



南极磷虾体内主要营养活性物质在热处理过程中的流向

赵昕源^{1,2}, 欧阳杰^{2,3,4*}, 马田田^{2,3}, 白贞², 沈建^{2,3,4}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;

3. 大连工业大学, 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 116034;

4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 虾粉是南极磷虾最主要的加工产品之一, 加工过程中, 热处理会造成营养物质的流失和活性物质的破坏, 是决定虾粉品质最主要的影响因素。为了掌握虾粉在加工过程中主要物质的变化情况及其流向路径, 通过测定蒸煮和干燥这两个涉及热处理的关键工序过程中, 虾体内水分、灰分、蛋白质和脂质等主要营养物质的含量变化及脂肪酸、虾青素等功能成分的损失情况, 分析各主要物质的流向路径及变化原因。结果显示, 蒸煮过程中水分流失 8.49%, 干燥过程中水分流失 63.5%, 大多以蒸发的形式流失; 蛋白质在蒸煮过程中流失 1.12%, 其中流向蒸煮液 0.87%, 流失部分主要为水溶性蛋白, 干燥过程中流失 6.05%; 脂质在蒸煮和干燥过程中分别减少 1.11% 和 1.61%, 进一步分析其脂肪酸组成, 发现多不饱和脂肪酸含量由 45.57% 降至 43.65%, 其中 EPA 相对含量在蒸煮和干燥过程中分别减少 0.41% 和 1.16%, DHA 相对含量在蒸煮过程中变化不大, 干燥过程中减少 0.68%; 虾青素是热敏性物质, 受热处理的影响, 在蒸煮和干燥过程中分别减少 29.4 和 58.6 mg/kg; 灰分含量在蒸煮、干燥过程中分别减少 2.85% 和 0.85%。研究表明, 蒸煮过程中, 损失的主要物质为蒸煮液中的可溶性物质及少部分的热敏性物质, 干燥过程主要造成水分的蒸发和虾青素等热敏性物质的破坏。研究初步掌握了南极磷虾虾粉加工过程中主要营养活性物质的含量变化与流向路径, 分析了变化原因及主要影响因素, 并提出了减少物质流失的方案, 为后续南极磷虾粉加工工艺流程和参数的优化提供理论依据, 对提高虾粉品质、促进南极磷虾资源高质化利用具有非常重要的意义。

关键词: 南极磷虾; 加工工艺; 营养成分; 脂质氧化

中图分类号: TS 254.4

文献标志码: A

南极磷虾 (*Euphausia superba*) 资源丰富, 年捕获量可达 1 亿 t, 是海洋渔业资源的重要组成部分, 被誉为人类最后的蛋白库。受捕捞和加工能力等一系列问题的影响, 现在年捕获量仅为 20 万 t 左右^[1-3], 而且尚未得到充分开发利用。

南极磷虾体内蕴含丰富的矿物质、蛋白质以及多种不饱和脂肪酸等营养成分, 对人体有着良好的保健功能与极高的营养价值。此外, 南极磷虾体内还含有酶类^[4]、甲壳素^[5] 和虾青素等活性成分, 在有序合理的开发利用下, 能够创造

收稿日期: 2021-05-18 修回日期: 2021-06-14

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1406804)

第一作者: 赵昕源 (照片), 从事水产品加工研究, E-mail: zhaoxinyuan513@163.com

通信作者: 欧阳杰, E-mail: ouyangjie@fmiri.ac.cn



出巨大的经济效益。我国的南极磷虾开发起步较晚, 21 世纪初才开始对南极磷虾资源进行探捕, 加工产品有冻虾、虾粉、虾肉、虾油等, 其中虾粉是最主要的加工产品。目前我国南极磷虾粉的加工工艺主要借鉴鱼粉, 加工设备主要沿用陆基鱼粉加工设备, 存在能耗高、得率低、产品品质不稳定等问题, 与挪威等南极磷虾加工发达国家还存在着较大差距^[6]。南极磷虾体内含有丰富的酶, 在酶的作用下, 会产生自溶、褐变等现象, 造成南极磷虾及产品品质的劣变, 加工过程中虾青素、不饱和脂肪酸等功能物质容易受热和氧化分解, 造成品质的下降。

目前常用的磷虾粉加工工艺流程包括蒸煮、分离、干燥、粉碎和包装等, 其工艺直接决定虾粉的品质。因此探究南极磷虾粉加工过程中营养活性物质的变化规律, 掌握加工过程中物质流向路径, 对于优化南极磷虾粉加工工艺、提高虾粉品质、促进南极磷虾资源高质化利用具有非常重要的意义。本研究以南极磷虾为对象, 选取南极磷虾粉加工过程中涉及到热处理的蒸煮和干燥这两个关键工序, 通过测定加工过程中水分、灰分、蛋白质和脂质等主要营养物质的含量变化及脂肪酸和虾青素等功能成分的损失情况, 分析各主要物质的流向路径、变化原因及主要影响因素, 旨在掌握物质流向与虾粉品质、得率之间的相关性, 为南极磷虾粉加工工艺的优化提供理论依据, 提高虾粉品质、促进南极磷虾资源的高质化利用。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

南极磷虾购自辽宁远洋渔业有限公司, 2020 年 5 月捕捞于南极海域 48.1 海区, 体长 1.5~3.5 cm, 全程冷链运输到实验室, 于 -20 °C 冰箱中冷冻保存备用。

1.2 仪器与试剂

BPG-96A 型精密鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; Trace 1300 型气相色谱仪, 美国 Thermo 公司; KDN-1 型凯氏定氮仪, 上海雷磁仪电科学仪器股份有限公司; HWS-26 型电热恒温水浴锅, 上海一恒科学仪器有限公司; LC-DCY 型氮吹仪, 湖南力辰仪器科技有限公司;

GTR16-2 高速台式冷冻离心机, 北京时代北利离心机有限公司; MA150 型水分测定仪, 德国赛多利斯集团; UV-2204PC 型紫外可见分光光度仪, 上海精密仪器有限公司; GST-8-1000 型马弗炉, 上海广树机电有限公司; XS105 型分析天平, 梅特勒-托利多国际贸易有限公司。

三氯甲烷、氯化钠、甲基红、溴甲酚绿、氢氧化钠、硼酸、硫酸铜、硫酸钾、无水乙醇、乙酸镁等均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 甲醇为色谱纯, 上海麦克林生物有限公司; 异辛烷为色谱纯, 上海安谱实验科技股份有限公司; 三氟化硼甲醇溶液 (14%), 美国 Sigma 公司。脂肪酸标准品购自上海安谱实验科技股份有限公司, 货号为 252795。

1.3 实验方法

冷冻南极磷虾采用 (20±5) °C 的流水解冻 30 min, 待完全解冻后沥干, 用滤纸吸干表层多余水分; 解冻虾样采用蒸锅蒸汽蒸煮 4 min, 蒸煮温度 (100±2) °C, 冷却至常温, 待测; 蒸煮后的虾样置于 105 °C 鼓风干燥箱中干燥约 3 h 至恒重, 粉碎过 40 目筛, 待测。

1.4 相关指标测定

水分含量测定 根据 GB 5009.3—2016^[7] 中的方法测量, 水分含量为 g/100 g。

灰分的测定 根据 GB 5009.4—2016^[8] 中的方法测量, 本研究中灰分含量均以干重计算, 单位为 g/100 g。

蛋白质含量的测定 根据 GB 5009.5—2016^[9] 中的方法测量, 蛋白质含量均以干重计算, 固体样品蛋白质含量单位为 g/100 g, 蒸煮液中蛋白质含量单位为 g/100 mL。

虾青素含量的测定 虾青素的提取和测定参考孙来娣等^[10] 和马田田等^[11] 的方法略作修改。精确称取南极磷虾样品 1.00 g, 加入 30 mL 无水乙醇, 振荡摇匀, 置于 50 °C 水浴锅中 4 h。之后取出, 过滤, 滤液置于容量瓶中待测。吸取待测样品于石英比色皿中, 于 472 nm 下测定其吸光度, 并通过绘制的标准曲线确定虾青素含量。

脂质的提取及含量测定 根据 Folch 等^[12] 和韩迎雪等^[13] 的方法略作修改后进行脂肪提取。准确称取 2 g(m) 虾样于 50 mL 具塞离心管中, 加入 15 mL 氯仿-甲醇 (2 : 1, V/V, 体积分数) 溶液

(含 0.01% BHT), 在冰浴条件下用高速分散均质机以 10 000 r/min 的转速匀浆 2 次, 每次 15 s, 之后用氯仿-甲醇 (2:1, V/V, 体积分数) 溶液定容至 30 mL, 静置 1 h 后过滤, 直接将滤液放入已知质量 (m_0 , g) 的具塞离心管中, 加入 1/5 滤液体积的 0.85% 生理盐水, 最后在 4 000 r/min 的条件下离心 15 min, 弃去上层液体, 下层脂质溶液用氮气吹扫, 冷却至质量恒定后称量 (m_1 , g), 得到浓缩脂质。脂质质量分数 $w(\text{g}/100 \text{g})$ 计算公式:

$$w(\%) = \frac{(m_1 - m_0)}{m} \times 100\% \quad (1)$$

脂肪酸甲酯化 将上一步提取得到的脂质加入 2 mL 14% 三氟化硼甲醇溶液中, 在 60 °C 水浴中反应 30 min, 反应结束冷却至室温, 然后分别加入 1 mL 异辛烷和 1 mL 蒸馏水, 振荡。静置分层后吸取上层有机层, 过 0.22 μm 滤膜后置于进样瓶中待测。

GC 脂肪酸组成 GC 条件: 色谱柱为 Thermo 260M238P (100 m \times 0.25 mm, 0.20 μm) 毛细管柱; 升温程序^[14]: 初始温度 80 °C(保持 13 min), 以 10 °C/min 升至 180 °C(保持 6 min), 以 1 °C/min 升至 200 °C(保持 20 min), 以 4 °C/min 升至 230 °C(保持 10.5 min); 进样口温度: 250 °C; 分流比: 10; 载气: 高纯氮 (99.999%); 进样体积: 1 μL 。脂肪酸分析以 37 种脂肪酸甲酯标准品图谱做比较, 以确认南极磷虾体内的脂肪酸甲酯成分, 用峰面积归一化法来确定脂肪酸的相对含量。色谱图中响应强度单位为电流单位 (pA)。

1.5 数据分析

数据均采用 Excel 软件统计, 每种南极磷虾样品平行测定 3 次, 采用 SPSS 22.0 软件对结果进行 One-Way ANOVA 单因素方差分析, $P < 0.05$ 为差异显著, $P > 0.05$ 为差异不显著。

2 结果

2.1 加工过程中南极磷虾水分的流向

新鲜南极磷虾的水分含量为 80% 左右, 经过一系列工序加工成虾粉后, 水分含量下降到 10% 左右。分析加工过程中水分含量的变化趋势, 蒸煮后, 磷虾的水分下降了 8.49%, 这些水分中的很少一部分由于蒸煮加热变成水蒸气而流失, 绝大部分则流向了蒸煮液。蒸煮过程中, 水分

流失的同时, 也会造成水溶性物质的流失。干燥的主要目的就是为了解除水分, 显而易见, 干燥过程脱除的水分约 60%, 不同于蒸煮工序, 干燥工序流失的水分都是以蒸发的形式流失 (图 1)。

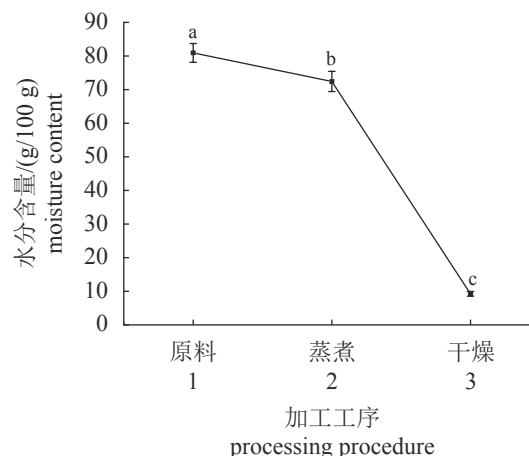


图 1 南极磷虾热处理过程中水分变化趋势

1. 原料, 2. 蒸煮, 3. 干燥, 下同。同行肩标不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Fig. 1 Moisture change trend of *E. superba* during heat treatment

1. raw material, 2. steaming, 3. drying; the same below. In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P < 0.05$)

2.2 加工过程中南极磷虾蛋白质的流向

蛋白质是南极磷虾体内含量最高的一类营养物质, 通常占干重的 65% 左右^[15-16]。虾粉加工过程中, 由于受挤压和加热等因素影响, 蛋白质会有一定程度的损失, 部分蛋白质会出现变性。原料中磷虾的蛋白质含量为 73.86%, 蒸煮后为 72.74%, 下降了 1.12% (图 2)。经测定, 每 100 g 磷虾可得到约 8.75 mL 蒸煮液, 其中蒸煮液中蛋白质含量为 0.87%。分析造成蒸煮工序蛋白质流失的主要原因: ①部分水溶性蛋白随着水分的流失进入蒸煮液; ②南极磷虾体内含有丰富的蛋白酶, 蒸煮过程中酶完全灭活前, 会分解一部分蛋白质, 随着蛋白酶的逐渐灭活, 蒸煮后期的蛋白质的分解速率减缓^[17]; ③蒸煮过程中部分蛋白质会黏于托盘底部而造成少量损失。

干燥后, 虾粉中的蛋白质含量下降为 66.69%, 含量明显低于原料及蒸煮后的虾样 ($P < 0.05$), 这可能与热风干燥过程中发生美拉德反应有关; 美拉德反应本质上是醛、酮、还原糖及脂肪氧化生成的羰基化合物与氨基酸、蛋白质及氨之

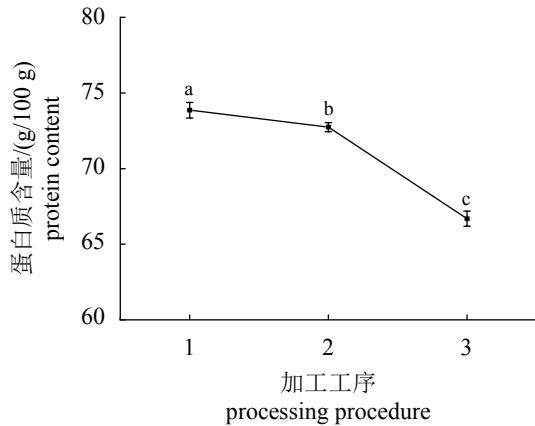


图2 南极磷虾热处理过程中蛋白质含量的变化趋势

Fig. 2 Change trend of protein content of *E. superba* during heat treatment

间发生反应, 热反应和长时间储藏都会促使美拉德反应形成, 一般水分含量为 10%~25% 时, 美拉德反应较容易发生^[18]。因此当干燥过程中达到发生美拉德反应的条件时, 南极磷虾体内的羰基化合物(还原糖类)与氨基化合物(蛋白质)发生反应, 造成蛋白质的减少^[19]。

2.3 加工过程中南极磷虾脂质的流向路径及脂肪酸组成的变化

脂质的流向 南极磷虾脂质包括甘油三酯、磷脂、固醇、脂类和游离脂肪酸等, 其中多不饱和脂肪酸(PUFA)含量较高, 尤其是EPA和DHA含量约占不饱和脂肪酸含量的79.1%~89.2%^[20]。由于脂质在高温和空气中易氧化变质, 在虾粉加工过程中, 蒸煮和干燥等热处理环节往往会对其造成影响。蒸煮后的南极磷虾脂质含量由25.53%下降到24.42%, 下降了1.11%(图3), 其原因可能为蒸煮处理造成脂质的水解和流失。干燥过程中, 脂质含量下降了1.61%, 说明干燥对脂质含量的影响比蒸煮处理更为明显。这可能是因为南极磷虾富含不饱和脂肪酸, 容易发生氧化, 干燥过程中物料长时间暴露在较高的温度中, 会促进脂质内部发生氧化分解。

脂肪酸组成及其相对含量 不同加工阶段, 南极磷虾体内的脂肪酸组成相同, 均检测到22种脂肪酸, 包括8种脂肪酸(SFA)和14种不饱和脂肪酸(UFA)。多不饱和脂肪酸占总脂肪酸含量的43.65%~45.57%, 其中C20:5(EPA)含量最高(22.74%~24.31%)。单不饱和脂肪酸(MUFA)占总脂肪酸(FA)含量的20.07%~21.38%, 其中

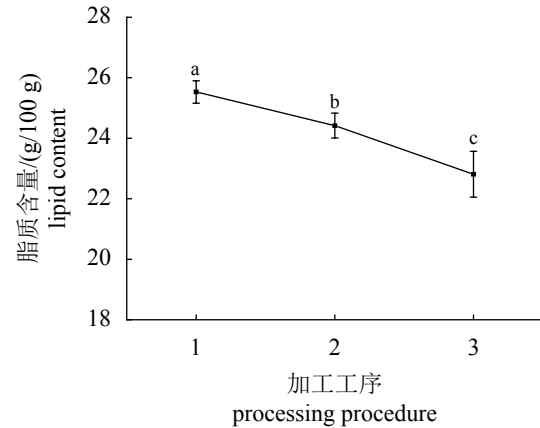


图3 南极磷虾热处理过程中脂质含量的变化趋势

Fig. 3 Change trend of lipid content of *E. superba* during heat treatment

C18:1含量最高(15.78%~16.95%)(表1, 图4)。

南极磷虾体内含有大量以EPA(二十碳五烯酸)和DHA(二十二碳六烯酸)为代表的 ω -3多不饱和脂肪酸。随着加工的深入, 3个阶段的脂肪酸组成中, EPA和DHA的相对含量随之下落, 尤其是干燥至恒重的虾粉中, EPA和DHA的含量下降明显($P<0.05$), 证明蒸煮和干燥过程中的高温加热促进了PUFA的氧化, 不饱和双键和氧反应生成过氧化物, 导致了PUFA的含量降低。

2.4 加工过程中南极磷虾虾青素的流向

虾青素是热敏性物质, 容易受热分解, 在加工过程中, 热处理对于虾青素的影响较大, 原料、蒸煮和干燥这3个阶段的虾青素含量变化见图5, 分别为241.6、212.2和153.6 mg/kg。南极磷虾虾青素含量在蒸煮和干燥过程中变化显著($P<0.05$), 分别减少了29.4和58.6 mg/kg。可见热加工对于虾青素含量的影响非常大, 而干燥相较于蒸煮, 对于虾青素含量的影响更为显著, 这是因为蒸煮的时间短, 并且蒸煮过程中水分含量相对较高, 对虾青素有一定的保护作用。而干燥的时间比较长, 水分含量会逐渐下降, 造成虾青素暴露在较高温度的时间比较长, 因而降解较快。此外, 虾青素因其含有长共轭不饱和双键而易受光、热等影响, 发生异构化和降解。

2.5 加工过程中南极磷虾灰分的流向

灰分是样品在高温煅烧后残留下来的无机盐和氧化物。原料、蒸煮和干燥后的南极磷虾

表 1 南极磷虾热处理过程中脂肪酸组成及其相对含量的变化

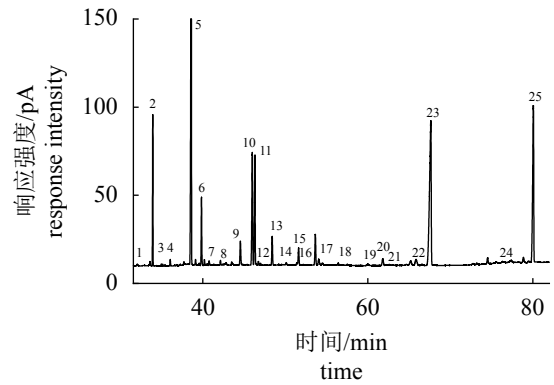
Tab. 1 Changes of fatty acid composition and relative content of *E. superba* during heat treatment

脂肪酸 fatty acid	原料 raw material	蒸煮 steaming	干燥 drying
C12:0	0.08±0.01 ^a	0.09±0.01 ^a	0.08±0.01 ^a
C14:0	5.52±0.13 ^a	5.86±0.17 ^{ab}	6.08±0.24 ^b
C15:0	0.29±0.01 ^a	0.31±0.01 ^a	0.34±0.01 ^b
C16:0	26.04±0.20 ^a	26.19±0.29 ^a	26.51±0.69 ^a
C17:0	0.07±0.01 ^a	0.12±0.01 ^{ab}	0.17±0.08 ^b
C18:0	1.82±0.03 ^c	1.65±0.07 ^b	1.31±0.06 ^a
C20:0	0.14±0.02 ^a	0.17±0.03 ^a	0.23±0.03 ^b
C22:0	0.23±0.01 ^a	0.24±0.01 ^{ab}	0.25±0.01 ^b
ΣSFA	34.18±0.03 ^a	34.63±0.36 ^a	34.97±0.57 ^a
C14:1	0.07±0.01 ^a	0.07±0.01 ^a	0.08±0.01 ^a
C16:1	3.49±0.10 ^a	3.61±0.21 ^a	3.73±0.36 ^a
C17:1	0.18±0.01 ^a	0.19±0.05 ^a	0.27±0.04 ^b
C18:1	16.04±0.15 ^a	15.78±0.18 ^a	16.95±0.08 ^b
C20:1	0.05±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a
C22:1	0.10±0.02 ^a	0.09±0.04 ^a	0.10±0.01 ^a
C24:1	0.32±0.02 ^c	0.27±0.02 ^b	0.21±0.02 ^a
ΣMUFA	20.25±0.07 ^a	20.07±0.34 ^a	21.38±0.32 ^b
C18:2	2.12±0.02 ^a	2.20±0.04 ^a	2.34±0.05 ^b
C18:3	1.88±0.03 ^a	1.86±0.05 ^a	2.06±0.05 ^b
C20:2	0.10±0.01 ^c	0.09±0.01 ^{ab}	0.09±0.01 ^a
C20:3	0.76±0.01 ^a	0.83±0.23 ^b	0.90±0.01 ^c
C20:4	1.25±0.18 ^a	1.13±0.16 ^a	0.93±0.21 ^a
C20:5(EPA)	24.31±0.33 ^b	23.90±0.20 ^b	22.74±0.37 ^a
C22:6(DHA)	15.15±0.08 ^b	15.29±0.33 ^b	14.61±0.21 ^a
ΣPUFA	45.57±0.09 ^b	45.30±0.39 ^b	43.65±0.34 ^a

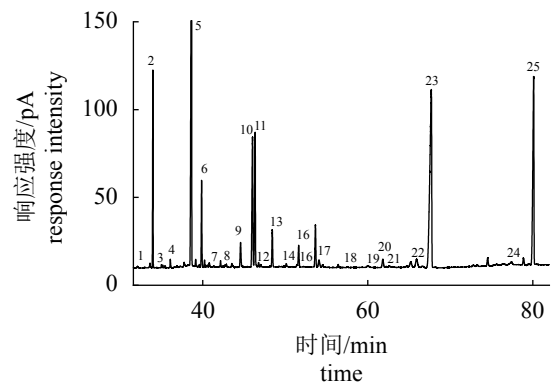
注：同行肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)；SFA. 饱和脂肪酸，MUFA. 单不饱和脂肪酸，PUFA. 多不饱和脂肪酸

Notes: in the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$). SFA. saturated fatty acid, MUFA. monounsaturated fatty acid, PUFA. polyunsaturated fatty acid

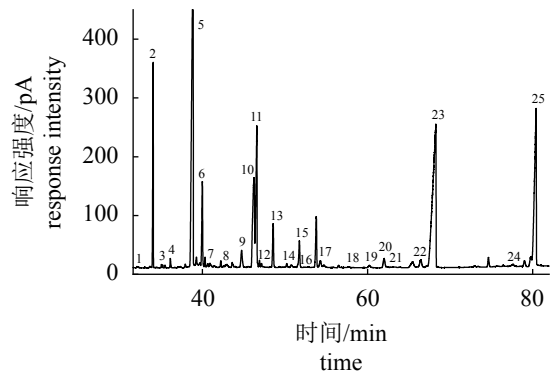
体内灰分含量依次为 16.57%、13.72% 和 12.87% (图 6)。随着加工的进行，灰分含量显著降低 ($P<0.05$)，蒸煮过程中灰分含量损失 2.85%，干燥过程中损失 0.85%。曹天明^[19] 在研究不同干燥方式下南极磷虾粉的灰分含量中指出，蒸煮灭酶会



(a)



(b)



(c)

图 4 南极磷虾热处理过程中的脂肪酸色谱图

(a) 原料, (b) 蒸煮, (c) 干燥。1. C12:0, 2. C14:0, 3. C14:1, 4. C15:0, 5. C16:0, 6. C16:1, 7. C17:0, 8. C17:1, 9. C18:0, 10. C18:1n9t, 11. C18:1n9c, 12. C18:2n6t, 13. C18:2n6c, 14. C20:0, 15. C18:3n6, 16. C20:1, 17. C18:3n3, 18. C20:2, 19. C22:0, 20. C20:3, 21. C22:1, 22. C20:4, 23. C20:5, 24. C24:1, 25. C22:6

Fig. 4 Fatty acid chromatogram of *E. superba* during heat treatment

(a) raw material, (b) steaming, (c) drying

使虾粉中灰分含量下降，可能的原因是蒸煮过程会造成虾粉中盐分的流失，导致其灰分含量的下降。而干燥过程对于灰分含量的影响相对较小。

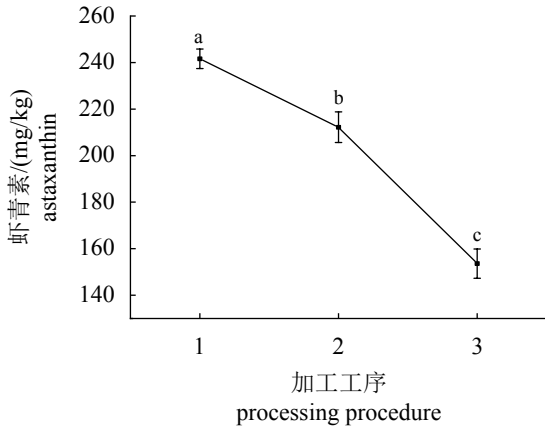


图5 南极磷虾热处理过程中虾青素含量的变化趋势

Fig. 5 Change trend of astaxanthin content in *E. superba* during heat treatment

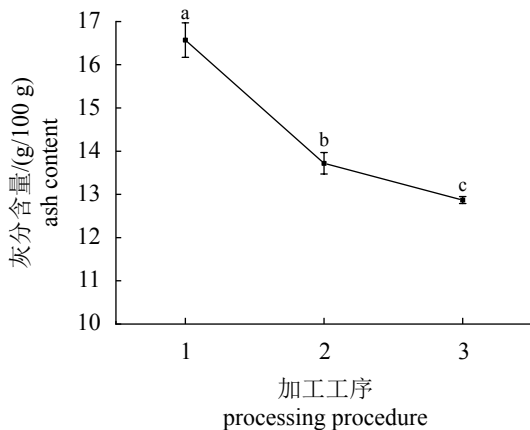


图6 南极磷虾热处理过程中灰分含量的变化趋势

Fig. 6 Change trend of ash content of *E. superba* during heat treatment

3 讨论

将磷虾加工成虾粉的主要目的,是在最大限度保持磷虾营养和功能成分的基础上,进行减量化处理,方便贮藏和运输,因此脱除水分是虾粉加工中最重要的方法之一^[21]。蛋白质作为南极磷虾体内含量最高的营养物质,在磷虾死后,有一部分会被蛋白酶分解。在蒸煮灭酶过程中,蛋白质主要流向蒸煮液或黏于托盘底部,流失1.12%。在干燥过程中,当温度、水分活度适宜时,南极磷虾物料中发生美拉德反应,蛋白质含量损失6.05%,下降明显。南极磷虾体内还含有丰富的脂质,其中多不饱和脂肪酸占比较高,因此在虾粉加工过程中,蒸煮和干燥也会造成磷虾脂质的氧化分解。虾青素是普遍存在于虾、蟹等水产品中的一种天然色素,南极

磷虾体内超过95%的色素是以虾青素形式存在的,是天然虾青素的良好来源。研究表明,虾青素具有预防心血管疾病、保护视力、抗衰老、提高人体免疫力和生育能力等诸多保健功能^[22-24],已被纳入保健食品的范畴。但同时虾青素也是一种热敏性物质,因此在热处理过程中,尤其是干燥过程中温度较高,虾青素流失较明显。灰分作为一种无机盐,蒸煮过程中盐分的流失是其损失的主要原因。

南极磷虾粉的品质与加工工艺密切相关,蒸煮、干燥的温度和时间等都是影响虾粉品质的主要因素。掌握虾粉加工过程中主要物质的变化情况及流向路径,可有针对性地通过工艺流程的改进、工艺参数的优化等来影响和控制物质的流向。针对蒸煮过程中蛋白质、脂质等物质的流向路径和特点,可采用快速加热、梯度蒸煮的方法^[25],让蛋白质在相对较低的温度和较短的时间内完成蛋白凝固,有效降低高温对细胞结构的破坏,从而减少汁液流失和水溶性蛋白的析出;也可以对蒸煮液进行回收,在干燥过程中分阶段把回收的蒸煮液加入干燥物料中,从而实现流失蛋白质及脂质的回收^[26]。针对干燥中的物质流向特点,可采用低温干燥、联合干燥的方法,减少物料在高温中的暴露时间,从而抑制美拉德反应的发生,减少干燥过程中蛋白质的流失。刘建君等^[27]研究了虾粉的生产方式对南极磷虾油品质的影响,探索一种能够兼顾生物活性物质和生产效率的南极磷虾粉生产方法,结果表明南极磷虾含水量高于10%,在80℃下烘干不会降低南极磷虾粉的品质。采用阶段式干燥,不仅能耗比低温干燥时减少24%,效率也提高将近1倍,因此认为阶段式干燥是一种低耗、高效,且能尽量保持南极磷虾体内生物活性物质的虾粉生产方法。在虾粉干燥前对磷虾进行一定程度的破碎,增大物料表面积,以达到提高干燥效率的目的,马田田等^[11]采用不同破碎方式处理南极磷虾,发现可以有效提升磷虾的干燥速率,从而减少干燥过程中的物质流失。

参考文献 (References):

[1] 朱国平. 南极磷虾种群生物学研究进展 I—年龄、生长与死亡[J]. 水生生物学报, 2011, 35(5): 862-868.

Zhu G P. Population biology of Antarctic krill *Euph-*

- ausia superba*. I-age, growth and mortality[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(5): 862-868(in Chinese).
- [2] 刘永新, 李梦龙, 方辉, 等. 南极磷虾的资源概况与生态系统功能[J]. *水产学杂志*, 2019, 32(1): 55-60.
Liu Y X, Li M L, Fang H, *et al.* Resources status and ecosystem function in Antarctic krill[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2019, 32(1): 55-60(in Chinese).
- [3] 谈俊晓, 赵永强, 李来好, 等. 南极磷虾综合利用研究进展[J]. *广东农业科学*, 2017, 44(3): 143-150.
Tan J X, Zhao Y Q, Li L H, *et al.* Research progress on comprehensive utilization of Antarctic krill[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2017, 44(3): 143-150(in Chinese).
- [4] 燕梦雅, 陈雪忠, 刘志东, 等. 南极磷虾来源酶的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(9): 368-373.
Yan M Y, Chen X Z, Liu Z D, *et al.* Research progress in enzyme derived from Antarctic krill[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(9): 368-373(in Chinese).
- [5] 韩银双, 张怵怵, 刘志东, 等. 南极磷虾甲壳素研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(3): 866-872.
Han Y S, Zhang B B, Liu Z D, *et al.* Research advances on chitin from Antarctic krill[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(3): 866-872(in Chinese).
- [6] 欧阳杰, 马田田, 沈建. 南极磷虾虾粉加工干燥技术与设备应用分析[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(16): 216-219, 282.
Ouyang J, Ma T T, Shen J. Analysis on drying technology and equipment application of Antarctic krill powder processing[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(16): 216-219, 282(in Chinese).
- [7] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3—2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 5009.3—2016 Determination of moisture in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2016 (in Chinese).
- [8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.4—2016 食品安全国家标准 食品中灰分的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 5009.4—2016 Determination of ash in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2016 (in Chinese).
- [9] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.5—2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 5009.5—2016 Determination of protein in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2016 (in Chinese).
- [10] 孙来娣, 高华, 刘坤, 等. 南极磷虾粉中虾青素的提取[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(3): 196-201.
Sun L D, Gao H, Liu K, *et al.* Optimization of extraction method of astaxanthin from Antarctic krill powder[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2013, 39(3): 196-201(in Chinese).
- [11] 马田田, 欧阳杰, 谈佳玉, 等. 破碎方式对南极磷虾干燥特性和虾粉品质影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(10): 37-42.
Ma T T, Ouyang J, Tan J Y, *et al.* Effect of crushing method on drying characteristics and shrimp powder quality of Antarctic krill[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(10): 37-42(in Chinese).
- [12] Folch J, Lees M, Sloane Stanley G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1957, 226(1): 497-509.
- [13] 韩迎雪, 林婉玲, 杨少玲, 等. 5种鲈形目淡水鱼肌肉脂肪酸及磷脂组成的研究[J]. *南方水产科学*, 2019, 15(1): 85-92.
Han Y X, Lin W L, Yang S L, *et al.* Composition of fatty acids and phospholipids in five Perciformes freshwater fish muscle[J]. *South China Fisheries Science*, 2019, 15(1): 85-92(in Chinese).
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.168—2016 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 5009.168—2016 Determination of fatty acids in food [S]. Beijing: China Standard Press, 2016 (in Chinese).
- [15] 孙雷, 周德庆, 盛晓风. 南极磷虾营养评价与安全性研究[J]. *海洋水产研究*, 2008, 29(2): 57-64.
Sun L, Zhou D Q, Sheng X F. Nutrition and safety evaluation of Antarctic krill[J]. *Marine Fisheries Research*, 2008, 29(2): 57-64(in Chinese).

- [16] 袁玥, 李学英, 杨宪时, 等. 南极磷虾粉营养成分的分析与比较[J]. *海洋渔业*, 2012, 34(4): 457-463.
Yuan Y, Li X Y, Yang X S, *et al.* Analysis and comparison on the nutritional components of different Antarctic krill meals[J]. *Marine Fisheries*, 2012, 34(4): 457-463(in Chinese).
- [17] 王凯欣, 欧阳杰, 沈建, 等. 热处理条件对南极磷虾酶活性的影响[J]. *渔业现代化*, 2019, 46(6): 76-82.
Wang K X, Ouyang J, Shen J, *et al.* Effect of heat treatment conditions on enzyme activity of Antarctic krill[J]. *Fishery Modernization*, 2019, 46(6): 76-82(in Chinese).
- [18] 姚正晓, 刘慧娟, 陈林, 等. 美拉德反应及其在食品工业中的应用[J]. *广州城市职业学院学报*, 2012, 6(1): 47-52.
Yao Z X, Liu H J, Chen L, *et al.* Maillard reaction and its application in food industry[J]. *Journal of Guangzhou City Polytechnic*, 2012, 6(1): 47-52(in Chinese).
- [19] 曹天明. 干制工艺对南极磷虾粉及酶法辅助溶剂法对南极磷虾油中脂质品质的影响 [D]. 大连: 大连工业大学, 2019.
Cao T M. Effect of dry process on lipid quality of Antarctic krill oil by Antarctic krill powder and enzymatic solvent method[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2019 (in Chinese).
- [20] 刘志东, 陈雪忠, 陈勇, 等. 南极磷虾脂质的研究进展[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(8): 348-355.
Liu Z D, Chen X Z, Chen Y, *et al.* Advances of research on the lipids from Antarctic krill (*Euphausia superba*)[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2015, 31(8): 348-355(in Chinese).
- [21] 孙德伟. 南极磷虾脂质分离制备与评价 [D]. 无锡: 江南大学, 2018.
Sun D W. Preparation and evaluation of Antarctic[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018 (in Chinese).
- [22] Chen Y C, Jaczynski J. Gelation of protein recovered from whole Antarctic krill (*Euphausia superba*) by iso-electric solubilization/precipitation as affected by functional additives[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(5): 1814-1822.
- [23] Yuan J P, Peng J, Yin K, *et al.* Potential health-promoting effects of astaxanthin: a high-value carotenoid mostly from microalgae[J]. *Molecular Nutrition and Food Research*, 2011, 55(1): 150-165.
- [24] Chen J T, Kotani K. Astaxanthin as a potential protector of liver function: a review[J]. *Journal of Clinical Medicine Research*, 2016, 8(10): 701-704.
- [25] 王凯欣. 南极磷虾热处理特性及梯度蒸煮技术研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
Wang K X. Study on heat treatment characteristics and gradient cooking technology of Antarctic krill[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020 (in Chinese).
- [26] 薛长湖, 姜晓明, 薛勇, 等. 一种富集脂质的南极磷虾粉及其制备方法: 中国, 201610045472.8[P]. 2016-06-08.
Xue C H, Jiang X M, Xue Y, *et al.* Euphausia superba powder with enriched lipid and preparing method thereof: CN, 201610045472.8[P]. 2016-06-08 (in Chinese).
- [27] 刘建君, 赵伟, 苏学锋, 等. 虾粉生产方式对南极磷虾油品质的影响[J]. *渔业现代化*, 2014, 41(6): 43-46.
Liu J J, Zhao W, Su X F, *et al.* Effect of production pattern of antarctic krill-meal on krill oil quality[J]. *Fishery Modernization*, 2014, 41(6): 43-46(in Chinese).

Flow direction of main nutrient substances in Antarctic krill (*Euphausia superba*) during heat treatment

ZHAO Xinyuan^{1,2}, OUYANG Jie^{2,3,4*}, MA Tiantian^{2,3}, BAI Zhen², SHEN Jian^{2,3,4}

- (1. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;
3. Dalian Polytechnic University, Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian 116034, China;
4. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: Shrimp meal is one of the most important processed products of Antarctic krill (*Euphausia superba*). During processing, heat treatment will cause the loss of nutrients and the destruction of active substances, which is the most important factor that determines the quality of shrimp meal. In order to grasp the changes and flow paths of the main substances during the processing of shrimp meal, by measuring the changes in the content of main nutrients such as moisture, ash, protein, lipid and the loss of functional components such as fatty acids and astaxanthin in the two key processes involving heat treatment, cooking and drying, the flow path and reasons for changes of each main substance were analyzed. The results showed that 8.49% of water was lost during the cooking process, and 63.5% of the water was lost during the drying process, mostly in the form of evaporation; the protein lost 1.12% during the cooking process, of which 0.87% flowed to the cooking liquid, and the loss was mainly water-soluble protein. The loss of 6.05% during the drying process; the lipids were reduced by 1.11% and 1.61% during the cooking and drying processes. Further analysis of the fatty acid composition revealed that the content of polyunsaturated fatty acids decreased from 45.57% to 43.65%. The relative content of EPA is reduced by 0.41% and 1.16% respectively during the drying process. The relative content of DHA does not change much during the cooking process, but is reduced by 0.68% during the drying process. Astaxanthin is a heat sensitive substance, which was affected by heat treatment and reduced by 29.4 and 58.6 mg/kg during the cooking and drying processes. The ash content was reduced by 2.85% and 0.85% during the cooking and drying process respectively; the results showed that the main substances lost during the cooking process were the soluble substances in the cooking liquor and a small part of the heat-sensitive substances, and the drying process mainly caused moisture evaporation and destruction of heat-sensitive substances such as astaxanthin. The study initially grasped the content changes and flow paths of the main substances during the processing of *E. superba* shrimp meal, analyzed the reasons for the changes and the main influencing factors, and discussed and proposed a plan to reduce the material loss, which can be used for the subsequent processing of Antarctic krill meal. The optimization of parameters provide a theoretical basis, which is of great significance for improving the quality of shrimp meal and promoting the high-quality utilization of *E. superba* resources.

Key words: *Euphausia superba*; processing technology; nutrient composition; lipid oxidation

Corresponding author: OUYANG Jie. E-mail: ouyangjie@fmiri.ac.cn

Funding project: National Key R & D Program Project (2018YFC1406804)