

不同解冻方式 对南极磷虾脂质品质的影响研究

陈京美^{1,2}, 刘小芳^{1,*}, 冷凯良¹, 苗钧魁¹, 高华², 赵宪勇¹, 侯钦帅^{1,2}, 张学超^{1,2}

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东青岛 266071;

2. 青岛大学药学院, 山东青岛 266021)

摘要: 以南极磷虾样品的甘油三酯含量、胆固醇含量、磷脂含量、游离脂肪酸含量、过氧化值、茴香胺值、虾青素含量和总脂肪酸组成等为衡量指标, 结合雷达图分析法综合评价了不同解冻方式(自然解冻、低温解冻、静水解冻、微波解冻)对南极磷虾脂质品质的影响。结果显示, 自然解冻、低温解冻、静水解冻、微波解冻的解冻时间分别为 210、450、90、5 min。不同解冻方式对南极磷虾脂质品质的影响存在差异, 其中, 经不同解冻方式处理后, 南极磷虾游离脂肪酸含量和虾青素含量差异显著 ($p < 0.05$), 游离脂肪酸含量在 20.8%~23.0% 之间, 虾青素含量在 391.7~429.9 $\mu\text{g/g}$ 之间。雷达图分析结果显示, 从脂质的开发利用角度考虑, 南极磷虾的解冻方式优先顺序为: 静水解冻 > 低温解冻 > 微波解冻 > 自然解冻。综合考虑产品脂质品质、解冻时间和能源消耗等因素, 南极磷虾陆基生产加工过程中, 以冻虾为原料开发制备南极磷虾油时, 应优先选用静水解冻的方式。

关键词: 南极磷虾; 解冻方式; 游离脂肪酸; 虾青素; 雷达图; 脂质品质变化

Effect of different thawing methods on lipid quality of Antarctic krill (*Euphausia superba*)

CHEN Jing-mei^{1,2}, LIU Xiao-fang^{1,*}, LENG Kai-liang¹, MIAO Jun-kui¹, GAO Hua²,

ZHAO Xian-yong¹, HOU Qin-shuai^{1,2}, ZHANG Xue-chao^{1,2}

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. College of Pharmacy, Qingdao University, Qingdao 266021, China)

Abstract: In the present study, the effects of different thawing methods (natural thawing, low-temperature thawing, still water thawing, microwave thawing) on lipid quality changes of Antarctic krill (*Euphausia superba*) were carried out by analyzing the content of triglyceride, total cholesterol, phospholipids, free fatty acids, peroxide value, anisidine value, astaxanthin content and total fatty acid composition, combined with radar chart analytical method. The results showed that the thawing time taken by natural thawing, low-temperature thawing, still water thawing, microwave thawing was 210, 450, 90 and 5 min respectively. And the lipid qualities of the krill exhibited differences after being treated by different thawing methods, while the contents of free fatty acids and astaxanthin in the krill showed significant differences. The contents of free fatty acids were between 20.8%~23.0% and astaxanthin were 391.7~429.9 $\mu\text{g/g}$. So, the contents of free fatty acids and astaxanthin would be the fast evaluation indexes for evaluating the lipid quality changes of the krill during the thawing process. The results of radar chart analysis showed that the evaluation results of thawing methods were ranked as still water thawing > low-temperature thawing > microwave thawing > natural thawing from the aspect of the development and utilization of lipids. Considering the factor of product quality, thawing time and energy consumption, still water thawing should be firstly chosen when extracting the krill oil using the frozen krill material during the process of land-based production.

Key words: Antarctic krill (*Euphausia superba*); thawing methods; free fatty acid; astaxanthin; radar chart; lipid quality changes

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)02-0146-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.02.019

收稿日期: 2016-06-28

作者简介: 陈京美(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与综合利用, E-mail: cjm1627064733@163.com。

* 通讯作者: 刘小芳(1987-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 水产品加工与综合利用, E-mail: liuxiaofang@ysfri.ac.cn。

基金项目: 青岛市应用基础研究计划项目(15-9-1-113-jch); 农业部南极海洋生物资源开发利用项目(2016年度); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ02-02)。

南极磷虾(*Euphausia superba*) 隶属于节肢动物门、甲壳纲、磷虾目,是南大洋最大的单种生物资源,生物量巨大,约为6.5~10.0亿吨,生物学年可捕量约为1亿吨,相当于目前世界现有渔业产量的总和^[1]。南极磷虾富含蛋白质、人体所必需的全部氨基酸及钙、钾、镁、碘等多种矿质元素,还含有磷酸化蛋白肽^[2]、EPA/DHA 磷脂^[3]、虾青素酯^[4]等功能性食品成分,营养价值极高。作为海洋优质蛋白和活性脂质的新资源宝库,南极磷虾已经成为世界远洋捕捞业最重要的开发对象。

新鲜捕获的南极磷虾除少部分被加工为南极磷虾粉外,大部分需经快速冻结后冷链运输至陆地进行后续生产加工。解冻过程是以南极磷虾冻虾为原料进行陆基加工的首要环节。解冻过程中,蛋白质变性、脂肪的水解氧化以及微生物作用等都会造成南极磷虾品质发生劣变^[5-6]。目前,解冻方式对南极磷虾品质的影响多集中于蛋白质、微生物等指标评价方面^[7-8],而对于南极磷虾脂质组成的影响尚未见系统性报道,亟需研究阐明。

雷达图分析法,是一种典型的图形评价方法,是基于评价对象构建的多变量的对比分析方法,能够直观、形象地反映评价对象的综合特性^[9]。雷达图是解决综合评价问题的良好辅助工具。目前,我国学者已将雷达图分析法应用于农作物的品种质量综合评价^[10-12]、医院药品不良反应的评价^[13]和电能质量综合评价^[14]等方面。本文应用雷达图分析法,从南极磷虾脂质开发利用角度出发,以甘油三酯(TG)含量、胆固醇(TC)含量、磷脂(PL)含量、游离脂肪酸(FFA)含量、过氧化值(POV)、茴香胺值(AV)、虾青素含量和总脂肪酸组成等为衡量指标,对自然解冻、低温解冻、静水解冻和微波解冻四种解冻方式进行综合评价和对比分析,构建基于雷达图面积和周长的综合评价函数,给出综合评价结果,确定南极磷虾最佳的解冻方式。本研究将有效指导以南极磷虾冻虾为基础的陆基磷虾油的生产加工,同时也将为其其他冷冻水产品解冻方式的研究提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

南极磷虾“南极海洋生物资源开发与利用”项目组于2015年5月捕捞于南极FAO 48.1区,捕捞后迅速冻结,于-20℃条件下储藏运输,2015年7月运至实验室后,贮藏于-80℃冰箱中备用;37种脂肪酸混标 美国Sigma公司;甘油三酯试剂盒、胆固醇试剂盒 北京中生北控生物科技有限公司;氯仿、甲醇、正己烷 均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

7820型气相色谱仪 美国Agilent公司;SPX-8085H-II生化培养箱 上海新苗医疗器械制造有限公司;UV-2000紫外分光光度计 尤尼柯(上海)仪器有限公司;BAS224S-CW电子天平 北京赛多利斯科学仪器有限公司;RE-52AA旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂;WP750L23-6型微波炉 顺德市格

兰仕微波炉电器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 南极磷虾解冻工艺 南极磷虾每组取约300g,样品规格约为9cm×7cm×5cm,采用自然解冻、低温解冻、静水解冻和微波解冻四种解冻方式解冻,当虾块可以掰断,且断裂处南极磷虾个体较完整时为解冻完成,记录解冻时间。

1.2.1.1 自然解冻 将虾块用包装袋包好,置于自然空气中,温度控制为(20±0.1)℃。

1.2.1.2 低温解冻 将虾块用包装袋包好,置于高精度培养箱中,温度控制为(4±0.1)℃。

1.2.1.3 静水解冻 将虾块用包装袋包好,置于水中,完全浸泡,温度控制为(20±0.1)℃。

1.2.1.4 微波解冻 将虾块置于托盘中,放入微波炉,在中低温(M.Low)条件下进行微波解冻。

1.2.2 测定和评价方法 参照文献[15]方法测定总脂中TG含量、TC含量、PL含量、FFA含量和虾青素含量;POV的测定按照GB/T 5009.37-2003食用植物油卫生标准的分析方法中的比色法执行;AV的测定按照GB/T 24304-2009动植物油脂茴香胺值的规定执行。

参照文献[16]方法进行总脂脂肪酸组成分析:油脂样品经甲酯化处理后,用安捷伦GC7820型气相色谱仪测定脂肪酸组成,采用峰面积归一化法进行定量分析。色谱条件:INNOWAX石英毛细管柱(0.32mm×30m×0.25μm),检测器采用FID检测器,载气为氮气,流速为1mL/min;进样口参数:进样口温度240℃,分流比15:1,进样量1μL;FID检测器参数:检测器温度250℃,氢气流速40mL/min,空气流速450mL/min,尾吹氮气流速40mL/min;升温程序:起始温度170℃,以3℃/min升温至210℃,保持30min。

1.2.3 雷达图综合评价分析步骤

1.2.3.1 建立评价对象的评估指标体系,对评价指标进行标准化处理。选取TG、TC、PL、虾青素、FFA、POV、AV、单不饱和脂肪酸总量(MUFA)和多不饱和脂肪酸总量(PUFA)作为评价指标,对评价指标数据进行标准化处理,具体处理方法为:正向指标和逆向指标按照公式(1)进行标准化处理,将值约束在[0,1]范围内。

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{r_{ij}}{\max r_{ij}} & \text{正向指标} \\ 1 - \frac{r_{ij}}{\max r_{ij}} & \text{逆向指标} \end{cases} \quad \text{式(1)}$$

其中 r_{ij} 为各评价指标数值, r'_{ij} 为各评价指标转换值。

1.2.3.2 雷达图的绘制 对于每种解冻方式,相应雷达图中均有一个独立的数轴对应每个指标数值,数轴呈辐射状分布在中心点周围,把不同数轴上的指标数值用折线连接起来所形成的多边形就是雷达图,此图可以直观的反映不同解冻方式处理对南极磷虾脂质品质的影响程度。

1.2.3.3 特征量的计算 为了全面反映经不同解冻

方式处理后南极磷虾脂质的综合水平及各个评价指标的均衡性,引入雷达图的面积(S_i)和周长(L_i)两个特征量,构造一个二维特征量来计算综合评价函数值。然而,需要注意的是,当评价指标数确定而评价指标在雷达图中排序发生变化时,雷达图的形状、面积和周长随之也发生变化,导致结果具有“不唯一性”。解决这个问题的办法是:首先,在评价同一类对象时采用统一的指标体系;其次,在描绘雷达图时对指标采用相同的排序^[17]。

在由 m 个指标构成的雷达图中,其面积由 m 个三角形组成,根据公式(2)、(3)计算出各解冻方式雷达图的面积和周长。

$$S_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{2} N_{ij} N_{i(j+1)} \sin \alpha \quad \text{式(2)}$$

$$L_i = \sum_{j=1}^m \sqrt{N_{ij}^2 + N_{i(j+1)}^2 - 2N_{ij} N_{i(j+1)} \cos \alpha} \quad \text{式(3)}$$

其中 S_i 表示面积, L_i 表示周长, m 为评价指标数, α 为相邻射线轴之间的夹角。

1.2.3.4 评价函数构造和综合评价 以特征向量 S_i 、 L_i 为基础,构造一个评价向量。令 V_i 表示第 i 个评价对象雷达图的评价向量,则

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}) \quad (i=1, 2, 3, \dots, n)$$

其中,

$$v_{i1} = S_i / S_{\max}; S_{\max} = \max S_i \quad \text{式(4)}$$

$$v_{i2} = \frac{S_i}{\pi (L_i / 2\pi)^2} \quad \text{式(5)}$$

在评价向量中, v_{i1} 为第 i 个对象的雷达图面积的归一化系数,反映了雷达图面积的相对大小,其数值越大,说明该评价对象的总体优势越强,反之则较弱。 v_{i2} 为第 i 个评价对象的雷达图面积与具有相同周长的圆面积的比值,反映了评价对象的各项指标的协调发展程度,其值越大,说明评价对象的各项指标均衡性越好,反之则较差。

最后,根据评价向量构造综合评价函数,并根据评价函数计算各评价对象的评价值 Y 。

$$Y = \sqrt{v_{i1} \times v_{i2}} \quad \text{式(6)}$$

1.3 数据处理

实验结果以平均值 \pm 标准偏差 (Mean \pm SD) 表示,采用 SPSS 20.0 软件进行方差分析,不同解冻方式处理组间采用 one-way ANOVA (Tukey's test) 进行两两比较分析,以 $p < 0.05$ 为具有统计学意义上的显著差异。

2 结果与讨论

2.1 解冻方式对南极磷虾解冻时间的影响

不同解冻方式处理下,南极磷虾的解冻时间如图1所示。由图1可知,不同解冻条件下,南极磷虾冻虾的解冻时间差异显著。低温解冻所用时间最长,为 450 min,微波解冻所用时间最短,为 5 min,自然解冻和静水解冻时间分别为 210 min 和 90 min。不同解冻方式因解冻环境温度和解冻机制不同,达到解冻终点所需的时间不同。解冻时间与迟海^[18]和曹荣^[19]等的研究结果存在差异,可能受解冻环境温度和南极磷虾冻块大小的影响。

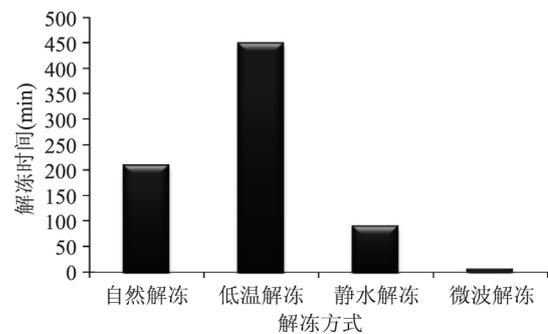


图1 不同解冻方式对南极磷虾解冻时间的影响

Fig.1 Effect of different thawing methods

on thawing time of Antarctic krill (*Euphausia superba*)

2.2 解冻方式对南极磷虾脂质品质的影响

南极磷虾在解冻过程中脂质易发生水解和氧化反应, TG 含量、TC 含量、PL 含量等指标能够反映脂质组成的变化情况, FFA 含量能够反映脂质的水解程度, POV、AV 以及虾青素含量等指标可以反映脂质的氧化程度。

表1为不同解冻方式对南极磷虾脂质品质的影响分析结果,由表1可知,不同解冻方式对南极磷虾脂质组成影响不同,不同解冻方式处理后南极磷虾 TG 含量在 40.6%~43.5% 之间, TC 含量在 1.86%~2.06% 之间, PL 含量在 34.5%~35.7% 之间, POV 值在 2.21~2.42 meq/kg 之间, AV 值在 6.14~6.58 之间, 虾青素含量在 391.7~429.9 $\mu\text{g/g}$ 之间, FFA 含量在 20.8%~23.0% 之间。不同解冻方式, TG、TC、PL、POV 和 AV 指标值差异不显著, 虾青素和 FFA 含量差异显著 ($p < 0.05$), 说明解冻方式对虾青素和 FFA 含量影响较大。经过自然解冻或微波解冻后, 南极磷虾虾青素含量较静水解冻和低温解冻方式低, FFA 含量较高, 另外, 微波解冻后磷虾冻块表面出现熟透现象。自然解冻和微波解冻这两种解冻方式处理后, 南极磷虾脂质劣变程度显著高于其它两组, 推测可能与自然解冻环境温度高和解冻时间长, 微波解冻过程产生高能量等原因有关。由以上结果可知, 虾青素和 FFA 含量的变化可以作为南极磷虾解冻过程中脂质品质变化的快速评价指标。

南极磷虾在解冻过程中 FFA 含量变化显著, 提示脂质水解反应的发生。孙志强^[20]、闫瑾^[21]等研究发现, 鱼粉和草鱼等水产品贮藏和加工过程中均存在脂质水解的现象, FFA 含量随着贮藏时间的延长而增加, 这可能与水产品内源性脂肪酶作用下脂质发生水解反应有关。经不同解冻方式处理后, 南极磷虾 POV 和 AV 差异较小, 但虾青素含量变化显著, 说明虾青素首先发生了氧化分解, 虾青素在一定程度上抑制了解冻过程中其他脂质成分氧化反应的发生。Naguib^[22]的研究指出, 虾青素的抗氧化能力高于 β -胡萝卜素、维生素 E、叶黄素和番茄红素, 是目前抗氧化能力较强的一种天然抗氧化剂, 其可通过淬灭单线态氧、消除自由基^[23-25]等途径发挥抗氧化作用, 从而抑制不饱和脂肪酸酯、磷脂酰胆碱等脂质过氧化^[26-29]。

表1 不同解冻方式处理后脂质评价指标测定结果

Table 1 The results of lipids evaluation indexes with different thawing methods

评价指标	自然解冻	低温解冻	静水解冻	微波解冻
TG(%)	40.8 ± 4.00	43.5 ± 1.34	41.3 ± 2.43	40.6 ± 0.71
TC(%)	1.86 ± 0.15	1.97 ± 0.02	2.06 ± 0.16	2.01 ± 0.03
PL(%)	34.5 ± 0.70	35.2 ± 0.40	35.7 ± 0.40	35.2 ± 0.68
虾青素(μg/g)	391.7 ± 1.49 ^a	404.4 ± 0.60 ^b	429.9 ± 3.55 ^c	408.6 ± 2.43 ^b
FFA(%)	23.0 ± 0.34 ^a	20.8 ± 0.18 ^b	21.5 ± 0.18 ^b	22.5 ± 0.48 ^a
POV(meq/kg)	2.21 ± 0.03	2.42 ± 0.08	2.22 ± 0.06	2.27 ± 0.08
AV	6.58 ± 0.36	6.45 ± 0.30	6.14 ± 0.69	6.58 ± 0.79

注:不同字母标识代表不同解冻方式处理组间具有显著性差异($p < 0.05$);表2同。

表2 不同解冻方式处理后总脂脂肪酸组成分析结果(%)

Table 2 Fatty acid composition of total lipids with different thawing methods(%)

脂肪酸	自然解冻	低温解冻	静水解冻	微波解冻
C12:0	0.17 ± 0.02	0.18 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.17 ± 0.01
C13:0	0.06 ± 0.00	0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.00	0.06 ± 0.00
C14:0	8.10 ± 0.12	8.06 ± 0.46	7.31 ± 0.01	7.99 ± 0.24
C14:1	0.14 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.14 ± 0.00
C15:0	0.32 ± 0.00 ^a	0.31 ± 0.01 ^{ab}	0.29 ± 0.01 ^b	0.30 ± 0.01 ^{ab}
C16:0	21.61 ± 0.19	21.00 ± 0.47	20.86 ± 0.07	21.26 ± 0.26
C16:1	4.68 ± 0.19	4.62 ± 0.12	4.51 ± 0.00	4.84 ± 0.06
C17:1	0.38 ± 0.02	0.37 ± 0.01	0.37 ± 0.01	0.38 ± 0.01
C18:0	1.23 ± 0.07	1.19 ± 0.01	1.22 ± 0.03	1.17 ± 0.00
C18:1	15.86 ± 0.15	15.71 ± 0.04	15.62 ± 0.03	15.75 ± 0.10
C18:2(n-6)	1.62 ± 0.06	1.59 ± 0.01	1.68 ± 0.02	1.63 ± 0.03
C18:3(n-6)	0.23 ± 0.05	0.19 ± 0.00	0.27 ± 0.03	0.24 ± 0.01
C18:3(n-3)	1.71 ± 0.09 ^a	1.81 ± 0.01 ^{ab}	1.98 ± 0.07 ^b	1.77 ± 0.01 ^{ab}
C20:0	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.10 ± 0.09	0.04 ± 0.01
C20:1	1.29 ± 0.00	1.35 ± 0.03	1.47 ± 0.27	1.32 ± 0.05
C20:2	0.35 ± 0.01	0.43 ± 0.11	0.51 ± 0.22	0.36 ± 0.03
C20:3	0.15 ± 0.01	0.17 ± 0.03	0.19 ± 0.04	0.16 ± 0.00
C20:4	0.37 ± 0.02 ^{ab}	0.35 ± 0.00 ^a	0.39 ± 0.01 ^b	0.37 ± 0.00 ^{ab}
C21:0	0.20 ± 0.00	0.22 ± 0.00	0.21 ± 0.01	0.20 ± 0.00
C20:5(EPA)	25.94 ± 0.20	26.14 ± 0.54	26.20 ± 0.47	26.00 ± 0.42
C22:2	1.24 ± 0.15	1.32 ± 0.10	1.52 ± 0.13	1.37 ± 0.06
C24:1	0.94 ± 0.01	0.90 ± 0.03	0.94 ± 0.02	0.90 ± 0.00
C22:6(DHA)	13.39 ± 0.44	13.86 ± 0.33	14.05 ± 0.22	13.58 ± 0.25
SFA	31.71 ± 0.27	31.05 ± 0.97	30.19 ± 0.17	31.19 ± 0.53
MUFA	23.29 ± 0.02	23.09 ± 0.12	23.04 ± 0.28	23.33 ± 0.20
PUFA	45.00 ± 0.29	45.86 ± 1.09	46.77 ± 0.45	45.48 ± 0.73

2.3 解冻方式对南极磷虾总脂脂肪酸组成的影响

采用气相色谱法对南极磷虾总脂的脂肪酸组成进行了检测分析,结果见表2,共检测出23种脂肪酸,碳原子数在12~24之间,其中饱和脂肪酸8种,不饱和脂肪酸15种。南极磷虾经不同解冻方式处理后,总脂的脂肪酸组成存在差异,其中C15:0、C18:3(n-3)和C20:4含量差异显著($p < 0.05$)。静水解冻后,南极磷虾总脂中多不饱和脂肪酸含量最高,为46.77%,其次为低温解冻、微波解冻,含量分别为45.86%、45.48%,自然解冻处理后多不饱和脂肪酸含量最低,为45.00%,推测可能由于受温度和

解冻时间的影响,自然解冻过程中多不饱和脂肪酸发生轻微氧化造成。

2.4 雷达图法综合评价

本研究中选取的TG、TC、PL、虾青素、FFA、POV、AV、MUFA和PUFA九个脂质分析指标可从不同角度反映不同解冻处理对南极磷虾脂质品质的影响状况,而这些指标的有效组合则可以反映南极磷虾脂质品质的总体状况。雷达图分析法是一种多变量的分析方法,因此,采用雷达图分析法综合评价不同解冻方式处理对南极磷虾脂质品质造成的影响。

2.4.1 各评价指标的无量纲化处理 进行雷达图分

表3 评价指标的无量纲化处理结果

Table 3 Dimensionless processing results of evaluation indexes

解冻方式	TG (%)	TC (%)	PL (%)	虾青素 ($\mu\text{g/g}$)	MUFA (%)	PUFA (%)	FFA (%)	POV (meq/kg)	AV
自然解冻	0.94	0.90	0.97	0.91	1.00	0.96	0.00	0.09	0.00
低温解冻	1.00	0.96	0.99	0.94	0.99	0.98	0.09	0.00	0.02
静水解冻	0.95	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.06	0.08	0.07
微波解冻	0.93	0.98	0.99	0.95	1.00	0.97	0.02	0.06	0.00

表4 不同解冻方式雷达图综合评价结果

Table 4 Radar chart comprehensive evaluation results of different thawing methods

解冻方式	面积	周长	V_{i1}	V_{i2}	Y	编号
自然解冻	1.4382	5.3202	0.8858	0.6385	0.7521	4
低温解冻	1.5571	5.3376	0.9591	0.6868	0.8116	2
静水解冻	1.6351	5.3626	1.0071	0.7145	0.8483	1
微波解冻	1.5219	5.3227	0.9374	0.6751	0.7955	3

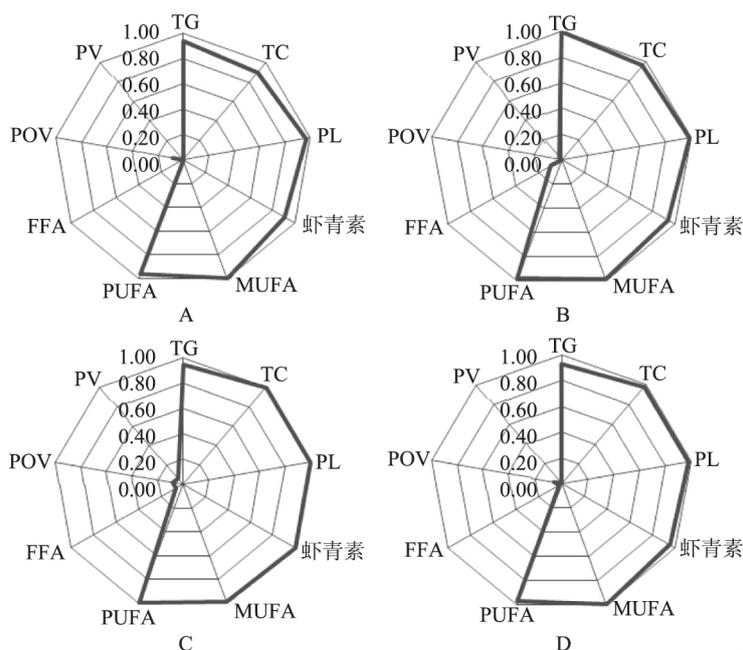


图2 南极磷虾自然解冻(A)、低温解冻(B)、静水解冻(C)和微波解冻(D)雷达图

Fig.2 Radar chart of natural thawing, low-temperature thawing, still water thawing and microwave thawing of Antarctic Krill (*Euphausia Superba*)

析之前首先对评价指标数据进行标准化处理,将值约束在 $[0, 1]$ 范围内。本研究选取TG、TC、PL、虾青素、FFA、POV、AV、MUFA和PUFA作为评价指标,其中,TG、TC、PL、MUFA、PUFA和虾青素等指标的值越大越好,属于正向指标;FFA、POV和AV等指标值越小越好,属逆向指标。按照公式(1)对各指标进行标准化处理,标准化处理结果见表3。由表3可知,不同解冻方式的正向评价指标和逆向评价指标的数值差异较大,表中标准化处理后的数值越接近1,表明南极磷虾脂质品质越好。

2.4.2 雷达图的绘制 基于表3数据,应用Excel 2010绘制四种解冻方式的雷达图,结果见图2。图2中A、B、C、D可直观反映经自然解冻、低温解冻、静水解冻和微波解冻等不同解冻方式处理后南极磷虾脂质的品质状况,图中各评价指标数值越接近1表

明南极磷虾脂质品质越好。总体而言,低温解冻和静水解冻的总面积较大,经此两种解冻方式处理后,南极磷虾脂质的品质要明显优于其他两种解冻方式。

2.4.3 南极磷虾脂质评价指标的雷达图综合评价结果 为了全面反映经不同解冻方式处理后南极磷虾脂质的综合水平及各个评价指标的均衡性,引入雷达图的面积和周长两个特征量,构造一个二维特征量来计算综合评价函数值。

根据公式(2)~公式(6)计算出各评价对象的综合评价函数值,具体结果见表4。由表4可知,从评价向量 V_{i1} 和 V_{i2} 可以看出,静水解冻的 V_{i1} 和 V_{i2} 值最高,表明静水解冻总体优势最强,且其均衡性程度最高。根据评价函数值Y的大小,可得出不同解冻方式的综合排序为静水解冻>低温解冻>微波解冻>

自然解冻。

3 结论

3.1 南极磷虾经不同解冻方式处理,解冻时间差异显著,其中,低温解冻(450 min) > 自然解冻(210 min) > 静水解冻(90 min) > 微波解冻(5 min)。不同解冻方式因解冻环境温度和解冻机制不同,导致达到解冻终点所需的时间有所不同。

3.2 南极磷虾在解冻过程中品质发生改变,脂质发生水解和氧化变化。经不同解冻方式处理后,南极磷虾虾青素含量和FFA含量差异显著($p < 0.05$),二者可以作为解冻过程中南极磷虾脂质品质劣变的指示指标。

3.3 应用雷达图分析法,对不同解冻方式对南极磷虾脂质品质的影响进行了综合评价,南极磷虾的解冻方式优先顺序为:静水解冻 > 低温解冻 > 微波解冻 > 自然解冻,静水解冻总体优势最强,且其均衡性程度最高。因此,通过雷达图综合分析结果,结合解冻时间和经济成本等因素考虑,采用冻虾提取南极磷虾油时适宜采用静水解冻原料的方式,可以最大程度降低脂质的水解和氧化,保证终端产品—南极磷虾油的品质。

参考文献

[1] Tou JC, Jaczynski J, Chen YC. Krill for human consumption: Nutrition value and potential health benefits [J]. *Nutrition Reviews* 2007 65(2): 63-67.

[2] Wang Y, Wang S, Wang J, et al. Preparation and anti-osteoporotic activities *in vivo* of phosphorylated peptides from Antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. *Peptides*, 2014, 68: 239-245.

[3] Winther B, Hoem N, Berge K, et al. Elucidation of phosphatidylcholine compositions in krill oil extracted from *Euphausia superba* [J]. *Lipids* 2011 46(1): 25-36.

[4] Takaichi S, Matsui K, Nakamura M, et al. Fatty acids of astaxanthin esters in krill determined by mild mass spectrometry [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B* 2003, 136(2): 317-322.

[5] Xia X, Kong B, Jing L, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle [J]. *LWT Food Science and Technology* 2012 46(1): 280-286.

[6] Foegeding A, Lanier C, Hultin O. Characteristics of edible muscle tissues [M]. In O.R. Fennema (Ed.), *Food Chemistry*. New York: Marcel Dekker, 1996.

[7] 迟海, 杨峰, 杨宪时, 等. 不同解冻方式对南极磷虾品质的影响 [J]. *现代食品科技* 2011 27(11): 1291-1295.

[8] 刘会省, 迟海, 杨宪时, 等. 解冻方法对船上冻结南极磷虾品质变化的影响 [J]. *食品与发酵工业* 2014 40(2): 51-54.

[9] 郭鹏军, 郭鹏辉, 吴晨曦, 等. “雷达图”分析法在医院绩效评价中的应用 [J]. *经营管理* 2009 6(22): 171-172.

[10] 魏春阳, 王信民, 蔡宪杰, 等. 基于雷达图的烤烟外观质量综合评价 [J]. *烟草科技* 2008(12): 57-60.

[11] 马剑雄, 张强, 欧阳文, 等. 美国引进烤烟品种 NC297 和

NC102 的香韵特征分析 [J]. *中国烟草学报* 2010, 16(B12): 22-27.

[12] 刘魁, 王元英, 罗成刚, 等. 雷达图分析法在烤烟品种实验中的应用 [J]. *中国烟草科学* 2010 31(6): 64-67.

[13] 赵雪丽, 郑咏池, 任强. “雷达图”分析法在我院药品不良反应评价中的应用 [J]. *中国药房* 2015(5): 656-658.

[14] 乔鹏程, 吴正国, 李辉. 基于改进雷达图法的电能质量综合评估方法 [J]. *电力自动化设备* 2011 31(6): 88-92.

[15] 楼乔明, 王玉明, 杨文鸽, 等. 南极磷虾粉脂质及脂肪酸组成分析 [J]. *水产学报* 2012 36(8): 1256-1262.

[16] 刘艳青, 李兆杰, 李国云, 等. 雌、雄皱纹盘鲍内脏脂肪酸及磷脂组成的比较分析 [J]. *食品科学* 2013, 34(10): 184-186.

[17] 成洪俊, 朱雪平. 基于雷达图法的防空武器系统战斗力可视化评估 [J]. *火力与指挥控制* 2015 40(5): 124-127.

[18] 迟海, 杨峰, 杨宪时, 等. 不同解冻方式对南极磷虾品质的影响 [J]. *现代食品科技* 2011 27(11): 1291-1295.

[19] 曹荣, 陈岩, 赵玉然, 等. 解冻方式对南极磷虾加工品质的影响 [J]. *农业工程学报* 2015 31(17): 289-294.

[20] 孙志强, 过世东. 储存期间鱼粉中脂质的劣变规律 [J]. *中国粮油学报* 2015 30(3): 90-93.

[21] 闫瑾. 草鱼腌制、风干工艺及其加工过程中脂质氧化研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学 2014.

[22] Naguib Y M A. Antioxidant Activities of Astaxanthin and Related Carotenoids [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry* 2000 48(4): 1150-1154.

[23] Cross C E, Halliwell B, Borish E T, et al. Oxygen radicals and human disease. [J]. *Annals of Internal Medicine* 1987, 107(4): 526-545.

[24] Tinkler J H, Böhm F, Schalch W, et al. Dietary carotenoids protect human cells from damage [J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology B Biology* 1994 26(3): 283-285.

[25] Hosaka S, Obuki M, Nakajima J, et al. Comparative study of antioxidants as quenchers or scavengers of reactive oxygen species based on quenching of MCLA-dependent chemiluminescence [J]. *Luminescence* 2005 20(6): 419-427.

[26] Kurashige M, Okimasu E, Inoue M, et al. Inhibition of oxidative injury of biological membranes by astaxanthin [J]. *Physiological Chemistry & Physics & Medical Nmr* 1990 22(1): 27-38.

[27] Nakagawa K, Kang S D, Park D K, et al. Inhibition of beta-carotene and astaxanthin of NADPH-dependent microsomal phospholipid peroxidation. [J]. *Journal of Nutritional Science & Vitaminology* 1997 43(3): 345-355.

[28] Jørgensen K, Skibsted L H. Carotenoid scavenging of radicals. Effect of carotenoid structure and oxygen partial pressure on antioxidative activity [J]. *Zeitschrift für Lebensmittel - Untersuchung und -Forschung* 1993, 196(196): 423-429.

[29] Woodall A A, Britton G, Jackson M J. Carotenoids and protection of phospholipids in solution or in liposomes against oxidation by peroxy radicals: Relationship between carotenoid structure and protective ability [J]. *Biochimica Et Biophysica Acta General Subjects* 1997, 1336(3): 575-586.