的内聚性和咀嚼性基本都高于各水煮处理组，同时弹性较高。

熟虾质构特性的差异由内部和外界因素共同决定，虾个体的差异、熟化方式（水煮、蒸制）的传热介质、传热速率和温度的差异都造成了熟虾质构特性的不同[21]。同时，蛋白质的变化是造成其硬度、弹性等质构特性变化的主要原因。随熟化时间的延长，热处理导致肌原纤维蛋白和胶原蛋白发生变性和凝固、蛋白质分子间的交联程度加剧，肌纤维持续失水收缩，导致样品硬度、内聚性、咀嚼性增大[22-23]。顾赛麒等[16]的研究结果显示，随熟化时间的延长，虾的硬度、内聚性、咀嚼性逐渐增大，弹性下降。弹性的变化趋势与该研究存在差异的原因可能是虾的品种不同。

### 2.8 熟化条件对脊尾白虾色泽的影响

颜色是评价熟虾品质的重要指标并直接影响消费者的接受度和回购率[24]，色泽鲜亮的熟虾更受消费者欢迎[25]。由图9可知，生虾的$L^*$较低，$a^*$、$b^*$均为负值，说明生虾的亮度较低且呈青蓝色；熟化处理后，$L^*$显著增加，$a^*$、$b^*$为正值，说明熟虾颜色更为鲜亮且呈现橙红色。随着熟化时间的延长，各处理组的$L^*$、$a^*$、$b^*$均呈现先升高后下降的趋势，基本在3 min时最大。相同的熟化时间下，蒸汽蒸制组的$L^*$、$b^*$总体低于水煮处理组，$a^*$高于水煮处理组，说明蒸汽蒸制组的虾亮度、黄度低于水煮处理组，但具有较高的红度值。

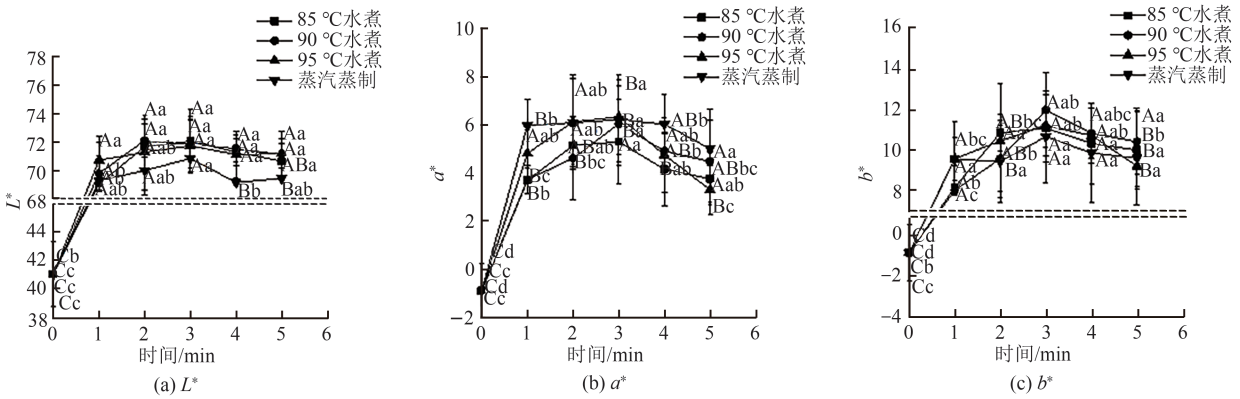
虾青素是加热过程中影响虾颜色变化的主要因素。在生虾中，虾青素通过亚氨基与蛋白质结合形成蛋白质-虾青素复合物，使生虾呈现出青蓝色或者灰色[26]。热处理后，蛋白质发生变性，蛋白质-虾青素复合物分解，虾青素游离出来，游离虾青素的颜色为橙红色，形成了熟虾特有的颜色特征。$L^*$的变化与蛋白质的凝聚变性、水分质量分数有关。涂敏建等[27]的研究结果显示，一定范围内水分质量分数的下降对虾仁贮藏期间$L^*$的变化影响不大。$a^*$与游离虾青素质量分数呈正相关。0~3 min时$a^*$上升，可能由于虾青素复合物受热分解导致游离虾青素质量分数不断增加；3~5 min时$a^*$下降，分析的原因是虾青素稳定性受到破坏，发生受热降解，异构化或者氧化降解导致游离虾青素质量分数下降，表现为$a^*$下降。$b^*$与脂肪氧化程度有关。试验中$L^*$、$a^*$、$b^*$的变化趋势与顾赛麒等[16]的试验结果一致。由此可见，要避免长时间热处理导致游离虾青素的损失及脂肪氧化。




小写字母a~e表示同种熟化工艺下不同时间之间存在显著差异（$P$<0. 05）；大写字母A~E表示相同处理时间下不同熟化工艺之间存在显著差异（$P$<0. 05）。

图8　不同熟化条件对脊尾白虾质构特性的影响

Fig. 8　Effects of different thermal processes on texture characteristics of *E. carinicauda*




小写字母a~e表示同种熟化工艺下不同时间之间存在显著差异（$P$<0. 05）；大写字母A~E表示相同处理时间下不同熟化工艺之间存在显著差异（$P$<0. 05）。

图9　不同熟化条件对脊尾白虾色泽的影响

Fig. 9　Effects of different thermal processes on the color of *E. carinicauda*

## 3 结论

在测定了传热曲线的基础上，以菌落总数、PPO相对酶活力、蒸煮损失率、水分质量分数、持水力、粗蛋白质质量分数、质构特性和色泽为指标，综合评价了不同熟化工艺对脊尾白虾品质的影响。结果显示，不同熟化工艺对虾的品质有不同程度的影响。其中，各组处理1 min时，菌落总数已降到4 lg CFU以下，蒸汽蒸制组的菌落总数最低。另外，相同的熟化时间下，蒸汽蒸制组的蛋白质质量分数更高，弹性、内聚性和咀嚼性更高，色泽更红，但持水力更低、水分损失更多。如果是虾熟化后继续加工成虾干制品，则干燥前较低的水分质量分数有利于干燥。随着熟化时间的延长，各处理组的灭酶、灭菌效果良好，蛋白质质量分数增加，但样品的硬度、内聚性、咀嚼性均随时间的延长逐渐增大，熟化后期，色泽变差，且持水力下降带来的水分损失逐渐明显，因此要避免过长时间的热处理带来的产品色泽、质构等品质的劣变及能源的浪费。综上所述，从保证产品较好的综合品质、利于虾干制品的生产、节约成本等角度考虑，选择蒸汽蒸制1 min作为脊尾白虾的最适熟化工艺。

## 参考文献


[1] 王日芳. 脊尾白虾近交系遗传多样性的微卫星分析[D]. 上海：上海海洋大学，2016.

[2] 沈晔，王兴强，曹梅，等. 脊尾白虾养殖技术研究[J]. 安徽农学通报，2019，25(15)：76-80.
SHEN Y，WANG X Q，CAO M，et al. Study on the culture technology of *Exopalaemon carinicauda* [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin，2019，25(15)：76-80.(in Chinese)

[3] 宋崇阳. 脊尾白虾DNA甲基转移酶基因家族的克隆及其功能研究[D]. 连云港：江苏海洋大学，2022.

[4] 张年国，周裕华，于飞，等. 低盐和高盐条件下不同脊尾白虾群体生长特性研究[J]. 广东农业科学，2022，49(10)：135-145.
ZHANG N G，ZHOU Y H，YU F，et al. Growth characteristics of different *Exopalaemon carinicauda* populations under low and high salinity conditions[J]. Guangdong Agricultural Sciences，2022，49(10)：135-145.(in Chinese)

[5] 段秀霞，施文正，汪之和. 不同加热温度对罗氏沼虾肉挥发性成分的影响[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(5)：94-102.
DUAN X X，SHI W Z，WANG Z H. Effects of heating temperature on the volatile compounds of freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*)[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2019，38(5)：94-102.(in Chinese)

[6] 陈闽榕. 对虾微冻保鲜技术及多酚氧化酶的生化特性研究[D]. 福州：福建农林大学，2009.

[7] 蔡燕萍，张莎莎，刘建华，等. $CO_2$冷海水结合抗氧化剂处理对南美白对虾的保鲜效果[J]. 食品工业科技，2019，40(15)：271-275，297.
CAI Y P，ZHANG S S，LIU J H，et al. Preservation effects of $CO_2$-cold seawater combined with antioxidants on *Litopenaeus vannamei*[J]. Science and Technology of Food Industry，2019，40(15)：271-275，297.(in Chinese)

[8] 于丽霞. 冻结方式和冻藏条件对罗氏沼虾品质的影响研究[D]. 无锡：江南大学，2018.

[9] 钟明慧，徐新星，刘康，等. 不同蒸制时间下鲟鱼背部肉的滋味特征差异分析[J]. 食品工业科技，2021，42(14)：55-60.
ZHONG M H，XU X X，LIU K，et al. Difference analysis on the taste characteristics of sturgeon under different steaming time[J]. Science and Technology of Food Industry，2021，42(14)：55-60.(in Chinese)

[10]《餐饮服务食品安全操作规范(全文)》[N]. 中国食品安全报，2011-09-01(B02).

[11] WILLIAMS H G，DAVIDSON G W，MAMO J C. Heat-induced activation of polyphenoloxidase in western rock lobster (*Panulirus cygnus*) hemolymph：implications for heat processing[J]. Journal of Food Science，2003，68(6)：1928-1932.

[12] 魏健. 熏马肉煮制熟化及贮藏期品质变化的研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2016.

[13] 员冬玲，王寿权，耿文广，等. 热预处理对南美白对虾干燥过程和产品品质的影响[J]. 山东科学，2019，32(4)：121-126.
YUN D L，WANG S Q，GENG W G，et al. Effects of thermal pretreatments on the drying process and product quality of *Penaeus vannamei*[J]. Shandong Science，2019，32(4)：121-126.(in Chinese)

[14] 刘书成，张良，吉宏武，等. 高密度$CO_2$与热处理对凡纳滨对虾肉品质的影响[J]. 水产学报，2013，37(10)：1542-1550.
LIU S C，ZHANG L，JI H W，et al. Effects of dense phase carbon dioxide and heat treatment on shrimp (*Litopenaeus vannamei*) meat qualities[J]. Journal of Fisheries of China，2013，37(10)：1542-1550.(in Chinese)

[15] XU Y S，CHEN Y P，CAO Y Q，et al. Effect of steam cooking on textural properties and taste compounds of

shrimp（*Metapenaeus ensis*）[J]. Food Science and Technology Research，2016，22(1)：75-81.

[16] 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 S Q，DAI W L，BAO R B，et al. Effect of cooking on the quality of *Fenneropenaeus chinensis* [J]. Food Science，2020，41(2)：276-283.(in Chinese)

[17] 甘晓玲，和劲松，朱瑞，等. 热处理对凡纳滨对虾虾仁加工品质的影响[J]. 食品科学，2012，33(19)：29-34.
GAN X L，HE J S，ZHU R，et al. Effect of heat treatment on white shrimp（*Litopenaeus vannamei*）quality [J]. Food Science，2012，33(19)：29-34.(in Chinese)

[18] 贾成霞，杨慕，胡庆杰，等. 6种野生鱼肌肉营养成分分析与评价[J]. 现代食品科技，2023，39(6)：27-36.
JIA C X，YANG M，HU Q J，et al. Analysis and evaluation of the nutritional composition of fish muscle from six wild fish species[J]. Modern Food Science and Technology，2023，39(6)：27-36.(in Chinese)

[19] 韦婕好. 热加工方式对羊肉制品蛋白质氧化及体外模拟消化性的影响研究[D]. 成都：西南民族大学，2019.

[20] 孙鲁浩，毛伟杰，张伟鸿，等. 不同加热方式下凡纳滨对虾品质的比较分析[J]. 现代食品科技，2018，34(9)：165-170，69.
SUN L H，MAO W J，ZHANG W H，et al. Comparative analysis of the quality of *Litopenaeus vannamei* subjected to different heat treatments [J]. Modern Food Science and Technology，2018，34(9)：165-170，69.(in Chinese)

[21] 王阳，刘文涛，潘锦锋，等. 熟化方式对预制鲍鱼品质的影响[J]. 食品科学，2018，39(3)：69-75.
WANG Y，LIU W T，PAN J F，et al. Effect of different cooking methods on the quality of pre-cooked abalone（*Haliotis discus hanai*）[J]. Food Science，2018，39(3)：69-75.(in Chinese)

[22] 吴燕燕，邱澄宇，李来好，等. 草鱼加热过程中肌肉蛋白质的热变性[J]. 水产学报，2005，29(1)：133-136.
WU Y Y，QIU C Y，LI L H，et al. Denaturation of muscle protein in *Ctenopharyngodon idelhus* during heat processing[J]. Journal of Fisheries of China，2005，29(1)：133-136.(in Chinese)

[23] 郭力，过世东，刘海英. 盐煮和微波加热对即食龙虾质构的影响[J]. 食品与生物技术学报，2011，30(3)：376-380.
GUO L，GUO S D，LIU H Y. Effect of microwave heating and salt cooking on texture of ready-to-eat product of crayfish[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2011，30(3)：376-380.(in Chinese)

[24] ERICKSON M C，BULGARELIL M A，RESURRECCION A V A，et al. Consumer differentiation，acceptance，and demographic patterns to consumption of six varieties of shrimp[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology，2007，15(4)：35-51.

[25] PARISENTI J，BEIRÃO L H，TRAMONTE V L C G，et al. Preference ranking of colour in raw and cooked shrimps [J]. International Journal of Food Science & Technology，2011，46(12)：2558-2561.

[26] 周高慧，马霖，吉宏武，等. 空气油炸条件对凡纳滨对虾品质影响[J]. 广东海洋大学学报，2021，41(6)：82-90.
ZHOU G H，MA L，JI H W，et al. Effects of air-frying treatment conditions on the quality of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Guangdong Ocean University，2021，41(6)：82-90.(in Chinese)

[27] 涂敏建，迟海，杨宪时，等. 水分含量对南极磷虾烤虾品质影响及货架期分析[J]. 海洋渔业，2013，35(3)：358-363.
TU M J，CHI H，YANG X S，et al. Influences of moisture contents on quality and shelf-life of roast Antarctic krill[J]. Marine Fisheries，2013，35(3)：358-363.(in Chinese)

（责任编辑：闫林红）