

## 高密度 CO<sub>2</sub> 与热处理对凡纳滨对虾肉品质的影响

刘书成, 张 良, 吉宏武\*, 郝记明, 毛伟杰, 解万翠

(广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室,  
广东普通高校水产品深加工重点实验室, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 高密度 CO<sub>2</sub> (DPCD) 是未来非常具有前景的非热加工技术之一, 可以实现对食品的杀菌和钝酶, 并对其品质产生影响。为了探讨高密度 CO<sub>2</sub> 对凡纳滨对虾肉品质的影响, 实验以凡纳滨对虾为研究对象, 采用 DPCD 和热处理, 测定虾肉营养成分、质量损失、pH 值、持水力、质构、蛋白质组成和呈味成分等的变化。结果显示: 与鲜虾相比, DPCD 处理会造成虾肉水分和粗脂肪含量显著降低 ( $P < 0.05$ ), 但粗蛋白含量无显著变化 ( $P > 0.05$ ), 而经热处理会使虾肉粗蛋白和粗脂肪含量都显著减少 ( $P < 0.05$ ); DPCD 处理造成虾肉质量损失达  $16.02\% \pm 1.90\%$ , 但对虾肉 pH 值无显著影响 ( $P > 0.05$ ); DPCD 和热处理都能使虾肉蛋白质发生变性, 造成持水力显著下降 ( $P < 0.05$ ), 从  $(84.79 \pm 5.25)$  g/100 g 分别下降至  $(65.18 \pm 2.06)$  和  $(65.58 \pm 2.08)$  g/100 g; DPCD 处理对虾肉硬度无显著影响 ( $P > 0.05$ ), 而热处理则造成虾肉硬度显著升高 ( $P < 0.05$ ), 从  $(3.48 \pm 0.49)$  N 上升到  $(7.37 \pm 0.76)$  N, DPCD 处理和热处理都显著降低了虾肉弹性 ( $P < 0.05$ ), 从  $0.88 \pm 0.08$  分别下降到  $0.71 \pm 0.03$  和  $0.78 \pm 0.03$ ; 除甜菜碱、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、Cl<sup>-</sup> 外, DPCD 处理对虾肉主要呈味成分 (游离氨基酸、ATP 及关联化合物、有机酸、糖原等) 无显著影响 ( $P > 0.05$ ), 而热处理则会造成本大部分呈味成分的损失。实验表明, DPCD 处理对虾肉品质的影响要小于热处理对虾肉品质的影响。

**关键词:** 高密度 CO<sub>2</sub>; 热处理; 虾肉品质; 呈味成分

**中图分类号:** TS 254.5

**文献标志码:** A

高密度 CO<sub>2</sub> (Dense phase carbon dioxide, DPCD) 是一种新型的非热加工技术, 它是结合压力 ( $\leq 50$  MPa) 的物理作用和 CO<sub>2</sub> 的分子效应, 在处理过程中形成高压高酸环境, 杀灭微生物和钝酶, 使食品得以长期贮藏或者直接食用<sup>[1]</sup>。DPCD 技术的优点是加工条件温和, 容易操作与控制; CO<sub>2</sub> 无毒无害, 无残留, 可循环利用等<sup>[2-7]</sup>。目前, DPCD 已广泛应用于液态食品 (如牛奶、果汁等) 的杀菌钝酶, 但 DPCD 在固体食品方面的应用还相对较少; 近几年, 有部分关于 DPCD 在肉制品和水产品加工方面的应用报道。

凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 营养丰富、肉质鲜美, 但是容易发生黑变和腐败变质。本

课题组前期采用 DPCD 技术在 55 °C 和 15 MPa 下处理 26 min, 实现了对凡纳滨对虾的杀菌和钝化多酚氧化酶, 不仅防止了黑变, 而且残留菌落总数低于 300 CFU/g, 达到水产熟制品卫生标准<sup>[8-9]</sup>。在此基础上, 本实验以新鲜凡纳滨对虾为对照, 比较分析 DPCD 和热处理对凡纳滨对虾营养成分、肌肉品质和呈味成分的影响, 以为 DPCD 技术在凡纳滨对虾加工中的应用提供参考。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 材料与试剂

凡纳滨对虾体质量为 15.00 ~ 20.00 g, 购于

收稿日期: 2013-04-20 修回日期: 2013-07-17

资助项目: 国家自然科学基金项目 (31371801); 国家虾产业技术体系专项 (CARS-47); 广东省教育厅创新课题 (2012KJJCX0062); 广东省水产蛋白改性技术研究团队 (2011A020102005); 广东省自然科学基金项目 (10152408801000010)

通信作者: 吉宏武, E-mail: jihw62318@163.com

当地市场,保活运至实验室,用自来水清洗后,选取鲜活、完整、大小均一个体,流水清洗后加冰猝死,待用。

SDS-PAGE 凝胶配制试剂盒、SDS-PAGE 蛋白上样缓冲液、蛋白质分子量标准,购于碧云天生物技术有限公司;ATP、GMP、IMP、ADP、Hx、AMP、HxR、乳酸、琥珀酸、苹果酸、柠檬酸等标准品,购于 Sigma 公司;乙酸(GR)、雷氏盐(AR),购于国药集团上海化学试剂有限公司;甲醇(色谱纯)购于 Merck 公司;甜菜碱(GR)购于 Sigma 公司;其他化学试剂均为国产分析纯;CO<sub>2</sub>(纯度 99.9%)购于湛江氧气厂。

## 1.2 仪器与设备

HA221-50-10-C 型超临界装置(南通市华安超临界萃取有限公司);HH-8 数显恒温水浴箱(常州澳华仪器有限公司);CR22G II 型高速冷冻离心机(日本日立公司);835-50 型高速氨基酸分析仪(日本日立公司);PHS-25 数显 pH 计(上海精密科学仪器有限公司雷磁仪器厂);HYP-II 马弗炉(上海纤检仪器有限公司);组织匀浆机(荷兰飞利浦公司);LC-20AD 型高效液相色谱分析仪(日本岛津仪器有限公司)、UV-2550 型紫外可见分光光度计(日本岛津仪器有限公司)、AU220 型分析天平(日本岛津仪器有限公司);Thermo M6 型原子吸收光谱仪(美国热电 Thermo Fisher 科技有限公司);TMS-Pro 型物性分析质构仪(美国 FTC 公司);DYCZ-24DN 双垂直迷你电泳仪(北京六一仪器厂)。

## 1.3 实验方法

**高密度 CO<sub>2</sub> 处理** 实验开始时,首先打开制冷及冷却循环系统,设置处理釜所需温度,然后将样品放入处理釜中,密封,开启高压泵泵入 CO<sub>2</sub> 气体,待压力上升至所需压力,关闭高压泵,封闭气体进出处理釜的阀门,维持处理釜内所需的压力和温度,静态保持一段时间后,卸压并在超净工作台中取出样品,完成一次处理,测定品质指标<sup>[10]</sup>。DPCD 处理条件为:55 ℃、15 MPa、26 min。

**热处理** 将凡纳滨对虾放入 100 ℃ 恒温水浴中处理 2 min,作为热处理对照样品。

**基本成分测定** 水分:105 ℃ 恒温烘箱干燥法,GB/T 5009.3-2010;粗蛋白:凯氏定氮法,GB/T 5009.5-2010;灰分:高温灼烧法,GB/T 5009.4-2010;粗脂肪:索氏抽提法,GB/T 14772

-2008。

### 理化指标的测定

**质量损失(WL)测定** 参考文献[11]。样品处理前称质量(*m*<sub>1</sub>),处理后用滤纸吸干虾表面汁液,称质量(*m*<sub>2</sub>),质量损失计算公式如下:

$$WL = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

**pH 值测定** 称取 10 g 虾肉,研磨,加入新鲜煮沸后冷却的水 90 mL,摇匀,静置 30 min 过滤,滤液用 pH 计检测。

**持水力测定** 采用离心法<sup>[12]</sup>。称取 2 g 左右的虾肉,剪碎,包 3 层滤纸作为吸附介质,置于离心管中,8 000 g 4 ℃ 离心 10 min,称重。持水力用保留水质量(g)与虾肉中总含水量(g)之比表示,单位为 g/100 g。

**质构分析** 采用 TMS-PRO 质构仪的 TPA 模式在室温下测量虾肉的硬度和弹性。测试采用直径为 5 mm 的圆柱型探头,测试前速率 1 mm/s,测试速率 1 mm/s,测试后速率 1 mm/s,样品变形量为 60%。硬度是第一次压缩时的最大峰值,弹性是用第二次压缩中所检测到的样品恢复高度(长度 2)和第一次的压缩变形量(长度 1)之比来表示<sup>[13]</sup>。

**蛋白质提取和 SDS-PAGE 电泳** 虾肉总蛋白提取参考文献[14]的方法;水溶性蛋白及盐溶性蛋白提取采用 Hashimoto 等<sup>[15]</sup>的方法。提取后 -80 ℃ 冻存备用。总蛋白及肌原纤维蛋白和肌浆蛋白的 SDS-PAGE 电泳分析采用 Laemmli 等<sup>[16]</sup>的方法并稍加改进,采用浓缩胶浓度为 5%,分离胶浓度为 12%。

**呈味成分测定** 游离氨基酸的测定采用 Konosu 等<sup>[17]</sup>的方法并稍加改进;ATP 及其关联化合物的测定采用 Hwang 等<sup>[18]</sup>的方法并稍加改进;有机酸的测定参考 GB/T 5009.157-2003;阳离子(K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>)采用湿法消化后用原子吸收光谱仪测定;Cl<sup>-</sup>用硝酸银滴定法(GB/T 12457-2008);PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>用钼蓝比色法(GB/T 5009.87-2003);糖原测定采用苯酚-硫酸法<sup>[19]</sup>。甜菜碱测定采用雷氏盐结晶比色法<sup>[20-21]</sup>。

**数据处理** 每个实验重复 3 次,数据用 mean ± SD 表示;用 JMP 7.0 软件进行方差分析(ANOVA)和 Tukey's HSD 多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 DPCD 和热处理对凡纳滨对虾肉基本成分的影响

从表 1 可以看出,凡纳滨对虾经 DPCD 处理后,水分含量显著降低( $P < 0.05$ ),说明发生了汁

液流失;粗蛋白含量未发生显著变化( $P > 0.05$ ),说明 DPCD 处理并没有造成粗蛋白的损失;粗脂肪含量显著降低( $P < 0.05$ ),这是因为 DPCD 具有萃取脂溶性物质的作用;灰分含量无显著变化( $P > 0.05$ );而经热处理 2 min 后,虾肉粗蛋白和粗脂肪含量都显著减少( $P < 0.05$ )。

表 1 DPCD 和热处理对虾肉基本成分的影响

Tab. 1 Effect of DPCD and heat treatment on shrimp meat proximate composition

| 基本成分/%<br>proximate composition | 新鲜虾<br>fresh shrimp       | DPCD 处理<br>DPCD treatment | 热处理<br>heat treatment     |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 水分含量 moist                      | 75.22 ± 0.63 <sup>a</sup> | 73.61 ± 0.08 <sup>b</sup> | 75.90 ± 0.13 <sup>a</sup> |
| 粗蛋白 crude protein               | 81.44 ± 0.58 <sup>a</sup> | 80.95 ± 1.77 <sup>a</sup> | 77.67 ± 0.67 <sup>b</sup> |
| 粗脂肪 crude fat                   | 3.51 ± 1.31 <sup>a</sup>  | 1.11 ± 0.21 <sup>c</sup>  | 2.31 ± 1.54 <sup>b</sup>  |
| 灰分 ash                          | 6.21 ± 0.55 <sup>a</sup>  | 7.16 ± 0.58 <sup>a</sup>  | 6.55 ± 0.15 <sup>a</sup>  |

注:粗蛋白、粗脂肪和灰分以干基计;同一行标注相同字母表示无显著差异( $P > 0.05$ ),否则有显著差异( $P < 0.05$ )

Notes: The crude protein, crude fat and ash are represented by dry basis; the same letter in the same line indicates no significant difference ( $P > 0.05$ ), or has significant difference ( $P < 0.05$ )

### 2.2 DPCD 和热处理对凡纳滨对虾肉品质的影响

从表 2 可以看出,凡纳滨对虾经 DPCD 处理后,质量损失达 16.02% ± 1.90%;DPCD 和热处理都使虾肉的持水力显著下降( $P < 0.05$ ),而两种处理之间无显著性差异( $P > 0.05$ );DPCD 处理的虾肉与新鲜虾肉的 pH 值无显著差异( $P >$

0.05),然而与热处理虾肉的 pH 值有显著差异( $P < 0.05$ );DPCD 处理的虾肉与新鲜虾肉硬度之间无显著差异( $P > 0.05$ ),而热处理虾肉硬度显著增加( $P < 0.05$ );与鲜虾肉相比,DPCD 和热处理均会引起虾肉弹性显著下降( $P < 0.05$ ),但是 DPCD 处理的虾肉弹性下降更多。

表 2 DPCD 和热处理对虾肉品质的影响

Tab. 2 Effect of DPCD and heat treatment on shrimp meat qualities

| 虾肉品质<br>shrimp muscle qualities    | 新鲜虾<br>fresh shrimp       | DPCD 处理<br>DPCD treatment | 热处理<br>heat treatment     |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 质量损失/% weight loss                 |                           | 16.02 ± 1.90 <sup>a</sup> | -3.45 ± 2.59 <sup>b</sup> |
| 持水力/g/100 g water-holding capacity | 84.79 ± 5.25 <sup>a</sup> | 65.18 ± 2.06 <sup>b</sup> | 65.58 ± 2.08 <sup>b</sup> |
| pH                                 | 6.90 ± 0.04 <sup>b</sup>  | 6.82 ± 0.11 <sup>b</sup>  | 7.46 ± 0.21 <sup>a</sup>  |
| 硬度/N hardness                      | 3.48 ± 0.49 <sup>b</sup>  | 4.17 ± 0.32 <sup>b</sup>  | 7.37 ± 0.76 <sup>a</sup>  |
| 弹性 springness                      | 0.88 ± 0.08 <sup>a</sup>  | 0.71 ± 0.03 <sup>c</sup>  | 0.78 ± 0.03 <sup>b</sup>  |

注:同一行标注相同字母表示无显著差异( $P > 0.05$ ),否则有显著差异( $P < 0.05$ )

Notes: The same letter in the same line indicates no significant difference ( $P > 0.05$ ), or has significant difference ( $P < 0.05$ )

### 2.3 DPCD 和热处理对凡纳滨对虾肉蛋白质组成的影响

从图 1 可以看出,DPCD 处理和热处理的虾肉总蛋白条带与新鲜虾肌肉的相比,并未发生明显变化;然而水溶性蛋白和盐溶性蛋白条带均出现不同程度的消失,热处理的更为严重。这说明 DPCD 处理能够诱导蛋白质发生变性,变性后的蛋白质可能聚集沉淀,溶解性发生变化而无法提取出来<sup>[7,22-23]</sup>。

### 2.4 DPCD 和热处理对凡纳滨对虾肉呈味成分的影响

凡纳滨对虾中呈味物质的含量及呈味强度

从表 3 可以看出,凡纳滨对虾的游离氨基酸主要是甘氨酸(Gly)、精氨酸(Arg)和脯氨酸(Pro),含量分别为(680.62 ± 62.76)、(425.63 ± 20.33)和(250.62 ± 18.56) mg/100 g;其次为苏氨酸(Thr)、丙氨酸(Ala)和谷氨酸(Glu),含量分别为(91.00 ± 12.02)、(79.12 ± 7.42)和(26.06 ±

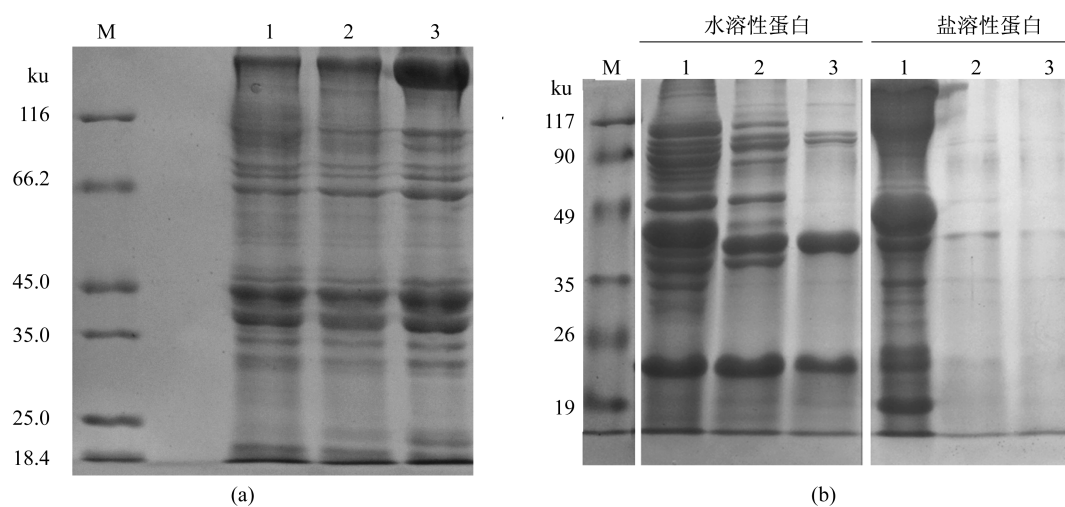


图 1 DPCD 和热处理下虾肉蛋白 SDS-PAGE 电泳图谱

(a) 总蛋白; (b) 水溶性蛋白及盐溶性蛋白; M. marker; 1. 新鲜虾; 2. DPCD 处理; 3. 热处理

Fig. 1 SDS-PAGE patterns of shrimp meat proteins by DPCD and heat treatment

(a) total protein; (b) water soluble protein and salt soluble protein; M. marker; 1. fresh shrimp; 2. DPCD treatment; 3. heat treatment

表 3 凡纳滨对虾肉的呈味组分、含量及呈味强度值

Tab. 3 The concentrations, flavor stimulation thresholds and flavor intensity values of flavor components of shrimp meat

| 呈味组分<br>flavor components     | 呈味特性<br>flavor characteristics | 含量 (mg/100 g)<br>concentration | 刺激阈值 (mg/100 mL) <sup>[24-25]</sup><br>stimulation threshold | 呈味强度值<br>flavor intensity values |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|----------------------------------|
| 天冬氨酸 (Asp)                    | 鲜 (+)                          | 7.69 ± 0.09                    | 100  | 0.08                             |
| 苏氨酸 (Thr)                     | 甜 (+)                          | 91.00 ± 12.02                  | 260  | 0.35                             |
| 丝氨酸 (Ser)                     | 甜 (+)                          | 17.50 ± 1.59                   | 150  | 0.12                             |
| 谷氨酸 (Glu)                     | 鲜 (+)                          | 26.06 ± 3.80                   | 30   | 0.87                             |
| 脯氨酸 (Pro)                     | 甜/苦 (+)                        | 250.62 ± 18.56                 | 300  | 0.84                             |
| 甘氨酸 (Gly)                     | 甜 (+)                          | 680.62 ± 62.76                 | 130  | 5.24                             |
| 丙氨酸 (Ala)                     | 甜 (+)                          | 79.12 ± 7.42                   | 60   | 1.32                             |
| 缬氨酸 (Val)                     | 甜/苦 (-)                        | 17.81 ± 1.15                   | 40   | 0.45                             |
| 甲硫氨酸 (Met)                    | 苦/甜/硫 (-)                      | 10.69 ± 0.09                   | 30   | 0.36                             |
| 异亮氨酸 (Ile)                    | 苦 (-)                          | 10.19 ± 0.27                   | 90   | 0.11                             |
| 亮氨酸 (Leu)                     | 苦 (-)                          | 11.75 ± 1.06                   | 190  | 0.06                             |
| 苯丙氨酸 (Phe)                    | 苦 (-)                          | 9.06 ± 0.27                    | 90   | 0.1                              |
| 赖氨酸 (Lys)                     | 甜/苦 (-)                        | 12.69 ± 1.70                   | 50   | 0.25                             |
| 组氨酸 (His)                     | 苦 (-)                          | 6.06 ± 0.44                    | 20   | 0.3                              |
| 精氨酸 (Arg)                     | 苦/甜 (+)                        | 425.63 ± 20.33                 | 50   | 8.51                             |
| GMP                           | 鲜 (+)                          | 5.72 ± 2.14                    | 12.5   | 0.46                             |
| IMP                           | 鲜 (+)                          | 40.72 ± 5.37                   | 25   | 1.63                             |
| AMP                           | 鲜 (+)                          | 142.46 ± 21.56                 | 50   | 2.85                             |
| 乳酸                            | 爽口的酸味                          | 250.41 ± 14.81                 |  |                                  |
| 甜菜碱                           | 甜                              | 767.31 ± 5.27                  |  |                                  |
| 糖原                            |                                | 154.73 ± 3.77                  |  |                                  |
| Na <sup>+</sup>               |                                | 201.98 ± 18.18                 | 180  | 1.12                             |
| K <sup>+</sup>                |                                | 306.58 ± 13.46                 | 130  | 2.36                             |
| Mg <sup>2+</sup>              |                                | 47.70 ± 3.00                   |  |                                  |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> |                                | 114.73 ± 4.91                  |  |                                  |
| Cl <sup>-</sup>               |                                | 189.57 ± 0.43                  |  |                                  |

3.80) mg/100 g;这6种氨基酸占总游离氨基酸总量的90%以上。按呈味强度值排序,依次是精氨酸(8.51) > 甘氨酸(5.24) > 丙氨酸(1.32) > 谷氨酸(0.87) > 脯氨酸(0.84),其他均低于0.5。凡纳滨对虾肉中核苷酸关联化合物主要是AMP和IMP,含量分别为142.46和40.72 mg/100 g,GMP次之,含量为5.72 mg/100 g,这3种核苷酸关联化合物的呈味强度值分别是2.85、1.63和0.46。凡纳滨对虾肉中乳酸含量[(250.41 ±

14.81) mg/100 g]较高,而其他有机酸的含量均较低。凡纳滨对虾肌肉的甜菜碱含量达到(767.31 ± 5.27) mg/100 g。因此,甜菜碱是凡纳滨对虾具有爽快甜味的重要原因之一。

DPCD和热处理对凡纳滨对虾肉主要呈味物质的影响 由“凡纳滨对虾中呈味物质的含量及呈味强度”分析可知,精氨酸、甘氨酸、丙氨酸、谷氨酸、AMP、IMP、乳酸、甜菜碱、糖原等是凡纳滨对虾肉的主要呈味物质。从图2可以看出,凡

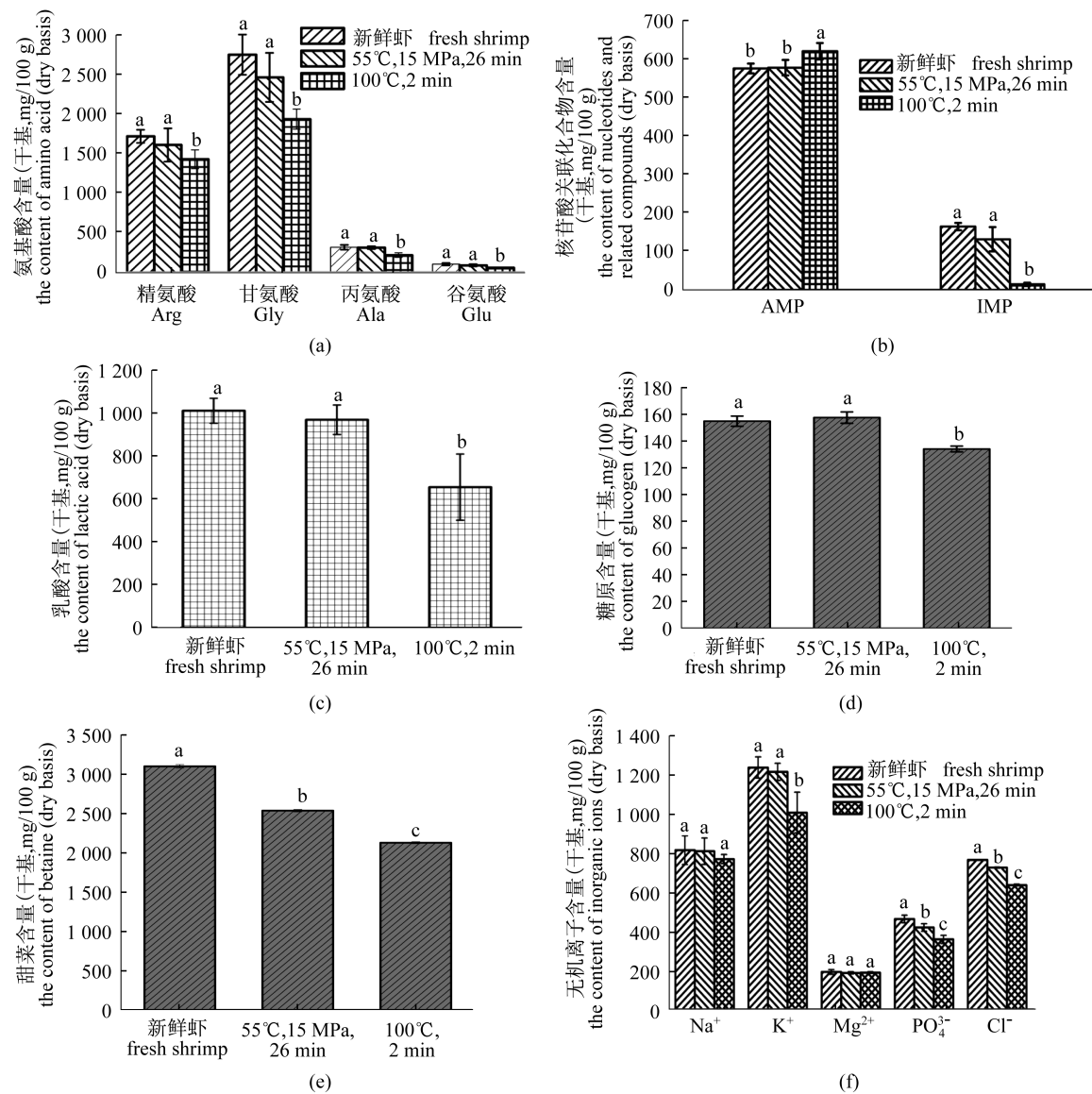


图2 DPCD和热处理对虾肉主要呈味物质的影响

(a),(b)每一种物质图标上标注不同字母表示有显著差异( $P < 0.05$ );(c),(d),(e)标注不同字母表示有显著差异( $P < 0.05$ );(f)每一种离子图标上标注不同字母表示有显著差异( $P < 0.05$ )

Fig. 2 Effect of DPCD and heat treatment on main flavor components of shrimp meat

(a),(b) the different letters at column chart of every substance indicate significant difference ( $P < 0.05$ ); (c),(d),(e) the different letters at column chart indicate significant difference ( $P < 0.05$ ); (f) the different letters at column chart of every substance indicate significant difference ( $P < 0.05$ )

纳滨对虾经过 DPCD 处理后,4 种呈味游离氨基酸(精氨酸、甘氨酸、丙氨酸和谷氨酸)、AMP 与 IMP、乳酸、糖原含量与新鲜虾的含量无显著差异( $P > 0.05$ );甜菜碱含量显著下降( $P < 0.05$ ),由(3 096.49 ± 21.26) mg/100 g 下降至(2 539.37 ± 15.55) mg/100 g。然而,凡纳滨对虾经过 100 °C 水煮 2 min 后,4 种呈味游离氨基酸(精氨酸、甘氨酸、丙氨酸和谷氨酸)、IMP、乳酸、糖原、甜菜碱含量均显著下降( $P < 0.05$ ),AMP 含量显著增大( $P < 0.05$ ),由(574.88 ± 12.56) mg/100 g 上升至(619.87 ± 21.23) mg/100 g。水煮处理造成游离氨基酸、IMP、乳酸及甜菜碱含量的减少会造成凡纳滨对虾的呈味强度值下降。在水煮加热过程中,主要是由于小分子呈味物质溶于水而流失。AMP 含量升高可能是 100 °C 条件下虾中 ATP 和 ADP 降解生成了 AMP。虾经 DPCD 处理后,阳离子 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 含量与新鲜虾相比无显著差异( $P > 0.05$ );阴离子 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、Cl<sup>-</sup> 含量显著下降( $P < 0.05$ );而虾经 100 °C 水煮加热处理 2 min 后,除 Mg<sup>2+</sup> 外,其他离子含量均显著下降( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

DPCD 处理虽然会造成对虾肌肉水分和粗脂肪的损失,但对粗蛋白和灰分无显著影响;而水煮处理会造成对虾肌肉粗蛋白和粗脂肪的损失,这与 Niamnuy 等<sup>[26]</sup>的结果一致,造成粗蛋白损失的原因与汁液流失及蛋白的热反应有关。粗脂肪在对虾肌肉中的含量比较低,对其营养的贡献是非常小的。因此,与热处理比较而言,DPCD 处理能够较好的保留凡纳滨对虾原有营养成分。

DPCD 造成对虾肌肉质量损失的原因可能是 CO<sub>2</sub> 在压力下溶于水生成 H<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 及 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 等离子,破坏了虾肉蛋白的氢键,疏水键等,导致水-蛋白体系失衡;另外,CO<sub>2</sub> 还能够萃取虾肉中的水分和脂溶性成分,从而造成了质量损失<sup>[5]</sup>;但是在热处理条件下,并未出现质量损失的现象,反而有增重的现象。曹荣<sup>[13]</sup>,Niamnuy 等<sup>[26]</sup>,何学连等<sup>[27]</sup>在研究水煮虾仁时,都出现了严重的质量损失,水煮 3 min 质量损失达 20% 左右。这可能是因为本实验是直接对整虾进行处理,虾头及虾壳的结构可能会保留一部分水分,造成了虾的增重。DPCD 和水煮处理都使对虾肌肉蛋白的持水

力显著下降,说明 DPCD 和水煮处理都造成了虾肉蛋白质结构的破坏。DPCD 处理固态食品时,其 pH 值不会变化<sup>[7]</sup>,可能是因为固态食品的含水量较液态食品的低,溶解到食品介质中的 CO<sub>2</sub> 少;另外,pH 检测并不是实时在线检测,不排除在 DPCD 系统内,固态食品的 pH 会下降,处理之后,由于 CO<sub>2</sub> 的散逸,造成固态食品 pH 无显著差异。与鲜虾肌肉对比,DPCD 处理虾肉硬度无显著变化( $P > 0.05$ ),而热处理虾肉硬度显著增加( $P < 0.05$ );DPCD 和热处理均会使虾肉弹性显著下降( $P < 0.05$ ),而且 DPCD 处理的虾肉弹性下降更多。这些差异可能是由于 DPCD 与热处理对虾肉组织结构的破坏作用不同而造成的。虾肉经热处理后,大量汁液流失,形成致密的蛋白结构<sup>[26]</sup>,造成硬度增大,弹性下降;而 CO<sub>2</sub> 通过渗透方式进入虾肉蛋白,在卸压过程中,CO<sub>2</sub> 急剧释放,造成虾肉组织的膨胀,形成疏松结构,获得与新鲜虾类似的硬度,而弹性则下降。

海产品呈味成分包括游离氨基酸、核苷酸关联化合物、有机酸及无机离子等,其中决定海产品鲜味的主要是游离氨基酸及核苷酸关联化合物。一般认为当呈味强度值大于 1 时则意味着该物质对呈味有较大的影响<sup>[28]</sup>。本实验中测定的对虾肌肉游离氨基酸的呈味效果与薛长湖等<sup>[29]</sup>、王士稳等<sup>[30]</sup>、Liang 等<sup>[31]</sup>、陈丽花<sup>[32]</sup>的结果一致。核苷酸及其关联化合物,尤其是 IMP 和 GMP,它们不仅单独呈味,还可以与谷氨酸钠相乘作用增强鲜味<sup>[29]</sup>。在甲壳类动物中,AMP 脱氨酶的活性较低,造成 AMP 的积累<sup>[29]</sup>,因此 AMP 的含量最高。在本实验中,IMP 的呈味强度值也大于 1,说明,AMP 和 IMP 对凡纳滨对虾的滋味有重要贡献,GMP 由于含量较低,对凡纳滨对虾的呈味贡献不大。这些结果也与薛长湖等<sup>[29]</sup>、王士稳等<sup>[30]</sup>、Liang 等<sup>[31]</sup>的一致。海产品中有机酸种类主要包括乳酸、琥珀酸、乙酸、丙酸、草酸、丙酮酸以及磷酸和核苷酸等,这些酸性化合物通常都是以盐类形式存在,被认为是海产品的呈味物质之一<sup>[33]</sup>。乳酸和琥珀酸是鱼类动物肌肉的主要代谢产物,但凡纳滨对虾的琥珀酸含量较低,故琥珀酸对其呈味贡献较小。甜菜碱是一种季胺类化合物,它在鱼类肌肉中含量较低,而在无脊椎动物中含量高,是一类重要的甜味物质。水产动物肌肉中的甜菜碱通常以两种形式存在,一种是甘氨基

酸甜菜碱,一种是 $\beta$ 丙氨酸甜菜碱。薛长湖等<sup>[29]</sup>对海捕对虾的甜菜碱进行分析,含量高达800 mg/100 g。糖原、无机离子对海产品的特有滋味也起到增强作用,这些无机离子是凡纳滨对虾呈味不可缺少的因子<sup>[29]</sup>。

本实验中,DPCD处理对有机呈味物质的含量影响较小,与新鲜虾相比,除甜菜碱、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 含量下降外,其他呈味成分均未显著变化。尽管DPCD处理对虾会造成非热破坏和汁液流失,但其呈味成分并没有破坏或流失。从理论上讲,可能的原因有以下几个方面:①DPCD处理温度低,在非极性无氧条件下,呈味成分很难发生化学反应;②呈味成分包含极性化合物及无机离子,很难被 $\text{CO}_2$ 萃取;③在流失的部分汁液中,可能大量溶解 $\text{H}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 及非呈味物质而处于高饱和状态,呈味组分无法溶入其中而得以保留。当然,在热处理过程中,食品组分能通过化学反应,降解产生新的呈味成分<sup>[34]</sup>,但是DPCD在保留食品原有风味方面优势更大;另外,DPCD处理后虽然有汁液损失,但呈味物质会出现相应浓缩效应,其呈味强度会进一步增强。

#### 参考文献:

- [1] 屈小娟,刘书成,吉宏武,等. 高密度 $\text{CO}_2$ 诱导制备虾糜凝胶的特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20):282-287.
- [2] Spilimbergo S, Bertuccoe A. Non-thermal bacterial inactivation with dense  $\text{CO}_2$  [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 84(6):627-638.
- [3] Damar S, Balaban M O. Review of dense phase  $\text{CO}_2$  technology: microbial and enzyme inactivation, and effects on food quality[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(1):R1-R11.
- [4] Zhang J, Davis T A, Matthews M A, et al. Sterilization using high-pressure carbon dioxide[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2006, 38(3):354-372.
- [5] Garcia-Gonzalez L, Geeraerd A H, Spilimbergo S, et al. High pressure carbon dioxide inactivation of microorganisms in foods: The past, the present and the future [J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 117(1):1-28.
- [6] 廖小军,胡小松,张燕,等. 我国食品非热加工技术研究现状分析[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2008.
- [7] Ferrentino G, Spilimbergo S. High pressure carbon dioxide pasteurization of solid foods: Current knowledge and future outlooks [J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(8):427-441.
- [8] Ji H W, Zhang L, Liu S C, et al. Optimization of microbial inactivation of shrimp by dense phase carbon dioxide [J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 156(1):44-49.
- [9] Zhang L, Liu S C, Ji H W, et al. Inactivation of polyphenol oxidase from Pacific white shrimp by dense phase carbon dioxide [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(4):635-641.
- [10] 张良,刘书成,章超桦,等. 神经网络优化牡蛎的高密度 $\text{CO}_2$ 杀菌工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12):369-373.
- [11] Checharoen J, Kijroongrojana K, Benjakul S, et al. Improvement of physical properties of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) meat gel induced by high pressure and heat treatment [J]. Journal of Food Biochemistry, 2011, 35(3):976-996.
- [12] Montero P, Gómez-Guillén M C, Borderías J. Influence of subspecies, season and stabilization procedures in gel-forming ability of frozen minced muscle of sardine (*Sardina pilchardus*) [J]. Food Science and Technology International, 1996, 2(2):111-122.
- [13] 曹荣. 对虾生物保鲜与其熟制品保藏技术的研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2009.
- [14] Renato de Oliveira Cesar J, Zhao B Q, Malecha S, et al. Morphological and biochemical changes in the muscle of the marine shrimp *Litopenaeus vannamei* during the molt cycle [J]. Aquaculture, 2006, 261(2):688-694.
- [15] Hashimoto K, Watabe S, Kono M, et al. Muscle protein composition of sardine and mackerel [J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1979, 45(11):1435-1441.
- [16] Laemmli U K. Cleavage of Structural Proteins during the Assembly of the Head of Bacteriophage T4 [J]. Nature, 1970, 227(5259):680-685.
- [17] Konosu S, Watanabe K, Shimizu T. Distribution of nitrogenous constituents in the muscle extracts of eight species of fish [J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1974, 40(9):909-915.
- [18] Hwang D F, Chen T Y, Shiau C Y, et al. Seasonal variations of free amino acids and nucleotide-related

- compounds in the muscle of cultured Taiwanese puffer *Takifugu rubripes* [J]. *Fisheries Science*, 2000,66(6):1123-1129.
- [19] 董群,郑丽伊,方积年.改良的苯酚-硫酸法测定多糖和寡糖含量的测定[J].*中国药学杂志*,1996,31(9):550-553.
- [20] Focht R L, Schmidt F H, Dowling B B, *et al.* Sugar beet processing, colorimetric determination of betaine in glutamate process end liquor [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1956, 4 ( 6 ): 546 - 548.
- [21] 黄丽贞.海产品中呈味成份甜菜碱的测定[J].*上海水产大学学报*,1994,3(3):160-163.
- [22] Choi Y M, Ryu Y C, Lee S H, *et al.* Effects of supercritical carbon dioxide treatment for sterilization purpose on meat quality of porcine *longissimus dorsi* muscle [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008,41(2):317-322.
- [23] 闫文杰,崔建云,戴瑞彤,等.高密度二氧化碳处理对冷却猪肉品质及理化性质的影响[J].*农业工程学报*,2010,26(7):346-350.
- [24] Kato H, Rhue M R, Nishimura T, *et al.* Role of free amino acids and peptides in food taste, in *Flavor Chemistry* [J]. *American Chemical Society*, 1989, 388:158-174.
- [25] Fuke S, Ueda Y. Interactions between umami and other flavor characteristics [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1996,7(12):407-411.
- [26] Niamnuy C, Devahastin S, Soponronnarit S, *et al.* Changes in protein compositions and their effects on physical changes of shrimp during boiling in salt solution [J]. *Food Chemistry*, 2008, 108 ( 1 ): 165 - 175.
- [27] 何学连,袁信华,过世东.烫漂工艺对白对虾品质的影响[J].*食品与发酵工业*,2007,33(10):115-118.
- [28] Chen D W, Zhang M. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Food Chemistry*, 2007,104(3):1200-1205.
- [29] 薛长湖,陈修白.养殖和海捕两类中国对虾尝味成分的分析比较[J].*青岛海洋大学学报:自然科学版*,1991,21(3):91-100.
- [30] 王士稳,梁萌青,林洪,等.海水和淡水养殖凡纳滨对虾呈味物质的比较分析[J].*海洋水产研究*,2006,27(5):79-84.
- [31] Liang M Q, Wang S W, Wang J L, *et al.* Comparison of flavor components in shrimp *Litopenaeus vannamei* cultured in sea water and low salinity water [J]. *Fisheries Science*, 2008,74(5):1173-1179.
- [32] 陈丽花.中国对虾风味成分的分析及其天然仿真风味料的研究[D].上海海洋大学,2008.
- [33] Fuke S, Konosu S. Taste-active components in some foods: A review of Japanese research [J]. *Physiology & Behavior*, 1991,49(5):863-868.
- [34] Cambero M I, Seuss I, Honikel K O, *et al.* Flavor compounds of beef broth as affected by cooking temperature [J]. *Journal of Food Science*, 1992, 57(6):1285-1290.



## Effects of dense phase carbon dioxide and heat treatment on shrimp (*Litopenaeus vannamei*) meat qualities

LIU Shucheng, ZHANG Liang, JI Hongwu\*, HAO Jiming, MAO Weijie, XIE Wancui

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Products of Guangdong Higher Education Institution, College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** Dense phase carbon dioxide (DPCD) is a promising non-thermal processing technology that affects microorganisms and enzymes through molecular effects of CO<sub>2</sub> under pressures below 50 MPa and temperature below 60 °C. DPCD could affect food physical, nutritional, sensory qualities. In these experiments, compared with fresh shrimp (*Litopenaeus vannamei*), the effects of dense phase carbon dioxide (DPCD) and heat treatment on the nutrient components, mass loss, pH value, water-holding capacity, texture, protein and flavor components of shrimp meat were investigated. The results were as follows: compared with fresh shrimp, the water and crude fat content of shrimp meat treated by DPCD decreased significantly ( $P < 0.05$ ) and the crude protein content of that had no significant change ( $P > 0.05$ ), while the crude protein and fat content of shrimp meat treated by heat decreased significantly ( $P < 0.05$ ); the mass loss of shrimp meat treated by DPCD was  $16.02\% \pm 1.90\%$ , but DPCD had no significant effect on pH value of shrimp meat ( $P > 0.05$ ); DPCD and heat treatment could induce shrimp protein denaturation, which caused water holding capacity of shrimp meat decreased significantly ( $P < 0.05$ ), from  $(84.79 \pm 5.25)$  g/100 g to  $(65.18 \pm 2.06)$  g/100 g and  $(65.58 \pm 2.08)$  g/100 g respectively; DPCD treatment has no significant effect on hardness of shrimp meat ( $P > 0.05$ ), while heat treatment caused hardness of shrimp meat to increase significantly ( $P < 0.05$ ), from  $(3.48 \pm 0.49)$  N to  $(7.37 \pm 0.76)$  N; DPCD and heat treatment caused springiness of shrimp meat to decrease significantly ( $P < 0.05$ ), from  $0.88 \pm 0.08$  to  $0.71 \pm 0.03$  and  $0.78 \pm 0.03$  respectively; except for betaine, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> and Cl<sup>-</sup>, the contents of other taste-active components (free amino acids, ATP related compounds, organic acid, and glycogen etc.) had no significant difference ( $P > 0.05$ ) between DPCD treated and fresh shrimp, but heat treatment led to significant loss of shrimp meat taste-active components ( $P < 0.05$ ). These results indicated that negative effects of DPCD treatment on shrimp meat qualities were less than those of heat treatment.

**Key words:** dense phase carbon dioxide; heat treatment; shrimp meat quality; flavor components

**Corresponding author:** JI Hongwu. E-mail: jihw62318@163.com