

不同体长南极磷虾的脂质组成差异分析

李雅婷^{1,2}, 刘小芳², 姜维¹, 王新良², 应一平², 冷凯良^{2,3}

(1. 浙江海洋大学 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山 316022; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部极地渔业可持续利用重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋药物与生物制品功能实验室, 山东 青岛 266200)

摘要:旨在为南极磷虾渔业捕捞以及陆基精准加工利用提供科学指导,研究了不同体长南极磷虾的脂质组成差异。以脂质含量、甘油酯含量、磷脂含量、胆固醇含量、游离脂肪酸含量、磷脂组成和脂肪酸组成为评价指标,结合多元统计分析技术比较不同体长(<30 mm、30~40 mm、40~50 mm、>50 mm)南极磷虾脂质组成的差异。结果显示:不同体长南极磷虾脂质含量占干基的(17.57±2.43)%~(24.35±0.31)%;甘油酯和磷脂是主要的脂质组分,分别占脂质的(41.40±1.22)%~(43.54±2.02)%和(39.70±0.70)%~(41.89±2.69)%;磷脂主要由磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰乙醇胺(PE)和溶血磷脂酰胆碱(LPC)组成,分别占总磷脂的(80.04±0.73)%~(85.94±0.58)%、(13.13±0.59)%~(19.17±0.75)%、(0.79±0.05)%~(1.16±0.03)%;脂质中主要脂肪酸为C14:0、C16:0、C18:1、C20:5(EPA)、C22:6(DHA),分别占总脂肪酸含量的(12.00±0.37)%~(12.85±0.15)%、(24.64±0.15)%~(27.11±0.16)%、(13.21±0.35)%~(15.09±0.14)%、(18.41±0.18)%~(18.86±0.56)%、(10.17±0.18)%~(12.84±0.16)%;不同体长南极磷虾的脂质含量、磷脂中PC和PE比例、脂肪酸中C16:0、C18:1和DHA比例等总体差异显著($p < 0.05$)。结合聚类分析和主成分分析,根据体长可将南极磷虾样品明显区分为<30 mm、30~40 mm、>40 mm 3 大类。研究结果表明南极磷虾的脂质组成与其体长关系显著。

关键词:南极磷虾;体长;脂质组成;多元统计分析

中图分类号:TS222+.3; TS254.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)12-0090-07

Comparative analysis of the lipid compositions of Antarctic krill (*Euphausia superba*) with different body lengths

LI Yating^{1,2}, LIU Xiaofang², JIANG Wei¹, WANG Xinliang²,
YING Yiping², LENG Kailiang^{2,3}

(1. National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Development of Polar Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Laboratory for Marine Drugs and Bioproducts, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266200, Shandong, China)

Abstract: The lipid compositions of Antarctic krill (*Euphausia superba*) with different body lengths were comparatively studied to provide scientific guidance for the fishery harvesting and land-based accurate utilization of the Antarctic krill. Antarctic krill samples were divided into four groups according to the

收稿日期:2021-09-03;修回日期:2022-07-18

基金项目:国家自然科学基金(32001770)

作者简介:李雅婷(1996),女,在读硕士,研究方向为渔业资源加工与综合利用(E-mail)liy420@163.com。

通信作者:刘小芳,副研究员,博士(E-mail)liuxiaofang@ysfri.ac.cn。

body lengths (<30 mm, 30-40 mm, 40-50 mm, >50 mm), and the lipid content, glyceride content, phospholipid content, cholesterol content, free fatty acid content, phospholipid composition as well as fatty acid composition of the samples were used as evaluation indicators, the differences

of the lipid compositions of the four group samples were compared combined with multivariate statistical analysis technology. The results showed that the lipid contents of the Antarctic krill with different body lengths were $(17.57 \pm 2.43)\%$ - $(24.35 \pm 0.31)\%$ of dry basis. Glyceride and phospholipid were the main lipid components, accounting for $(41.40 \pm 1.22)\%$ - $(43.54 \pm 2.02)\%$ and $(39.70 \pm 0.70)\%$ - $(41.89 \pm 2.69)\%$ of the lipid, respectively. Phospholipid was mainly composed of phosphatidylcholine (PC), phosphatidylethanolamine (PE) and lysophosphatidylcholine (LPC), accounting for $(80.04 \pm 0.73)\%$ - $(85.94 \pm 0.58)\%$, $(13.13 \pm 0.59)\%$ - $(19.17 \pm 0.75)\%$, and $(0.79 \pm 0.05)\%$ - $(1.16 \pm 0.03)\%$ of the total phospholipid, respectively. The fatty acids of the lipid were mainly C14:0, C16:0, C18:1, C20:5 (EPA) and C22:6 (DHA), accounting for $(12.00 \pm 0.34)\%$ - $(12.85 \pm 0.15)\%$, $(24.64 \pm 0.15)\%$ - $(27.11 \pm 0.16)\%$, $(13.21 \pm 0.35)\%$ - $(15.09 \pm 0.14)\%$, $(18.41 \pm 0.18)\%$ - $(18.86 \pm 0.56)\%$, $(10.17 \pm 0.18)\%$ - $(12.84 \pm 0.16)\%$ of the total fatty acids, respectively. There were overall significant differences in the lipid contents, the ratios of PC and PE in phospholipid, the ratios of C16:0, C18:1 and DHA in total fatty acids of the Antarctic krill with different body lengths ($p < 0.05$). Antarctic krill samples could be obviously divided into three categories < 30 mm, $30 - 40$ mm, > 40 mm by the cluster analysis and principal component analysis according to body length. In conclusion, the lipid composition of Antarctic krill is significantly related to the body length.

Key words: Antarctic krill (*Euphausia superba*); body length; lipid composition; multivariate statistical analysis

近年来,受近海渔业资源衰退、水域环境恶化、生产方式粗放、产业结构不合理等因素影响,海洋渔业发展空间受到了极大限制,拓展渔业向深远海域发展的需求与日俱增^[1-2]。南极磷虾(*Euphausia superba*)是南大洋海洋浮游动物中一个重要类群,生物量达6.5亿~10亿t,是目前全球仅存的资源极其丰富且开发利用程度很低的单种可捕生物资源^[3]。积极推进南极磷虾资源开发,对发展我国第二个远洋渔业以及培育海洋生物战略性新兴产业具有重要意义^[3]。我国自2009年末正式启动了对南极磷虾资源的实质性探捕和科学研究,经过十余年努力,目前已跻身世界南极磷虾渔业国第二梯队,从捕捞到生产高附加值产品以及新资源开发利用的产业链雏形已基本形成^[2-3]。

南极磷虾脂质约可达到其质量的6%^[4-7],且富含磷脂、 $n-3$ 系列多不饱和脂肪酸、虾青素等活性脂质^[7],具有极高的营养价值和加工利用价值。南极磷虾源活性脂质已被证明在抗氧化^[8-10]、改善糖代谢/脂代谢^[7,11]、抑制炎症反应^[12-13]等方面展现出良好效果。新鲜捕获的南极磷虾经加工为磷虾粉后进行磷虾油的生产,已成为南极磷虾资源高值化利用的重要方式之一。南极磷虾的脂质含量和组成对于磷虾粉和磷虾油等终端产品品质至关重要,直接影响着产业的经济效益。目前,已有研究关注

南极磷虾脂质含量与捕捞海域、季节、体长等因素的相关关系^[4,14-15],但关于南极磷虾脂质组成的影响因素鲜有报道。综上,本文以脂质含量、甘油酯含量、磷脂含量、胆固醇含量、游离脂肪酸含量、磷脂组成和脂肪酸组成等为评价指标,结合多元统计分析技术重点分析了不同体长南极磷虾脂质组成的差异,以期为南极磷虾生长过程中营养组成变化的认知提供数据支持,为南极磷虾陆基精准加工利用提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

南极磷虾,2019年7月捕捞于南乔治亚群岛附近海域,冷冻运至陆地实验室后,按体长小于30 mm、30~40 mm、40~50 mm、大于50 mm分为4组,每组3个平行,每个样品不少于200 g,经真空冷冻干燥后研磨成粉,密封保存于 -40 ℃冰箱,备用。

37种脂肪酸甲酯混标、磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰乙醇胺(PE)、溶血磷脂酰胆碱(LPC)标准品, Sigma公司;正己烷、异丙醇,色谱纯, ACS公司;甘油三酯试剂盒、胆固醇试剂盒,中生北控生物科技股份有限公司;三氯甲烷、甲醇、异丙醇、浓硫酸、正己烷、正庚烷、醋酸铜、无水硫酸钠等,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

BAS 224S - CW 型电子天平,赛多利斯(北京)科学仪器有限公司;CTFD - 10P 型真空冷冻干燥机,青岛永合创信电子科技有限公司;MD 200 型氮吹仪,杭州奥盛仪器有限公司;ST 3100 型 pH 计,奥斯豪(常州)仪器有限公司;UV 1102 II 型紫外/可见分光光度计,上海天美科学仪器有限公司;HH - 4 型数显恒温水浴锅,常州智博瑞仪器制造有限公司;LC - 16 型液相色谱仪(配置 Essentia ELSD - 16 型蒸发光散射检测器),日本岛津公司;HP 6890 型气相色谱仪(配离子火焰检测器),美国安捷伦公司。

1.2 实验方法

1.2.1 脂质含量测定

采用 Folch 法^[16]提取总脂质。称取适量不同体长南极磷虾样品(磷虾粉),加入 10 倍体积的氯仿 - 甲醇溶液(体积比 2:1),室温浸提 6 h 后过滤,向浸提液中加入四分之一体积的 0.88% 氯化钾溶液,充分混匀后静置过夜,收集下层有机相过无水硫酸钠后,旋蒸浓缩后得总脂质,准确称量计算脂质含量后,用氯仿 - 甲醇溶液(体积比 2:1)复溶,4℃ 保存待用。

1.2.2 脂质的基本组成分析

取适量脂质溶液,氮气吹干后加入适量 10% Triton X - 100 异丙醇溶液,按照试剂盒说明书测定甘油酯和胆固醇含量;磷脂含量按照 GB/T 5537—2008 中钼蓝比色法进行测定;游离脂肪酸含量采用铜皂比色法^[17]测定。

1.2.3 磷脂组成分析

参考文献[18]方法进行磷脂组成分析。脂质溶液经液相色谱仪分析磷脂组成,不同磷脂组分经外标法定量后,分别计算各自在总磷脂中的比例。色谱条件:ZORBAX Rx - SIL 色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm);柱温 35℃;流速 1 mL/min;进样量 10 μL;漂移管温度 60℃;雾化器压力 172 kPa;流动相 A 为正己烷 - 异丙醇 - 5 mmol/L 甲酸铵(体积比 82:17:1),流动相 B 为异丙醇 - 水 - 5 mmol/L 甲酸铵(体积比 85:14:1);采用梯度洗脱程序,0 min A 与 B 体积比为 100:0,5 min A 与 B 体积比为 80:20,7 min A 与 B 体积比为 60:40,17 min A 与 B 体积比为 30:70,23 min A 与 B 体积比为 0:100,26 min A 与 B 体积比为 100:0,30 min 洗脱程序结束。在质量浓度 20 ~ 500 mg/L 范围内,以标准品质量浓度的对数值(X)为横坐标,以相应峰面积的对数值(Y)为纵坐标绘制标准曲线,其中:PC 定量方程为

$Y = 1.1188X + 3.4309, R^2 = 0.9987$; PE 定量方程为 $Y = 1.3393X + 2.7862, R^2 = 0.9976$; LPC 定量方程为 $Y = 1.1198X + 3.2135, R^2 = 0.9990$ 。

1.2.4 脂肪酸组成分析

参照文献[19]方法对脂质进行脂肪酸组成分析。脂质溶液经氮气吹干后进行甲酯化处理,经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 毛细管柱(0.32 mm × 30 m, 0.25 μm);载气为氮气;进样口温度 240℃;分流比 15:1;进样量 1 μL;升温程序为起始温度 170℃,以 3℃/min 升温至 210℃,保持 30 min;FID 检测器温度 250℃;氢气流速 40 mL/min;空气流速 450 mL/min;尾吹氮气流速 40 mL/min。

1.2.5 数据处理

实验结果以“平均值 ± 标准偏差”表示。采用 Excel 2019 对实验数据进行处理,采用 SPSS 20.0 软件进行方差分析、聚类分析(CA)和主成分分析(PCA),采用 One - way ANOVA(Duncan)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 不同体长南极磷虾脂质含量

不同体长南极磷虾的脂质含量分析结果见表 1。

表 1 不同体长南极磷虾脂质含量

分组	脂质含量/%
< 30 mm	22.74 ± 1.42a
30 ~ 40 mm	24.35 ± 0.31a
40 ~ 50 mm	18.21 ± 0.54b
> 50 mm	17.57 ± 2.43b

注:不同字母标识代表不同体长组间具有显著差异($p < 0.05$)

由表 1 可知:南极磷虾的脂质含量在(17.57 ± 2.43)% ~ (24.35 ± 0.31)% 之间;南极磷虾的脂质含量在体长小于 40 mm 时随体长增加而增加,在体长大于 40 mm 之后随着体长的增加而降低;不同体长南极磷虾的脂质含量总体存在显著差异($p < 0.05$),其中,体长小于 40 mm 的南极磷虾脂质含量显著高于体长大于 40 mm 的南极磷虾($p < 0.05$),这与聂玉晨等^[4]的研究结果一致。本研究结果提示,脂质成分在南极磷虾生长过程中发挥重要作用。相关研究指出,体长小于 40 mm 的南极磷虾主要属于未成体与次成体,体长大于 40 mm 的南极磷虾则属于成体或高龄群体^[14,20]。未成体与次成体南极磷虾体内脂肪含量较高,这与其需要进行能量储备以便越冬以及发育为成体有关^[15]。

2.2 不同体长南极磷虾脂质基本组成

不同体长南极磷虾的脂质基本组成分析结果见表2。

由表2可知,南极磷虾脂质主要由甘油酯、磷脂、胆固醇和游离脂肪酸组成,其中,甘油酯和磷脂是主要脂质组分,分别占脂质的(41.40 ± 1.22)% ~ (43.54 ± 2.02)%和(39.70 ± 0.70)% ~ (41.89 ± 2.69)% ,与已有研究结果^[6-7,17,21]基本一致。不同体长南极磷虾的甘油酯和磷脂含量总体有显著

差异($p < 0.05$)。南极磷虾的磷脂含量高于鲫鱼的(12.85 ± 0.44)%^[22]、大麻哈鱼的(33.91 ± 0.41)%^[22]、贻贝的(18.47 ± 0.69)%^[22],略高于虾蛄的(35.86 ± 1.17)%^[6]、鹰抓虾的(37.41 ± 1.34)%^[6]和香螺的(36.86 ± 0.86)%^[23],且已被证明在延缓衰老^[10]、抑制炎症反应^[24]、改善脂质代谢^[25]等方面呈现出优异的生理活性。对南极磷虾磷脂的精准开发利用将成为南极磷虾加工产业链条深度延伸的重点方向。

表2 不同体长南极磷虾脂质基本组成及含量

分组	甘油酯	磷脂	胆固醇	游离脂肪酸
<30 mm	42.40 ± 0.86b	39.70 ± 0.70b	2.99 ± 0.13a	10.11 ± 0.95a
30 ~ 40 mm	43.47 ± 0.64a	39.93 ± 3.31b	2.48 ± 0.12b	8.98 ± 0.23ab
40 ~ 50 mm	41.40 ± 1.22c	41.89 ± 2.69a	2.81 ± 0.09a	7.75 ± 0.43b
>50 mm	43.54 ± 2.02a	40.72 ± 4.34a	2.90 ± 0.08a	7.80 ± 0.80b

注:同列数据不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同

2.3 不同体长南极磷虾磷脂组成

不同体长南极磷虾磷脂组成分析结果见表3。

表3 不同体长南极磷虾的磷脂组成及含量

分组	PC	PE	LPC
<30 mm	84.49 ± 0.60a	14.35 ± 0.57b	1.16 ± 0.03a
30 ~ 40 mm	85.94 ± 0.58a	13.13 ± 0.59b	0.92 ± 0.04b
40 ~ 50 mm	80.04 ± 0.73b	19.17 ± 0.75a	0.79 ± 0.05c
>50 mm	80.61 ± 1.34b	18.47 ± 1.34a	0.95 ± 0.07b

由表3可知,南极磷虾磷脂主要由PC、PE、LPC组成,分别占总磷脂的(80.04 ± 0.73)% ~ (85.94 ± 0.58)%、(13.13 ± 0.59)% ~ (19.17 ± 0.75)%、(0.79 ± 0.05)% ~ (1.16 ± 0.03)% ,与前人研究结果基本一致^[26-27]。不同体长南极磷虾磷脂组成存在差异,其中:体长小于40 mm的南极磷虾PC含量

显著高于体长大于40 mm的南极磷虾($p < 0.05$),而其PE含量显著低于体长大于40 mm的南极磷虾($p < 0.05$),体长小于30 mm南极磷虾LPC含量显著高于30 mm以上的。已有研究表明,生物体内PC和/或PE含量的变化与代谢疾病的发生发展密切相关^[28],调节靶器官组织中PC和PE的比例能够起到改善非酒精性脂肪肝^[29]、提高胰岛素敏感性^[30-31]、调节脑细胞功能^[32]等作用。不同体长南极磷虾磷脂组成中PC和PE的比例差异显著,因此后期可根据南极磷虾粉和南极磷虾油等终端产品的功能定位,选择适宜体长的南极磷虾作为加工原料。

2.4 不同体长南极磷虾脂肪酸组成

不同体长南极磷虾脂肪酸组成分析结果见表4。

表4 不同体长南极磷虾的脂肪酸组成

脂肪酸	含量/%			
	<30 mm	30 ~ 40 mm	40 ~ 50 mm	>50 mm
C12:0	0.21 ± 0.01a	0.22 ± 0.01a	0.23 ± 0.02a	0.22 ± 0.04a
C13:0	0.09 ± 0.00a	0.08 ± 0.00a	0.07 ± 0.01b	0.07 ± 0.00b
C14:0	12.78 ± 0.17a	12.85 ± 0.15a	12.18 ± 0.24b	12.00 ± 0.34b
C14:1	0.15 ± 0.00b	0.17 ± 0.00a	0.16 ± 0.01ab	0.17 ± 0.01a
C15:0	0.57 ± 0.03a	0.53 ± 0.01b	0.49 ± 0.02c	0.47 ± 0.01c
C16:0	24.64 ± 0.15c	25.70 ± 0.10b	27.07 ± 0.06a	27.11 ± 0.16a
C16:1	6.28 ± 0.06b	7.07 ± 0.26a	7.44 ± 0.16a	7.28 ± 0.26a
C17:0	0.16 ± 0.02a	0.13 ± 0.00b	0.11 ± 0.00c	0.11 ± 0.00c
C18:0	0.75 ± 0.06b	0.80 ± 0.02b	0.80 ± 0.05b	0.99 ± 0.06a
C18:1(n-9)	13.21 ± 0.35b	13.60 ± 0.22b	15.04 ± 0.19a	15.09 ± 0.14a
C18:2(n-6)	4.13 ± 0.13a	3.63 ± 0.05b	2.51 ± 0.05c	2.41 ± 0.05c
C20:0	0.15 ± 0.00a	0.12 ± 0.01b	0.11 ± 0.00b	0.11 ± 0.00b
C18:3(n-6)	0.29 ± 0.01a	0.27 ± 0.01a	0.22 ± 0.01b	0.22 ± 0.01b

续表 4

脂肪酸	含量/%			
	< 30 mm	30 ~ 40 mm	40 ~ 50 mm	> 50 mm
C20:1(<i>n</i> -9)	0.50 ± 0.04c	0.68 ± 0.01b	1.09 ± 0.02a	1.09 ± 0.01a
C18:3(<i>n</i> -3)	2.31 ± 0.01a	2.03 ± 0.08b	1.17 ± 0.05c	0.59 ± 0.02d
C21:0	0.04 ± 0.01a	0.02 ± 0.00b	0.03 ± 0.01ab	0.02 ± 0.00b
C20:2	0.25 ± 0.03ab	0.26 ± 0.04a	0.23 ± 0.01ab	0.21 ± 0.02b
C22:0	0.08 ± 0.00b	0.08 ± 0.00b	0.11 ± 0.00a	0.12 ± 0.01a
C22:1(<i>n</i> -9)	0.56 ± 0.04d	0.68 ± 0.02c	1.07 ± 0.02b	1.17 ± 0.09a
C20:3	0.41 ± 0.01a	0.36 ± 0.01b	0.24 ± 0.00c	0.25 ± 0.01c
C20:4(AA)	0.49 ± 0.01c	0.46 ± 0.01c	0.58 ± 0.02b	0.64 ± 0.04a
C23:0	0.07 ± 0.01a	0.06 ± 0.01b	0.03 ± 0.01c	0.03 ± 0.01c
C20:5(EPA)	18.86 ± 0.56a	18.86 ± 0.22a	18.41 ± 0.18a	18.61 ± 0.11a
C24:1(<i>n</i> -9)	0.15 ± 0.01c	0.15 ± 0.01c	0.32 ± 0.02a	0.30 ± 0.01b
C22:6(DHA)	12.84 ± 0.16a	11.18 ± 0.36b	10.17 ± 0.18c	10.62 ± 0.52bc
SFA	39.54 ± 0.23c	40.60 ± 0.24b	41.24 ± 0.25a	41.26 ± 0.48a
MUFA	20.87 ± 0.30c	22.36 ± 0.32b	25.13 ± 0.02a	25.11 ± 0.21a
PUFA	39.59 ± 0.53a	37.04 ± 0.56b	33.63 ± 0.27c	33.64 ± 0.68c

注:同行数据不同字母表示差异显著($p < 0.05$)

由表 4 可知,南极磷虾脂质中共检测出 25 种脂肪酸,其中:饱和脂肪酸(SFA)共 11 种,主要为豆蔻酸(C14:0)和棕榈酸(C16:0),分别占总脂肪酸含量的(12.00 ± 0.34)% ~ (12.85 ± 0.15)%和(24.64 ± 0.15)% ~ (27.11 ± 0.16)%;单不饱和脂肪酸(MUFA)共 6 种,主要为棕榈油酸(C16:1)和油酸(C18:1),分别占总脂肪酸含量的(6.28 ± 0.06)% ~ (7.44 ± 0.16)%和(13.21 ± 0.35)% ~ (15.09 ± 0.14)%;多不饱和脂肪酸(PUFA)共 8 种,主要为 EPA(C20:5)和 DHA(C22:6),分别占总脂肪酸含量的(18.41 ± 0.18)% ~ (18.86 ± 0.56)%和(10.17 ± 0.18)% ~ (12.84 ± 0.16)%。不同体长南极磷虾脂肪酸组成存在差异,其中,体长小于 30 mm、30 ~ 40 mm 以及大于 40 mm 的南极磷虾脂质中 C16:0、C17:1、C18:2、C18:3(*n*-3)、C20:1(*n*-9)、C20:3、DHA 含量以及 SFA、MUFA 和 PUFA 含量差异显著($p < 0.05$)。另外,体长小于 30 mm 的南极磷虾脂质中 PUFA 含量最高,且随体长的增加 PUFA 含量逐渐降低,当体长大于 40 mm 时含量趋于稳定。薛梅等^[33]研究同样指出,体长在 36.06 ~ 55.83 mm 范围的南极磷虾,其 PUFA 含量与体长呈负相关关系,与本研究结果一致,由此可见 PUFA 在南极磷虾生长发育过程中发挥重要作用。

2.5 不同体长南极磷虾脂质组成比较分析

2.5.1 聚类分析

本研究以不同体长南极磷虾脂质含量、脂质基本组成、磷脂组成和脂肪酸组成为基础,构建数据矩

阵,原始数据经 Z-得分标准化处理后,以欧氏距离平方为系数采用组间连接法进行系统聚类,聚类结果见图 1。

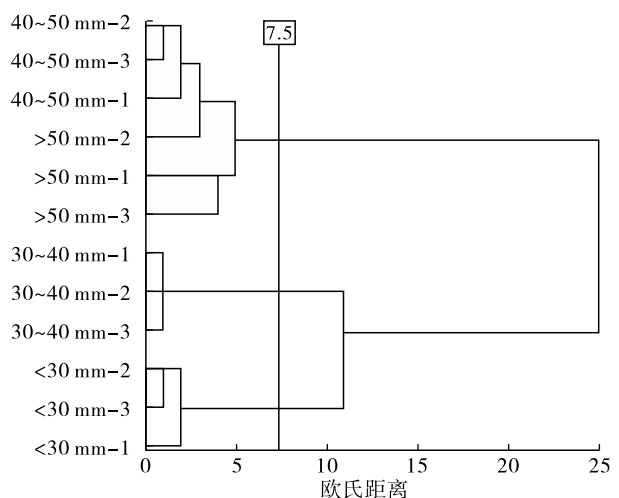


图 1 不同体长南极磷虾脂质组成的聚类分析

由图 1 可知,当取临界值(λ)为 7.5 时,南极磷虾样品可分为 3 类:体长小于 30 mm 的样品聚为一类,体长 30 ~ 40 mm 的样品聚为一类,体长 40 ~ 50 mm 和大于 50 mm 的样品聚为一类。聚类分析结果证明,体长小于 30 mm、30 ~ 40 mm、大于 40 mm 的南极磷虾脂质组成具有明显差异。

2.5.2 主成分分析

本研究以不同体长南极磷虾脂质含量、脂质基本组成、磷脂组成和脂肪酸组成为基础进行主成分分析。表 5 为主成分分析初始解对原有变量总体描述情况。

表5 总方差解释

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	25.789	67.889	67.889
2	4.501	11.844	79.733
3	2.266	5.962	85.695

从表5可以看出,总方差的85.695%的贡献来自前3个因子,即一个3因子模型解释了实验数据85.695%的信息。根据主成分PC1、PC2绘制二维散点图,结果见图2。

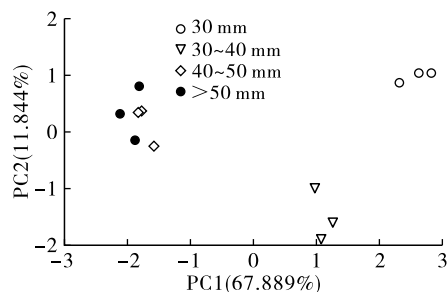


图2 不同体长南极磷虾脂质组成主成分分析

由图2可知,主成分分析结果与聚类分析结果保持一致。南极磷虾样品明显分布于二维图谱的不同区域,其中:体长小于30 mm的样品,分布在 $2 < PC1 < 3, 0.5 < PC2 < 1.5$ 的区域;体长30~40 mm的样品,分布在 $0.5 < PC1 < 1.5, -2 < PC2 < -0.5$ 的区域;体长大于40 mm(40~50 mm和大于50 mm)的样品,分布在 $-2.5 < PC1 < -1, -1 < PC2 < 1$ 的区域。主成分分析结果证明,体长小于30 mm、30~40 mm、大于40 mm的南极磷虾脂质组成具有明显差异。

3 结论

南极磷虾的脂质含量可达到干基的 $(17.57 \pm 2.43)\% \sim (24.35 \pm 0.31)\%$,甘油酯和磷脂是主要的脂质组分,磷脂主要由PC、PE和LPC组成,脂质中脂肪酸主要为C14:0、C16:0、C18:1、C20:5(EPA)和C22:6(DHA)。

不同体长南极磷虾的脂质组成存在差异。体长小于40 mm的南极磷虾的脂质含量、PC含量显著高于体长大于40 mm的南极磷虾($p < 0.05$),而PE含量显著低于体长大于40 mm的南极磷虾($p < 0.05$)。体长小于30 mm、30~40 mm、大于40 mm的南极磷虾的DHA、PUFA、SFA、MUFA含量差异显著($p < 0.05$)。其中:体长小于40 mm的南极磷虾DHA、PUFA含量显著高于体长大于40 mm的南极磷虾,而SFA、MUFA含量正好相反。

以脂质组成数据为基础,经聚类分析和主成分分析,可将南极磷虾样品明显区分为体长小于30

mm、30~40 mm、大于40 mm的3大类,分类结果证明南极磷虾的脂质组成与其体长关系显著。本研究结果将为南极磷虾生长过程营养组成变化认知提供数据支持,为南极磷虾陆基精准加工利用提供科学指导。

参考文献:

- [1] 徐皓,陈家勇,方辉,等. 中国海洋渔业转型与深蓝渔业战略性新兴产业[J]. 渔业现代化, 2020, 47(3): 1-9.
- [2] 赵宪勇,左涛,冷凯良,等. 南极磷虾渔业发展的工程科技需求[J]. 中国工程科学, 2016, 18(2): 85-90.
- [3] 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.
- [4] 聂玉晨,张波,赵宪勇,等. 南极磷虾(*Euphausia superba*)脂肪与蛋白含量的季节变化[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(3): 1-8.
- [5] 麦康森,魏玉婷,王嘉,等. 南极磷虾的主要营养成分及其在水产饲料中的应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(11): 1-15.
- [6] 楼乔明. 几种海洋动物脂质分析及海参EPA磷脂生物活性研究[D]. 山东青岛:中国海洋大学, 2011.
- [7] XIE D, JIN J, SUN J, et al. Comparison of solvents for extraction of krill oil from krill meal: lipid yield, phospholipids content, fatty acids composition and minor components[J]. Food Chem, 2017, 233: 434-441.
- [8] 刘小芳,宫玉雪,田良良,等. 南极磷虾油改善衰老小鼠抗氧化能力的作用研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12): 14-18.
- [9] 丛心缘. 南极磷虾中虾青素的分离、鉴定及抗氧化活性研究[D]. 山东青岛:青岛大学, 2019.
- [10] 赵静. 南极磷虾磷脂提取纯化及抗衰老实验研究[D]. 山东青岛:中国海洋大学, 2012.
- [11] SUN D W, ZHANG L, CHEN H J, et al. Effects of Antarctic krill oil on lipid and glucose metabolism in C57BL/6J mice fed with high-fat diet[J/OL]. Lipids Health Dis, 2017, 16(1): 218 [2021-09-03]. <https://doi.org/10.1186/s12944-017-0601-8>.
- [12] ZADEH-ARDABILI P M, RAD S K. Anti-pain and anti-inflammation like effects of Neptune krill oil and fish oil against carrageenan induced inflammation in mice models: current status and pilot study [J/OL]. Biotechnol Rep, 2019, 22: e00341 [2021-09-03]. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00341>.
- [13] BONATERRA G, DRISCOLL D, SCHWARZBACH H, et al. Krill oil-in-water emulsion protects against lipopolysaccharide-induced proinflammatory activation of macrophages in vitro[J/OL]. Mar Drugs, 2017, 15(3): 74 [2021-09-03]. <https://doi.org/10.3390/>

- md 15030074.
- [14] MEYER B, AUERSWALD L, SIEGEL V, et al. Seasonal variation in body composition, metabolic activity, feeding, and growth of adult krill *Euphausia superba* in the Lazarev Sea[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2010, 398: 1 – 18.
- [15] HAGEN W, KATTNER G, TERBRJUGGEN A, et al. Lipid metabolism of the Antarctic krill *Euphausia superba* and its ecological implications[J]. Mar Biol, 2001, 139 (1): 95 – 104.
- [16] FOLCH J, LEES M, STANELY SLOANE G H. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues[J]. J Biol Chem, 1956, 55: 497 – 509.
- [17] 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.
- [18] 张芹. 酶法合成富含 $n-3$ PUFA 的磷脂酰丝氨酸的研究[D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [19] 陈京美, 刘小芳, 冷凯良, 等. 不同解冻方式对南极磷虾脂质品质的影响研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38 (2): 146 – 151.
- [20] 左涛, 赵宪勇, 黄洪亮, 等. 南极半岛邻近水域南极大磷虾商业捕捞群体的年龄结构时空变化[J]. 渔业科学进展, 2012, 33(4): 1 – 10.
- [21] YIN F W, LIU X Y, FAN X R, et al. Extrusion of Antarctic krill (*Euphausia superba*) meal and its effect on oil extraction[J]. Int J Food Sci Tech, 2015, 50: 633 – 639.
- [22] 王昕岑. 水产品贮藏过程中磷脂的鸟枪法分析及水解机理研究[D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [23] YU M M, GANG K Q, LI C, et al. Change of lipids in whelks (*Neptunea arthritica cumingi* Crosse and *Neverita didyma*) during cold storage [J/OL]. Food Res Int, 2020, 136: 109330 [2021 – 09 – 03]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109330>.
- [24] ZHOU L, WU X, YANG F, et al. Characterization of molecular species and anti – inflammatory activity of purified phospholipids from Antarctic krill oil [J/OL]. Mar Drugs, 2021, 19 (3): 124 [2021 – 09 – 03]. <https://doi.org/10.3390/md19030124>.
- [25] XIANG X W, ZHOU X L, WANG W J, et al. Effect of Antarctic krill phospholipid (KOPL) on high fat diet – induced obesity in mice [J/OL]. Food Res Int, 2021, 148: 110456 [2021 – 09 – 03]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110456>.
- [26] BURRI L, HOEM N, MONAKHOVA Y B, et al. Fingerprinting krill oil by ^{31}P , ^1H and ^{13}C NMR spectroscopies[J]. J Am Oil Chem Soc, 2016, 93 (8): 1037 – 1049.
- [27] SUN W W, HUANG W C, SHI B W, et al. Effective Antarctic krill oil extraction using switchable hydrophilicity solvents [J]. Mar Life Sci Technol, 2020, 2 (6): 41 – 49.
- [28] VAN DER VEEN J N, KENNELLY J P, WAN S, et al. The critical role of phosphatidylcholine and phosphatidylethanolamine metabolism in health and disease [J]. Biochim Biophys Acta Biomembr, 2017, 1859(9): 1558 – 1572.
- [29] LI Z Y, AGELLON L B, ALLEN T M, et al. The ratio of phosphatidylcholine to phosphatidylethanolamine influences membrane integrity and steatohepatitis [J]. Cell Metab, 2006, 3(5): 321 – 331.
- [30] VAN DER VEEN J N, LINGRELL S, MCCLOSKEY N, et al. A role for phosphatidylcholine and phosphatidylethanolamine in hepatic insulin signaling[J]. FASEB J, 2019, 33(4): 5045 – 5057.
- [31] NEWSOM S A, BROZINICK J T, KISELJAK – VASSILIADES K, et al. Skeletal muscle phosphatidylcholine and phosphatidylethanolamine are related to insulin sensitivity and respond to acute exercise in humans[J]. J Appl Physiol, 2016, 120(11): 1355 – 1363.
- [32] ZHANG C, ZHOU M M, ZHANG T T, et al. Effects of dietary supplementation with EPA – enriched phosphatidylcholine and phosphatidylethanolamine on glycerophospholipid profile in cerebral cortex of SAMP8 mice fed with high – fat diet [J]. J Oleo Sci, 2021, 70 (2): 275 – 287.
- [33] 薛梅, 张海亭, 朱国平, 等. 2016 年夏秋季南极半岛南极磷虾脂肪酸组成及食性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(5): 710 – 717.