

综述

# 南极磷虾的主要营养组成及其在水产饲料中的应用\*

麦康森<sup>1</sup>, 魏玉婷<sup>1</sup>, 王嘉<sup>2</sup>, 张文兵<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国海洋大学水产学院, 水产动物营养与饲料农业部重点实验室, 海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003;

2. 青岛佰伟英格生物科技有限公司, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 南极磷虾资源丰富, 氨基酸、脂肪酸营养均衡, 是一种公认的优质蛋白源, 可以用于水产饲料中, 对养殖动物起到促进生长、改善肉质、提高繁殖性能等功效。本文总结了近年来南极磷虾粉在水产饲料中的应用研究进展, 包括南极磷虾粉对水产动物生长性能、品质和繁殖性能的影响, 以及制约南极磷虾粉在水产饲料中应用的科学和技术因素等。同时, 总结了南极磷虾油在动物能量动态平衡的调节、抗炎反应和与鱼油存在的不同代谢机制等方面的研究进展。旨在为南极磷虾产品的开发和在水产饲料中的应用提供参考。

**关键词:** 南极磷虾粉; 南极磷虾油; 水产动物; 饲料; 营养

中图分类号: S963.71

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2016)11-001-15

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20160337

引用格式: 麦康森, 魏玉婷, 王嘉, 等. 南极磷虾的主要营养组成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.

MAI Kang-Sen, WEI Yu-Ting, WANG Jia, et al. Main nutrient compositions of antarctic krill and its application in aquafeeds [J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(11): 1-15.

## 1 南极磷虾的生物学特性

南极磷虾(*Euphausia superba*)是一种小型海洋浮游甲壳类动物, 隶属于磷虾目(Euphausiacea)磷虾科(Euphausiidae)磷虾属(*Euphausia*)。分布在南大洋南极辐合区以南的南极海域, 是生活在高纬低温条件下的冷水性虾类。成虾一般体长40~60 mm, 个体质量只有1 g左右, 其中头部占44%~46%, 虾体占54%~56%, 属小型虾类<sup>[1-2]</sup>。

磷虾目由85个种组成, 其中30个种隶属于磷虾科, 数量最多的是南极磷虾, 与太平洋磷虾(*Euphausia pacifica*)和北方磷虾(*Meganyctiphanes norvegica*)都是磷虾渔业的主要捕捞对象。南极磷虾的身体几乎透明, 壳上缀着许多鲜艳的红色斑点。因摄食含有叶绿素的浮游藻类, 消化系统呈现鲜艳的草绿色并清晰可见。南极磷虾的寿命一般为5~7年, 2龄以后即成熟, 体长最大可达到60 mm以上。南极磷虾为草食性动物, 主要以南大洋中的浮游藻类为食, 有时也会捕食一些浮游动物。它们具有一定的游泳能力, 但通常游泳能力较弱, 在大洋中处于随波逐流的状态, 身体比重比

海水大, 所以停止游泳时会沉入海底。南极磷虾在夏季可多次产卵, 每个雌性个体每次产卵10 000粒左右, 受精卵被释放到南大洋的表层海水中, 随后沉入2 000 m的深海中, 在那里开始孵化出磷虾幼体<sup>[3]</sup>。

## 2 南极磷虾的主要营养成分

南极磷虾富含蛋白质, 脂肪含量适度, 同时含有丰富的类胡萝卜素, 被认为是一种适口性很强的饲料组分<sup>[4]</sup>。据报道, 南极磷虾全虾水分81.20%, 粗蛋白为干基的76.50%, 粗脂肪含量为12.10%, 灰分为17.40%<sup>[5]</sup>。肌肉部分占全虾总质量的30.4%~40.0%<sup>[1,6]</sup>, 是生产磷虾粉的主要原料。南极磷虾肌肉的常规营养组成见表1。不同作者报道的数据存在差异, 可能是由于所选南极磷虾的捕捞海域、季节、年龄以及性成熟等因素的差异所致。

### 2.1 南极磷虾粉的主要营养组成

南极磷虾在捕捞后, 通常是在船上马上进行短期的100℃的蒸气干燥, 然后进行低温冷冻处理, 也可以将磷虾水解或喷雾干燥成红色的潮湿粉末<sup>[2]</sup>, 加工成南极磷虾粉。因此, 南极磷虾粉的化学组成受南极磷

\* 基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(201562017)资助

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (201562017)

收稿日期: 2016-09-20; 修订日期: 2016-10-21

作者简介: 麦康森(1958-), 男, 教授, 院士, 从事水产动物营养与饲料研究。E-mail: kmai@ouc.edu.cn

\*\* 通讯作者: E-mail: wzhang@ouc.edu.cn

虾的捕捞季节、摄取的食物、捕捞的区域、年龄和性别等因素的影响。

表1 南极磷虾肌肉中的常规营养组成(干重)

Table 1 Proximate composition in muscle of Antarctic krill (dry matter) /%

序号 No.	水分 Moisture	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude lipid	粗灰分 Ash	参考文献 References
1	74.67	64.44	5.14	10.91	[7]
2	74.69	64.44	5.14	10.90	[8]
3	79.00	82.86	5.24	10.95	[9]
平均值 Mean	76.13	70.58	5.17	10.92	

2.1.1 南极磷虾粉的常规营养组成 南极磷虾粉的常规营养组成见表2。其中,水分9.73%,粗蛋白质63.40%,粗脂肪11.66%,粗灰分14.95%。对比GB/T19164-2003 鱼粉国家标准中的规定,南极磷虾粉的粗蛋白质、粗脂肪和水分含量都已达到国家一级鱼粉的要求。但粗蛋白质中有一部分氮是包含在甲壳素中,不能被水产动物利用,真正的蛋白质含量需要将这部分氮去除。南极磷虾粉的粗脂肪适中,与一级红鱼粉的含量相当。但粗灰分较高,磷虾中大量的灰分主要是来自于其外骨骼。Hansen等<sup>[10-11]</sup>对南极磷虾进行了部分脱壳处理后制成的南极磷虾粉灰分含量降至11.80%。Yoshitomi等<sup>[12]</sup>去除了南极磷虾的全部外骨骼后制成的南极磷虾粉灰分含量降至9.20%。

表2 南极磷虾粉的常规营养组成(干重)

Table 2 Proximate composition of Antarctic krill meal (dry matter) /%

序号 No.	水分 Moisture	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude lipid	粗灰分 Ash	参考文献 References
1	6.70	62.30	9.30	15.10	[13]
2	6.70	64.10	9.30	15.10	[14]
3	—	66.00	19.90	11.70	[12]
4	10.00	64.20	20.10	14.70	[15]
5	9.40	61.80	7.32	13.40	[8]
6	8.70	68.85	7.17	16.93	[16]
平均值 Mean	8.30	64.54	12.18	14.49	
鱼粉国家 标准一级品 First grade national standard fish meal	≤10	≥60	≤12(红鱼粉 Brown fishmeal) ≤10(白鱼粉 White fishmeal)	≤10	

注:—表示没有数据 —: No data is available.

2.1.2 南极磷虾粉的氨基酸组成 综合部分已发表的文献,本文将南极磷虾全虾、肌肉和南极磷虾粉中氨基酸(AA)组成的数据(单位均校正为g/kg蛋白质干重)列于表3中。通过比较可知,南极磷虾全虾、肌肉、南极磷虾粉的氨基酸组成与鱼粉相似,氨基酸种类齐全,包括鱼类生长所需的10种必需氨基酸(EAA)和8种非必需氨基酸(NEAA)。其中南极磷虾粉 $\Sigma$ EAA/ $\Sigma$ AA比值平均在0.49, $\Sigma$ EAA/ $\Sigma$ NEAA的平均值为0.95,联合国粮农组织(FAO)和世界卫生组织(WHO)对优质蛋白质的判定标准是 $\Sigma$ EAA/ $\Sigma$ AA比值为0.4左右, $\Sigma$ EAA/ $\Sigma$ NEAA比值在0.6以上。由此判定,南极磷虾粉属于一种可以与鱼粉相媲美的优质蛋白质原料。

南极磷虾的全虾、肌肉以及南极磷虾粉的氨基酸中含量最高的均为谷氨酸,其他呈味氨基酸,包括天门冬氨酸、甘氨酸、丙氨酸的含量也非常丰富。南极磷虾的全虾、肌肉以及南极磷虾粉中呈味氨基酸总量占氨基酸总量的比值( $\Sigma$ DAA/ $\Sigma$ AA)分别0.36、0.39和0.37。天门冬氨酸和谷氨酸是鲜味的特征性氨基酸,甘氨酸和丙氨酸是甘味的特征性氨基酸,丝氨酸和脯氨酸也与甘味有关<sup>[8]</sup>。此外,南极磷虾粉还含有0.61%~1.56%的牛磺酸。牛磺酸不仅能够刺激鱼类摄食、提高鱼类的生长率,并具有预防由植物蛋白引起的营养性疾病的功能<sup>[17-18]</sup>。

2.1.3 脂类营养 南极磷虾鲜样中粗脂肪含量在1.30%~2.10%<sup>[1]</sup>,其脂质含量主要取决于捕捞的季节,性成熟,体长和冷冻的时间。通常,南极磷虾的脂类形成期在每年的3—6月。雌性南极磷虾的脂质含量是雄性的2倍。南极磷虾脂质含量随着年龄而增长,产卵后迅速减少<sup>[8]</sup>。

通过表4可知,南极磷虾粉中主要脂肪酸的组成及含量与鱼粉相似,饱和脂肪酸含量占总脂肪酸含量的31.13%,主要以C16:0为主,占总脂肪酸含量的18.67%。单不饱和脂肪酸含量24.07%,以C18:1n-9为主,含量约为17.27%。多不饱和脂肪酸含量与鱼粉基本相当,分别为45.08%和46.58%,然而南极磷虾粉中多不饱和脂肪酸主要以n-3不饱和脂肪酸为主,n-6不饱和脂肪酸含量较低,n-3/n-6的比值为11.06,而鱼粉中该比值仅为1.89。在n-3 PUFA中又以EPA和DHA含量最高,分别为21.78%和16.10%,EPA+DHA总量可达到脂肪酸总量的37.87%,高于鱼粉中的27.65%。

楼乔明<sup>[20]</sup>等发现,南极磷虾粉中脂质以甘油三酯(41.92%)、磷脂(33.16%)、游离脂肪酸(17.61%)为主,尽管与Yoshitomi等<sup>[12]</sup>检测的3种脂质的单个含量(分别为26.20%、72.00%和1.00%)存在差异,但三者总量占到总脂含量的90%以上在2个报道中结论是

一致的。且不同脂质的脂肪酸组成差异显著,胆固醇酯和甘油三酯中饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸含量均显著高于游离脂肪酸和磷脂;而游离脂肪酸和磷脂富含多不饱和脂肪酸,两者含量分别为 48.50% 和 49.96%,远高于胆固醇酯和甘油三酯的 13.11% 和 24.36%<sup>[20]</sup>,这主要是由于南极磷虾的食物主要来源为海洋单细胞微藻<sup>[8]</sup>。

此外,从表 4 中还可以得出,南极磷虾肌肉中的饱

和脂肪酸含量和单不饱和脂肪酸含量略低于加工下脚料(头、壳、尾)中这两类脂肪酸的含量,但肌肉中多不饱和脂肪酸的含量(47.98%)高于加工下脚料中多不饱和脂肪酸的含量(34.09%),而 EPA+DHA 的含量表现特别显著,肌肉中 EPA+DHA 为 40.64%,上述加工下脚料中仅为 29.10%。由此推断,对南极磷虾进行脱壳处理后,可能更有利于提高南极磷虾粉的脂肪酸营养价值。

表 3 南极磷虾全虾、肌肉、南极磷虾粉、白鱼粉的氨基酸组成(蛋白干重)

Table 3 Amino acid compositions of the whole Antarctic krill, muscle, krill meal and a fish meal (dry weight of protein)

/g · kg<sup>-1</sup>

参考文献 References	全虾	肌肉 Muscle			南极磷虾粉 Krill meal			白鱼粉
	Whole shrimp							White fish meal
	[5]	[8]	[9]	平均值 Mean	[8]	[16]	平均值 Mean	[19]
Ile	25.40	50.90	39.95	45.43	43.54	48.98	46.26	43.87
Leu	39.90	81.01	70.37	75.69	56.76	81.32	69.04	70.32
Lys	43.70	92.02	69.01	80.52	58.82	81.16	69.99	73.06
Met	15.50	36.78	22.70	29.74	32.30	7.23	19.77	27.10
Phe	22.10	57.57	35.41	46.49	34.76	47.47	41.12	36.77
Thr	21.50	25.76	28.60	27.18	35.84	42.41	39.13	41.45
Trp	7.30	— <sup>1</sup>	—	—	—	12.62	6.31	10.81
Val	26.00	48.42	39.50	43.96	41.04	50.52	45.78	48.71
His	11.40	14.74	16.34	15.54	17.09	27.51	22.30	21.61
Arg	37.80	28.24	70.37	49.31	49.16	65.14	57.15	64.84
Cys	8.50	19.55	2.72	11.14	17.69	19.48	18.59	—
Tyr	27.90	25.14	24.52	24.83	34.90	42.37	38.64	—
Ala	29.40	81.47	49.49	65.48	44.27	59.22	51.75	—
Asn	53.40	64.40	70.83	67.61	82.23	106.04	94.14	—
Glu	66.90	169.15	114.41	141.78	103.40	145.46	124.43	—
Gly	33.50	42.83	42.22	42.53	47.18	47.23	47.21	—
Pro	22.90	16.60	8.63	12.61	27.25	38.97	33.11	—
Ser	19.10	23.28	27.24	25.26	29.47	40.67	35.07	—
∑AA <sup>2</sup>	512.20	877.87	732.34	805.10	755.70	963.79	859.75	—
∑EAA <sup>2</sup>	250.60	435.44	392.28	413.86	369.30	464.36	416.83	—
∑NEAA <sup>2</sup>	261.60	442.43	340.06	391.24	386.39	499.43	442.91	—
∑DAA <sup>2</sup>	183.20	357.85	276.95	317.40	277.09	357.95	317.52	—
∑EAA/∑AA	0.49	0.50	0.54	0.51	0.49	0.48	0.49	—
∑EAA/∑NEAA	0.96	0.98	1.15	1.06	0.96	0.93	0.95	—
∑DAA/∑AA	0.36	0.41	0.38	0.39	0.37	0.37	0.37	—

注:1:— 表示没有数据 —: No data is available. 2:∑AA:氨基酸总量;∑EAA:必需氨基酸总量;∑NEAA:非必需氨基酸总量;∑DAA:呈味氨基酸总量。∑AA:Total amino acids; ∑EAA: Total essential amino acids; ∑NEAA: Total nonessential amino acids; ∑DAA:Total delicious amino acids.

表4 南极磷虾全虾、肌肉、加工下脚料、南极磷虾粉、鱼粉的脂肪酸组成(总脂肪酸)  
Table 4 The fatty acid composition of the whole Antarctic krill, muscle, processing by-products,  
krill meal and fish meal (total fatty acid) /%

参考文献 References	全虾	肌肉	加工下脚料	南极磷虾粉		鱼粉
	Whole shrimp [5]	Muscle [21]	Processing by-products [9]	Krill meal [16] 平均值 Mean		Fish meal <sup>1</sup> [16]
12:0	— <sup>2</sup>	—	0.15	0.19	—	—
14:0	4.90	5.03	10.66	7.01	6.54	6.78
15:0	—	0.25	0.32	0.37	—	—
16:0	18.80	20.51	20.24	13.02	24.32	18.67
17:0	—	0.34	0.13	—	0.25	—
18:0	1.00	0.88	1.21	0.67	1.08	0.88
20:0	—	—	1.73	—	—	—
21:0	—	—	0.91	8.06	—	8.06
22:0	—	—	0.16	—	—	—
23:0	—	—	0.16	0.75	—	0.75
24:0	—	—	0.36	—	—	—
14:1	—	—	0.14	0.31	—	0.31
14:1n-5	—	0.10	—	—	—	—
15:1	—	—	0.38	—	—	—
16:1n-7	4.90	0.30	—	—	—	8.35
16:1n-9	—	4.29	6.80	5.50	5.01	5.26
17:1	—	—	0.61	—	—	0.29
18:1n-9	16.40	10.82	7.94	16.55	17.98	17.27
18:1n-7	—	6.95	—	—	—	—
18:1n-9t	—	0.28	13.15	—	—	—
20:1n-11	—	—	0.16	—	—	—
20:1n-9	—	0.95	—	0.70	1.54	1.12
22:1	—	—	0.17	—	—	1.21
22:1n-9	—	0.50	—	—	—	—
24:1	—	—	0.53	—	—	—
24:1n-9	—	—	—	—	—	0.79
16:2n-4	—	0.33	—	—	—	—
16:3n-3	—	0.19	—	—	—	—
16:4n-3	—	0.30	—	—	—	—
18:2n-6	3.30	1.53	0.23	3.36	2.87	3.12
18:2	—	—	0.11	—	—	—
18:4n-3	—	1.72	—	—	—	—
18:3n-6	—	0.10	0.12	0.29	—	0.29
18:3n-3 ALA	1.10	0.94	0.93	0.89	—	0.89
20:2	—	—	2.4	—	3.26	3.26
20:3n-3	—	0.52	—	1.03	—	1.03
20:3n-6	—	—	—	—	—	12.89
20:4n-3	—	—	—	0.25	—	0.25
20:4n-3	—	0.48	—	0.24	—	0.24
20:4n-6	0.50	—	0.79	—	0.68	0.68
205n-3 EPA	17.40	21.42	19.08	23.34	20.21	21.78

续表 4

参考文献 References	全虾	肌肉	加工下脚料	南极磷虾粉			鱼粉
	Whole shrimp	Muscle	Processing by-products	Krill meal			Fish meal <sup>1</sup>
	[5]	[21]	[9]	[8]	[16]	平均值 Mean	[16]
22:2	--	--	0.40	--	--	--	--
22:5n-3	--	0.62	--	--	0.33	0.33	1.10
22:6n-3 DHA	12.40	19.22	10.02	16.26	15.93	16.10	12.92
∑SFA <sup>3</sup>	24.70	27.83	36.03	30.07	32.19	31.13	26.57
∑MUFA <sup>3</sup>	21.30	24.19	29.88	23.60	24.53	24.07	26.85
∑PUFA <sup>3</sup>	34.70	47.98	34.09	46.88	43.28	45.08	46.58
n-3PUFA	30.90	45.41	30.15	43.23	36.47	39.85	29.08
n-6PUFA	3.80	1.63	1.14	3.65	3.55	3.60	15.41
EPA+DHA	29.8	40.64	29.10	39.6	36.14	37.87	27.65
n-3/n-6	8.13	27.86	26.45	11.84	10.27	11.06	1.89
∑PUFA/∑SFA	1.40	1.72	0.95	1.56	1.34	1.45	1.75

注:1:文献作者检测的鱼粉俄罗斯进口鱼粉 A kind of fish meal imported from Russia. 2:--表示没有数据 --: No data is available. 3:∑SFA:饱和脂肪酸总量; ∑MUFA:单不饱和脂肪酸总量; ∑PUFA:多不饱和脂肪酸总量。∑SFA: Total saturated fatty acids; ∑MUFA: Total monounsaturated fatty acids; ∑PUFA: Total polyunsaturated fatty acids.

2.1.4 矿物元素及重金属 南极磷虾含有丰富的矿物元素。由表 5 可知,与白鱼粉相比,南极磷虾粉中的 Ca、Mg 和 Fe 元素的含量均较高。此外,由于甲壳动物是利用血蓝蛋白进行体内 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的运输,而血蓝蛋白辅基是 Cu<sup>2+</sup>,因此与脊椎动物相比,南极磷虾粉中含有较高含量的铜。

南极磷虾粉中含有较高浓度的氟,一直备受关注。据报道,南极磷虾全虾中氟含量可达到 870~2 400 mg/kg (干重),且这些氟主要富集在南极磷虾比较坚硬的外骨骼中,包括头胸甲、甲壳和触肢,在柔软的组织如肌肉、肝脏

脏、血淋巴等含量很低(见表 6)。Yoshitomi 等<sup>[12]</sup>在对南极磷虾进行脱壳处理后,磷虾粉中的氟含量由原来的 870 mg/kg 降到了 230 mg/kg。南极磷虾中氟含量高的原因之一,南大洋海水含氟量的特异性变化;其二,南极磷虾依靠吸收氟元素来参与其频繁的蜕壳而使氟被大量富集。Ca 易与氟结合形成 CaF<sub>2</sub>,而 CaF<sub>2</sub> 在水中的溶解度低至  $3.9 \times 10^{-11}$ ,因此在磷虾粉饲料中通过加入 CaCl<sub>2</sub> 的形式加入的钙离子,也可以有效的减少鱼类对氟的吸收<sup>[25]</sup>。也有研究报道,通过活性炭吸附和生物膜技术相结合进行脱氟,可以去除磷虾蛋白中 99% 的氟离子<sup>[1]</sup>。

表 5 南极磷虾全虾、肌肉、南极磷虾粉、鱼粉中矿物元素含量  
Table 5 The element contents of the whole Antarctic krill, muscle, krill meal and fish meal /mg · kg<sup>-1</sup>

参考文献 References	肌肉 Muscle			全虾	南极磷虾粉	白鱼粉	
	[9]	[28]	平均值 Mean	Whole shrimp	Krill meal	White fish meal	
	[9]	[28]	平均值 Mean	[8]	[8]	[27]	[19]
钙 Calcium	2 646.00	3 024.68	2 835.34	3 271.00	32 500.00	--	66 500.00
镁 Magnesium	641.00	--	641.00	--	7 200.00	--	1 800.00
铜 Copper	8.10	4.76	6.43	5.00	37.00	46.00	6.00
铁 Iron	6.00	49.28	27.64	47.00	145.00	--	299.00
锌 Zinc	12.60	45.83	29.22	45.00	28.00	51.00	90.00
锰 Manganese	<0.50	--	--	5.00	4.20	--	12.00
硒 Selenium	1.20	3.31	2.26	--	--	--	1.62
铬 Chromium	--	0.18	0.18	--	0.20	0.61	--
汞 Hydrargyrum	--	--	--	--	--	0.01	--
砷 Arsenic	--	--	--	--	--	4.00	--
铅 Lead	--	--	--	--	<0.10	0.09	--

注:--表示没数据。--: No data is available.

表6 南极磷虾全虾及各主要组织中的氟含量

Table 6 Fluoride contents of the whole Antarctic krill and some main tissues /mg · kg<sup>-1</sup>

序号 No.	整虾 Whole shrimp	外骨骼 Exoskeleton	头胸甲 Cephalothorax	甲壳 Carapace	触肢 Pedipalps	肌肉 Muscle	血淋巴 Hemolymph	参考文献 References
1	870	1 800	— <sup>1</sup>	—	—	—	—	[12]
2	1 160	—	—	—	—	—	—	[22]
3	2 400	3 330	3 690	4 260	1 950	550	—	[23] <sup>2</sup>
4	1 058	—	—	2 594	—	4.5	4.4	[24]

注:1:—表示没数据—; No data is available. 2:该组数值为南极磷虾经脱脂后检测的结果 The values are from fat free dry matter of krill samples.

南极磷虾渔场具有其自身的天然屏障,如海流活动、极地大气风和有限的人类干预,工业污染极少。该地区重金属主要来源于火山活动,因此南极磷虾粉中的重金属含量均较低,其中镉为0.1~0.61 mg/kg、铅<0.1 mg/kg、汞约为0.008 mg/kg,均小于欧盟对饲料原料中镉<2.0 mg/kg,铅<10.0 mg/kg,汞<0.5 mg/kg的上限规定<sup>[27,31]</sup>。

2.1.5 虾青素 虾青素学名3,3'-二羟基-4,4'-二酮基-β,β'-胡萝卜素,属于类胡萝卜素,是一种天然的色素,是自然界中抗氧化性最强的天然物质,其抗氧化能力是β-胡萝卜素的10倍、维生素E的550倍<sup>[29]</sup>。它在磷虾中主要以虾青素、虾青素单酯、虾青素双酯的形式存在<sup>[28]</sup>。南极磷虾粉中虾青素的平均含量约为180 mg/kg(132~250 mg/kg),主要取决于加工及资源和渔场的条件<sup>[20,31]</sup>。虾青素属于一种脂溶性色素,因此在南极磷虾油中含量丰富。Fujita等<sup>[32]</sup>检测南极磷虾油中含有1 080 mg/kg的类胡萝卜素,其中虾青素双酯占71%,虾青素单酯占20%。此外,虾青素在外骨骼中的分布要高于肌肉中。Yoshitomo等<sup>[12]</sup>检测到南极磷虾全虾粉中虾青素含量为90 mg/kg,脱去外骨骼后虾青素含量降为38 mg/kg。

## 2.2 南极磷虾油的主要营养成分

由表7可见,磷虾油的主要饱和脂肪酸含量占总脂肪酸含量的35.4%,以C14:0和C16:0为主;单不饱和脂肪酸含量为38.33%,高于鱼油中的24.9%,以C16:1n-7和C18:1n-9为主;多不饱和脂肪酸含量为26.03%,远低于鱼油中的32.6%。磷虾油与鱼油中都含有较高含量的EPA和DHA,磷虾油中EPA+DHA为14.72%,是鱼油(25.8%)中的57.05%。然而,鱼油中的脂肪酸大部分都是以甘油三酯(约为60%)的形式存在<sup>[1]</sup>,而磷虾油中30%~65%的脂肪酸是以磷脂的形式存在<sup>[33]</sup>。磷虾油中磷脂含量可达到48.37%~51.0%<sup>[34-35]</sup>。此外,磷虾油具有一种脂溶性色素虾青素(0.04%, w/w)<sup>[35]</sup>,它同时也是强大的抗氧化剂,可以避免磷虾油被氧化。磷虾油的这些独特的组成成分,使其与其它油脂相比具有独特价值,这方面的研究工作主要集中在磷虾油和鱼油对于改善人类健康方面

表7 南极磷虾油的脂肪酸组成

Table 7 The fatty acid composition of Antarctic krill oil

参考文献编号 References	鳀鱼油 Fish oil	磷虾油 Krill oil			磷脂型 磷虾油 Phospho- lipid-type krill oil
	[19]	[36]	[34]	平均值 Mean	[34]
12:0	— <sup>1</sup>	—	0.22	—	0.15
14:0	7.40	16.30	11.97	14.14	9.36
15:0	—	—	0.27	—	0.36
16:0	17.40	19.00	18.46	18.73	20.48
18:0	4.00	1.40	1.27	1.34	1.63
14:1n-5	—	—	0.18	—	0.10
15:1n-5	—	—	0.18	—	0.16
16:1n-7	10.50	11.20	10.61	10.91	6.40
17:1n-7	—	—	0.13	—	0.21
18:1n-9	11.60	15.80	24.07	19.94	20.33
18:1n-7	—	7.80	—	—	—
20:1n-9	1.60	1.40	1.78	1.59	0.95
22:1n-9	1.20	0.30	0.88	0.59	0.29
18:2n-6	1.20	1.60	3.76	2.68	5.69
18:4n-3	3.00	3.60	—	—	—
18:3n-6	0.10	—	0.29	0.29	0.23
18:3n-3	0.80	0.80	2.68	1.74	2.69
20:4n-3	—	0.20	0.35	0.28	0.39
20:4n-6	0.10	0.10	0.25	0.18	0.33
20:5n-3 EPA	17.00	6.40	13.61	10.01	17.51
22:2n-6	—	—	—	—	0.52
22:5n-3	1.60	0.20	0.30	0.25	0.5
22:6n-3 DHA	8.80	2.30	7.12	4.71	9.89
∑SFA <sup>2</sup>	34.60	38.60	32.19	35.40	31.98
∑MUFA <sup>2</sup>	24.90	38.10	38.56	38.33	29.38
∑PUFA <sup>2</sup>	32.60	23.70	28.36	26.03	37.76
n-3PUFA	27.40	14.60	24.06	19.33	30.98
n-6PUFA	1.14	2.10	4.30	3.20	6.25

注:1:—表示没数据—; No data is available. 2:∑SFA:饱和脂肪酸总量;∑MUFA:单不饱和脂肪酸总量;∑PUFA:多不饱和脂肪酸总量。∑SFA: Total saturated fatty acids; ∑MUFA: Total monounsaturated fatty acids; ∑PUFA: Total polyunsaturated fatty acids.

的作用效果的对比。大量对人类和啮齿目动物的研究结果显示, 南极磷虾油比鱼油更适合作为  $n-3$  不饱和脂肪酸的来源, 具有良好的调节脂肪代谢、提高抗炎反应能力的作用, 可能的原因就是以磷脂形式存的不饱和脂肪酸具有更高的生物利用率和在组织中的合成作用。

### 2.3 加工工艺对磷虾粉和磷虾油营养成分的影响

除不同时间和地点采集的南极磷虾的营养成分存在差异外, 由于南极磷虾体内的酶有很高的活性, 在被捕起之后, 其体内的内源消化酶迅速降解蛋白质, 使死亡后的组织快速分解, 加速了南极磷虾的自溶、变质、腐败<sup>[1]</sup>。这些酶主要包括以下 8 种蛋白酶, 即 3 种丝氨酸胰蛋白酶(Trypsin-like serine proteinase)、1 种氨基类胰凝乳蛋白酶(Chymotrysinlike serine proteinase)、2 种羧肽酶 A(Carboxypeptidase A enzyme)和 2 种羧肽酶 B(Carboxypeptidase B enzyme)<sup>[30]</sup>。此外, 传统的磷虾粉加工中, 原料磷虾原有的 70% 的脂肪含量进入磷虾粉中。这种脂肪含有高浓度的  $n-3$  脂肪酸, EPA 和 DHA 占 23% 以上(作为脂类的部分)。同时, 这种脂肪也含有高的磷脂含量(脂类的 40%~50%), 这种高含量的高不饱和脂肪酸极易氧化。新捕捞的南极磷虾在 2~4 °C 的温度环境下, 在甲板上贮存最长时间为 4 h<sup>[2]</sup>。因此, 新鲜的磷虾必须捕捞到船上后迅速被加工, 捕捞后的不同加工、贮存方式会对其基本的营养成分产生较大的影响。

研究表明, 捕捞后及时蒸煮加工并添加抗氧化剂, 能最大限度保存南极大磷虾中丰富的氨基酸及脂肪酸的营养价值, 此种方式获得的磷虾粉的一般营养价值要高于冻干后再加工。冻干加工, 易造成粗蛋白质含量方面的损失, 然而对南极磷虾体内的 PUFA 有较好的保护作用<sup>[18]</sup>。赵玲等对冷冻的南极磷虾进行空气解冻和静水解冻的对比, 发现 2 种解冻方式对南极磷虾体内的微量元素含量产生明显的影响, 空气解冻的南极磷虾中 Na 和 K 含量高于静水解冻的南极磷虾, Ca 和 Mg 的含量低于静水解冻的南极磷虾。不同解冻方式对南极磷虾的 B、Mn、Fe、Cu、Zn 和 Cr 含量的影响较大, 而对 V、Co、Ni、Mo 和 Sb 元素的含量影响不大<sup>[37]</sup>。

在提取南极磷虾油时, 冷冻干燥后再进行低温萃取的磷虾的出油率高于海上直接酶解的磷虾的出油率<sup>[1]</sup>。乙醇两步提取法的出油率可达到 15.72%, 高于丙酮/乙醇一步提取法 15.45% 的出油率和乙醇一步提取法的 11.61% 的出油率<sup>[29]</sup>。

## 3 南极磷虾粉在水产饲料中的应用

### 3.1 南极磷虾粉对水产动物生长性能的影响

在富含植物蛋白源的饲料中加入一定量的南极磷虾粉, 可以对水产动物的生长和饲料利用起到一定的

促进作用。可能的原因之一, 由于南极磷虾粉是水产动物的良好诱食剂, 可以有效的提高水产动物的摄食量。可能原因之二, 由于南极磷虾粉平衡的氨基酸比例, 使其成为可以与鱼粉相媲美的优质蛋白源。南极磷虾粉中呈味氨基酸的总量占氨基酸总量的 37% (见表 3), 此外还含有 0.61%~1.56% 的牛磺酸<sup>[17-18]</sup>, 对鱼类的诱食效果在大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)<sup>[38]</sup>、珍珠龙胆石斑(♀*Epinephelus fuscoguttatus* × ♂*Epinephelus lanceolatu*)<sup>[39]</sup>、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)<sup>[40]</sup>、黑鲈(*Centropristis striata*)<sup>[41]</sup>、大西洋鲑(*Saomo salar*)<sup>[42]</sup>和海鲷(*Pagrus major*)<sup>[43]</sup>中得到了证实。南极磷虾粉对鱼类的诱食刺激, 可能是由于磷虾粉中的风味化合物溶解到水中后或者是直接作用到鱼类口腔前庭的味蕾上<sup>[40]</sup>, 刺激鱼类的味觉和嗅觉兴奋, 进而引起鱼体的觅食行为。呈味氨基酸更多的存在于南极磷虾的外骨骼, 而不是肌肉中。李姝婧等<sup>[6]</sup>分别对南极磷虾的肌肉和下脚料(头、壳、尾)进行了氨基酸组成分析, 肌肉中呈味氨基酸占总氨基酸的 37.84% (占虾总重量的 1.86%), 而在下脚料中呈味氨基酸占总氨基酸的 45.15% (占虾总重量的 2.44%)。此外, 在应用电生理研究饲料组分对海鲷味觉和嗅觉反应的实验中发现, 海鲷对无肌肉磷虾粉的反应最强烈, 是白鱼粉的 1.5 倍, 而全虾磷虾粉是白鱼粉的 1.2 倍。对这 3 种原料进行氨基酸分析发现, 在无肌肉磷虾粉中含有高含量的肌氨酸、脯氨酸、谷氨酸、精氨酸、谷氨酰胺, 这几种氨基酸中主要起作用的是脯氨酸、谷氨酸和谷氨酰胺<sup>[43]</sup>。

然而, 这种促生长作用也因养殖鱼类的种类不同而存在差异。表 8 统计了在不影响体增重的情况下, 南极磷虾粉在不同种类水产动物实验中可以替代饲料鱼粉的比例。南极磷虾粉可以完全替代鱼粉作为大西洋鲑的饲料蛋白源, 并且对大西洋鲑的生长、血液生化指标都不产生显著影响<sup>[27]</sup>。同样, 南极磷虾粉也可以替代以植物蛋白为主要蛋白源的凡纳滨对虾饲料中的全部鱼粉, 而不对其生长和健康产生不良影响<sup>[44]</sup>。然而在对体长为 2 cm 的半滑舌鳎稚鱼的研究发现, 南极磷虾粉 25% 替代饲料组的特定生长率要高于全鱼粉组和 50% 的替代组, 当替代量超过 50% 时, 稚鱼的存活率显著降低, 同时降低 28 天时稚鱼体内各种消化酶活性以及肠道黏膜厚度<sup>[45]</sup>。南极磷虾粉在星斑川鲈幼鱼的饲料中鱼粉替代率仅为 15%, 珍珠龙胆石斑鱼的推荐替代鱼粉比例为 30%<sup>[39]</sup>。俄罗斯鲟获得最佳生长效果时的鱼粉替代比例为 10%<sup>[46]</sup>, 美洲龙虾的最低鱼粉替代比例为 12.5%<sup>[47]</sup>。大菱鲆的替代实验中, 用南极磷虾粉替代 20%、40% 和 60% 的鱼粉, 均未对大菱鲆的成活率、特定生长率, 体组成产生显著性差异, 但与对

对照组相比,添加南极磷虾粉的大菱鲂的干物质和蛋白质的表观消化率显著提高<sup>[38]</sup>。

同时,对于同一种类的鱼,不同研究者的实验条件和方法的不同,由于实验对象的大小、实验评估方法不同、养殖周期长短等差异,而导致对南极磷虾粉替代饲料鱼粉的比例也存在差异。第一,实验鱼的大小。Rungruangsak-Torrissen<sup>[48]</sup>通过对比大西洋鲑的幽门盲囊粗酶提取物的体外消化率,发现用大西洋磷虾粉替代鱼粉(替代比例为0、25%、50%)养殖100 g大西洋鲑的各实验组的体外消化率值均高于南极磷虾粉替代鱼粉(0、20%、40%、60%、80%和100%)养殖的1 kg大西洋鲑的值,说明较大的鱼比较小的鱼更敏感于饲料质量的变化。第二,养殖周期长短。Olsen等<sup>[13]</sup>用南极磷虾粉替代鱼粉对大西洋鲑进行140天的养殖实验,前71天里当南极磷虾粉替代鱼粉的替代量为20%~60%时,大西洋鲑的末体重和特定生长率(SGR)得到显著改善,然后后69天的养殖中未观察到生长上的显著差异。另一组用脱壳南极磷虾粉与豌豆蛋白(3.5:1)混合物替代鱼粉的大西洋鲑的养殖实验中,养殖周期是100天,在前56天时饲料中脱壳南极磷虾粉与豌豆蛋白(3.5:1)混合物替代的各组与鱼粉对照组相比,大西洋鲑SGR显著提高,而100天的全程SGR与全鱼粉相比仅有上升的趋势,但没有统计学上差异<sup>[10]</sup>。同样,Suontama等<sup>[14]</sup>用南极磷虾粉替代40%的鱼粉蛋白,对大西洋鲑进行160天的养殖实验,前100天南极磷虾粉的加入与全鱼粉对照组相比显著

提高了大西洋鲑的体重,体长及特定生长率,但在100~160天的实验过程中,南极磷虾粉组与全鱼粉对照组之间在生长表现上没有显著性差异,最终表现在全程的生长状况未受到南极磷虾粉替代的显著影响。分析其原因,可能是南极磷虾粉良好地诱食作用,促进了大西洋鲑养殖前期的摄食,而在养殖后期这种诱食的效果表现的不明显<sup>[10]</sup>。第三,实验评估方法。在对初始平均体重为500 g大西洋鲑进行140天的替代实验中,发现南极磷虾粉可以完全取代鱼粉作为饲料组分,对大西洋鲑的生长、饲料利用、鱼体健康不产生不良影响<sup>[13]</sup>。另一组进行168天对大西洋鲑的替代实验中,研究者以体外消化率(实验鱼幽门盲囊的粗酶提取液中胰蛋白酶活性T、胰凝乳蛋白酶活性C和T/C值)作为评价指标,发现随着南极磷虾粉替代鱼粉比例增加,大西洋鲑的体外消化率逐渐降低,通过与商业饲料和全鱼粉两个对照组作对照,得出大西洋鲑饲料中南极磷虾粉替代鱼粉的比例为50%~60%,当替代比例达到80%和100%时,鲑鱼的体外消化率值显著降低,并且鱼的体重和FCE均显著降低,说明南极磷虾粉替代80%~100%的鱼粉并不适合应用于大西洋鲑饲料中<sup>[45]</sup>。体外消化率与鱼类生长能力之间的相关性在虹鳟上已经得到证实,但在大西洋鲑的实验中,体外消化率与SGR没有相关性,但却与饲料转化率(FCE)表现出负相关性。因此作者认为体外消化率仅能够说明大西洋鲑的消化效率,但不能作为预测鱼生长状态的评价指标<sup>[45]</sup>。

表8 南极磷虾粉替代鱼粉比例

Table 8 The fish meal replacement ratio of Antarctic krill

动物名称 Animals	初始体重/g Initial body weight	鱼粉替代比例/% Fishmeal replacement ratio	参考文献 References
大菱鲂 <i>Scophthalmus maximus</i>	37.36	60	[38]
半滑舌鳎 <i>Cynoglossus semilaevis</i>	—	25	[45]
星斑川鲽 <i>Platichthys stellatus</i>	11.80	15	[39]
珍珠龙胆石斑鱼 ♀ <i>Epinephelus fuscoguttatus</i> × ♂ <i>Epinephelus lanceolatus</i>	57.80	30	
俄罗斯鲟 <i>Acipenser gueldenstaedtii</i>	4.05	10	[46]
大西洋鲑 <i>Salmo salar</i>	500	100	[13]
	105	50	[49]
	100	50~60	[48]
美洲龙虾 <i>Homarus americanus</i>	0.097	12.56	[47]
凡纳滨对虾 <i>Litopenaeus vannamei</i>	Clear water 养殖系统:0.29	100	[44]
	Green water 养殖系统:0.36		
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	5.5	30	[50]
大西洋鳕 <i>Gadus morhua</i>	122	100	[27]

注:—表示没数据 —: No data is available.

### 3.2 南极磷虾粉对水产养殖动物品质的影响

3.2.1 对水产品感官的影响 南极磷虾产品中富含虾青素,被用于增加大马哈鱼、虹鳟、黄条鲷、虾和其他养殖种类的鲜艳体色<sup>[31]</sup>。在黄鲷(*Seriola quinqueradiata*)鱼饲料中加入从南极磷虾粉中提取的磷虾油(类胡萝卜素含量为 108 mg/100g)可以提高背部、腹部和全部皮肤的类胡萝卜素含量,未添加磷虾油组黄鲷的体色变黑,侧线附近特有黄线消失,失去野生鱼的蓝绿色光泽,然而加入 2%的磷虾油就可以很好的改善这一现象<sup>[32]</sup>。南极磷虾产品(南极磷虾粉、磷虾肉糜、磷虾膏)对鲟鱼(*Acipenser schrenckii*)鱼卵的主要营养成分影响较小,但鱼卵的卵径、单颗卵重、硬度、色泽和感官评价值都有明显改善<sup>[51]</sup>。不同比例南极磷虾粉替代鱼粉进行大西洋鲑的养殖实验,9 周的实验结束时发现,添加磷虾粉的鱼皮肤侧线上方和下方比对照组红色强一些,而且有更多的黄色;与全鱼粉组和野生大西洋鲑相比,随着磷虾粉的增加实验鱼的肌肉颜色更白、黄色更强<sup>[52]</sup>。淡水养殖的银鲑(*Oncorhynchus kisutch*)作为实验对象,发现 80 g 体重的小鱼饲喂添加磷虾油以后鱼肉着色很少,然而当鱼的初始体重为 180 g,饲料中虾青素含量为 7.2 mg/100g 时,饲喂 4 周后,鱼肉着色非常明显,用这种饲料饲喂到 8 周后再饲以无类胡萝卜素添加的饲料投喂 24 周,仍可保留大部分类胡萝卜素沉积在鱼肉中<sup>[53]</sup>。此外, Ibrahim 等<sup>[54]</sup>发现未加工的南极磷虾比南极磷虾粉对真鲷体色的改善效果更明显,未加工的南极磷虾(类胡萝卜素含量 2 mg/100g 湿重)可以显著提高真鲷(*Chrysophrys major*)的类胡萝卜素的沉积率,并明显的改善真鲷体色,而南极磷虾粉通过加入南极磷虾粉丙酮提取物,调节其类胡萝卜素含量为 0.82~4.92 mg/100g 干重,各組间真鲷的皮肤中的类胡萝卜素含量存在差异,但与南极磷虾组相比着色模糊。

#### 3.2.2 对养殖鱼类肌肉蛋白质(氨基酸)组成的影响

磷虾粉替代饲料鱼粉后,提高了大西洋鲑白肌中的蛋白质浓度,进而提高了生鱼片质量,并且南极磷虾粉的改善效果优于北方磷虾粉<sup>[48]</sup>。南极磷虾粉可以通过改变养殖鱼类肌肉的氨基酸组成,尤其是呈味氨基酸的含量改善鱼肉品质。磷虾粉替代星斑川鲷饲料中的鱼粉能显著提高全鱼丙氨酸含量,酶解南极磷虾粉替代珍珠龙胆石斑鱼饲料中的鱼粉,降低了珍珠龙胆石斑鱼幼鱼全鱼酪氨酸和脯氨酸含量,提高了胱氨酸含量,而必需氨基酸和非必需氨基酸总含量不受影响<sup>[39]</sup>。

#### 3.2.3 对养殖鱼类肌肉脂肪(脂肪酸)组成的影响

南极磷虾粉可以促进水产动物肝脏脂肪分解代谢,减少脂肪合成,并减少肝糖原的分解供能<sup>[55]</sup>,调节水产动物肌肉中脂肪的种类和含量,从而影响水产品的品质。

鱼类肌肉中的脂肪尤其是多不饱和脂肪酸(PUFA)能显著增加鱼肉加热时产生的香味,提高鱼肉的口感和风味。据报道,随着饲料中酶解南极磷虾粉替代鱼粉比例升高,珍珠龙胆石斑鱼幼鱼肌肉脂肪含量逐渐降低<sup>[39]</sup>;淡水养殖的虹鳟饲料中南极磷虾粉替代鱼粉比例为 15%和 30%时,虹鳟肌肉中的脂肪含量显著低于全鱼粉组和 7%替代组<sup>[50]</sup>;点带石斑鱼(*Epimephelus malabaricus*)肌肉中的多不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的比值(P/S 值)随着南极磷虾粉的添加比例增加而升高<sup>[56]</sup>;用 60%的南极磷虾粉替代饲料中的豆粕和鱼粉,虹鳟体内 EPA、DHA、二十二碳五烯酸和 n-3PUFA 总量显著升高<sup>[15]</sup>。

#### 3.3 对水产动物繁殖性能及后代质量的影响

南极磷虾应用于饲料中,对水产动物繁殖性能的影响与养殖鱼类的种类以及磷虾粉的加工方式和添加比例有关。饲料中添加 10%的南极磷虾粉显著提高了半滑舌鳎亲鱼繁殖性能、仔鱼质量及抗氧化能力<sup>[57]</sup>;怀卵期真鲷饲料中使用南极磷虾,可有效提高上浮卵比例和正常鱼苗数量<sup>[58]</sup>。然而,在斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)饲料中加入南极磷虾粉未对刚孵化的鱼苗的生长起到显著的促进作用,且鱼苗的存活率显著降低<sup>[59]</sup>。过多使用南极磷虾粉也会造成负面影响,比如大西洋鲑饲料中南极磷虾粉替代鱼粉的比例达到 80%~100%时,引起卵母细胞发育异常,导致卵母细胞类胰蛋白酶的活性升高<sup>[48]</sup>;随着饲料中南极磷虾肽(将去壳后的南极磷虾肉通过生物酶解作用将大分子的蛋白质降解成为多肽)添加量的增加,斑马鱼的绝对繁殖力、怀卵数量、成熟系数都呈逐步下降的趋势,南极磷虾的添加量越大这种降低的趋势越明显,分析可能的原因是南极磷虾肽中的氟(5.9~15.6 mg/kg 饲料)对斑马鱼(*Barchydanio rerio var*)的生殖腺发育或卵子成熟有负面影响,导致繁殖力下降<sup>[57]</sup>。

#### 3.4 影响南极磷虾粉在水产饲料中应用的因素

南极磷虾外骨骼中含有大量的甲壳素和氟,这可能是限制其完全取代鱼粉作为水产动物饲料主要蛋白源的重要原因。对南极磷虾粉进行脱壳处理后,可以有效减少磷虾粉中的甲壳素和氟含量,进而提高南极磷虾粉的利用效果。淡水养殖的虹鳟,磷虾粉替代鱼粉的比例达到 30%时,体增重、饲料摄食量、特定生长率开始显著低于 0.7%、15%替代组<sup>[50]</sup>。然而,当对南极磷虾进行脱壳处理后,可以完全替代鱼粉作为虹鳟的饲料蛋白源,对淡水养殖的虹鳟的摄食量、饲料转化率、特定生长率、肝指数不产生负面影响<sup>[12]</sup>。同时,去除外骨骼的南极磷虾粉可以完全替代饲料鱼粉,而不对黄条鲷产生负面影响<sup>[61]</sup>。

壳聚糖作为甲壳素的一种脱乙酰化后产生的衍生

物,对脂肪的沉积具有抑制作用,进而影响鱼类对脂肪的代谢。珍珠龙胆石斑鱼幼鱼肌肉脂肪含量,随饲料中酶解磷虾粉含量的升高而降低<sup>[39]</sup>。当大西洋鲑饲料中南极磷虾粉替代鱼粉达到80%~100%时,其对饲料的脂肪消化率低于其他实验组,而且大西洋鲑粪便中的含水量显著升高。尽管在显微镜下未观察到肠道的病理特征,但这种现象怀疑是由于饲料中高浓度的甲壳素引起的食糜从肠道快速通过导致的腹泻现象<sup>[13]</sup>。当对南极磷虾粉进行脱壳处理后,降低磷虾粉中的甲壳素含量,鱼类的脂肪表观消化率得到明显改善。Hansen等<sup>[11]</sup>研究发现,大西洋鲑的脂肪表观消化率在各实验组的大小顺序为:部分脱壳磷虾粉组(甲壳素含量8.5 g/kg)>全鱼粉对照组(甲壳素含量0.1 g/kg)>全虾南极磷虾粉组(甲壳素含量20.9 g/kg)。分析原因可能是全虾南极磷虾粉显著降低了大西洋鲑幽门肠区域的胆汁酸含量,幽门肠是消化脂肪的主要场所,胆汁酸是脂肪酶产生活性以及脂肪酸有效吸收过程中的重要物质,幽门肠区域的胆汁酸含量减少导致了实验鱼脂肪消化率的降低。

氟通常沉积在水产动物体内比较坚硬的组织器官中,如骨骼、牙齿、鳞片和鳃等<sup>[46]</sup>。一些学者认为水产动物对氟的利用率可能受到水环境中盐浓度的普遍影响<sup>[62]</sup>。已有的报道指出,饲料中氟的生物利用率随着水硬度的增加而增加。然而,对2种以磷虾为食的野生大西洋海鱼 *Champscephalus gunnari* 和 *Notothenia rossii* 的鱼骨中氟含量进行检测,结果分别为33和15 g/kg,2种鱼具有同样的栖息环境,水体盐浓度相同,食性相同,但鱼骨骼中氟的含量相差一倍,这表明鱼骨中氟的沉积是依赖于鱼的种类而不是水的硬度<sup>[61]</sup>。研究发现,在一些水产养殖动物中,肌肉氟含量通常不受饲料中磷虾粉的添加浓度的影响,且肌肉中氟含量低于检测限(1 mg/kg)。然而,骨骼中的氟含量与饲料中磷虾粉的使用量呈现剂量效应。这一现象在大菱鲆<sup>[38]</sup>、星斑川鲷<sup>[39]</sup>、珍珠龙胆石斑鱼<sup>[39]</sup>、点带石斑鱼<sup>[63]</sup>、黄鲷<sup>[61]</sup>和虹鳟<sup>[50,12]</sup>的研究中得到证实。然而,在对半滑舌鳎稚鱼<sup>[45]</sup>、大西洋鲑<sup>[10,66]</sup>、凡纳滨对虾<sup>[44]</sup>、大西洋鳕<sup>[62]</sup>、庸鲽(*Hippoglossus hippoglossus*)<sup>[62]</sup>等水产动物的实验中,未发现饲料中的南极磷虾粉对鱼体各组织中的氟含量产生显著影响。大西洋鲑、鳕、庸鲽和虹鳟等水产动物可以通过粪便排泄摄入的高浓度的氟,避免氟对鱼体的健康和生长产生负面影响<sup>[10,62]</sup>,尽管磷虾粉中含有较高的氟,但这种矿物质不会在鱼体可食用部分累积<sup>[4]</sup>。

我国对食品中氟含量的允许量为肉类和鱼类(淡水) $\leq 2.0$  mg/kg(GB 4809-84)。尽管南极磷虾粉中高含量的氟不会对其作为水产饲料的安全性产生影响,

然而一些学者认为南极磷虾粉中高含量的氟会导致其在加入到饲料后,引起饲料总体的氟水平升高,被水产动物摄食后,在脊椎骨中不断累积,阻止了脊椎骨的生长,进而影响鱼类的生长。主要表现在南极磷虾粉替代鱼粉的比例超出一定范围后,随着南极磷虾粉添加量的增多,水产动物的体增重、摄食量逐渐降低<sup>[50]</sup>。因此,Yoshitomi等<sup>[61]</sup>提出南极磷虾应用于渔用饲料时,应该在加工过程中去除外骨骼。他们在研究中发现,用全虾磷虾粉(氟含量为870 mg/kg)和脱壳磷虾粉(氟含量为230 mg/kg)替代鳕鱼饲料中的鱼粉,替代比例均为0、15%、100%,其中全虾磷虾粉100%替代组的鱼体增重、摄食量、特定生长率和饲料转化率显著降低,其他各试验组间没有表现出显著性差异。而脱壳磷虾粉可以完全替代鱼粉,并不对鳕鱼生长产生负面影响。同样,在对虹鳟进行95天的淡水养殖实验中,低氟磷虾粉(氟含量为220 mg/kg)完全替代鱼粉时,虹鳟背肌氟含量为1 mg/kg,脊椎骨中的氟含量为1800 mg/kg;其他各替代组虹鳟的背肌氟含量都低于检出限(1 mg/kg),而脊椎骨中的氟含量随替代比例增加,由220 mg/kg升高到420 mg/kg<sup>[12]</sup>。

## 4 南极磷虾油的应用

### 4.1 调节高脂日粮引起肥胖动物体内的能量动态平衡

南极磷虾油对动物体内的脂类代谢起作用的主要因素是富含n-3不饱和脂肪酸,尤其是EPA和DHA。南极磷虾油通过降低肥胖动物血浆三酰基甘油(TAG)和胆固醇水平,刺激线粒体和过氧化物酶体脂肪酸的 $\beta$ -氧化来调节脂类代谢,对于肥胖引起的代谢综合症、非酒精性脂肪肝的疾病的治疗具有重要意义。日粮中加入磷虾油显著减少了高脂日粮肥胖大鼠(C57BL/6)肝脏的湿重、肝脏总脂肪含量、血清胆固醇水平和血液葡萄糖含量,并且肝脏中甘油三酯和胆固醇含量随着磷虾油添加量的增加而减少<sup>[65]</sup>。磷虾油可以抑制TAG在Hep G2细胞中的积累,加入2.5%磷虾油可以有效的减少高脂日粮导致的鼠(C57BL/6J)体增重过快和肥胖,但不影响摄食量,并且可以改善日粮引起的肝脏脂肪变性,减少由于高脂饲料而形成的肝脏脂肪滴<sup>[66]</sup>。在对肥胖的新西兰白兔的实验中观察到了磷虾油的添加减少了空腹血糖含量,提高了肥胖新西兰白兔的葡萄糖耐量,同时磷虾油促进了编码肝脏和骨骼肌中的 $\beta$ -氧化和脂肪合成过程中一些关键基因的表达<sup>[67]</sup>。磷虾油还可以通过减少内源性大麻酚类前体物合成的途径,减少肥胖鼠(C57BL/6)体内的内源性大麻酚类水平,对肥胖引起的心脑血管疾病及代谢失调起到治疗作用。内源性大麻酚类和他的脂类类似物,在外周组织中控制着动物体内能量的动态平衡,在肥胖

动物和人类中,尤其是由于持续摄入高脂饲料后而增加的肥胖,这种改变将会导致肥胖相关的代谢紊乱。对鼠进行 8 周的高脂饲料的饲养,导致除肝脏和附睾以外的所有组织中的内源性大麻酚类水平升高,降低了除肝脏以外的所有组织中的大黄素和 2-花生四甘油的水平,并且存在着剂量依赖关系<sup>[68]</sup>。

南极磷虾油的这种调节脂肪代谢的作用更多归因于其富含磷脂型的 n-3 不饱和脂肪酸。Li 等<sup>[34]</sup>用全磷虾油(磷脂含量为 48.37%)和磷脂型磷虾油(磷脂含量为 69.8%)对高胆固醇日粮饲喂的大鼠进行实验,结果表明全磷虾油和磷脂型磷虾油都可以减少肥胖大鼠的体增重和血浆中甘油三酯以及高密度脂蛋白的含量。然而,磷脂型磷虾油比全磷虾油具有更好的作用效果。

#### 4.2 抗炎症反应

Skorve 等<sup>[69]</sup>发现,在鼠的高脂日粮中加入磷虾油比加入鱼油更显著增加鼠肝脏中的神经酰胺和神经鞘氨醇含量,以及花生四烯酸的水平。在体外用 TNF $\alpha$  (10 ng/mL)和 IFN $\gamma$  (250 ng/mL)诱导 CACO2 和 HT29 细胞的炎症反应,表现在发炎细胞中 E-cadherin, ZO-1 含量减少,同时细胞间黏连缺失, F-actin 多聚体张力丝增加。南极磷虾油可以使这些发生炎症反应的细胞回复到最初状态,并且增强受损肠道边缘的伤口愈合,减少肠上皮细胞的细菌黏连/侵袭,减少 LFB2 诱导的促炎细胞素 mRNA 的表达。说明磷虾油可以在肠道发生炎症时提高肠道边界的完整性和肠上皮细胞的恢复(Restitution),控制细菌对肠上皮细胞的黏连和侵袭<sup>[35]</sup>。然而,另一研究发现对 hTNF- $\alpha$  转基因鼠的高脂日粮中分别加入鱼油和磷虾油,除了鱼油组鼠肝脏的 IL-17 水平增加,磷虾油组鼠肠道脂肪组织的 MCP-1 有下降趋势以外,促炎症反应的细胞因子(肝脏 IFN $\gamma$ , 肝脏 IL-1 $\beta$ , 肝脏 IL-2, 肠道脂肪组织 IL-6, 肠道脂肪组织瘦素)没有在各处理组间产生差异,说明鱼油和磷虾油都没有显著的表现出他们的抗炎性潜能<sup>[70]</sup>。

#### 4.3 磷虾油与鱼油存在着不同的代谢机制

鱼油和磷虾油都能促进血浆中脂质含量的下降,调节脂类的动态平衡,但是功效和代谢机制存在差异。首先,南极磷虾油和鱼油中不同的脂类类型导致其在动物体内的代谢过程不同,进而导致脂肪酸在动物体内的分布不同。在高脂日粮引起肥胖的大鼠体内,磷虾油中的 DHA 分解量显著高于鱼油,磷虾油中的二十二碳五烯酸(C22:5n)有 80% 被分解,而鱼油中的 C22:5n 仅 35% 被分解。与此相反,磷虾油日粮处理组大鼠摄入的 C22:5n 只有不超过 10% 发生了  $\beta$ -氧化,而在鱼油日粮处理组中 C22:5n 在大鼠体内发生  $\beta$ -氧化的量占到 60%<sup>[71]</sup>。另一组研究的结果显示,鱼油和南极磷虾油都会使高脂日粮饲喂的大鼠肝脏中的 TAG 含量

升高 2 倍,肝脏和脑中的 C18:2 和 C20:4 的含量降低,C20:5 和 C22:6 含量增加,但鱼油组大鼠体内的所有脂类中的 C18:2 脂肪酸都减少,磷虾油组中的这种变化却很小。磷虾油与鱼油组之间的差异还表现在一些与炎症反应和胰岛素抗性有关的较小的脂类上,磷虾油组实验鼠肝脏中神经酰胺和二酰基甘油减少,胆固醇酯增加;鱼油组实验鼠的缩醛磷脂减少。在脑中磷虾油比鱼油减少二酰基甘油的量要多,而鞘氨醇和乳糖酶基神经鞘氨醇的量在鱼油组比磷虾油组增加的多。磷虾油主要使鼠肝脏中鞘氨醇和 C20:4 脂肪酸水平显著增加。说明,鱼油对脂类代谢主要体现在降低了血浆中胆固醇、TAG、磷脂的含量,而磷虾油主要是作用于影响血浆中胆固醇和较小的脂类的合成水平<sup>[69]</sup>。

其次,鱼油对肥胖动物脂代谢的调节表现在某种程度上减少了肥胖动物体内的极低密度脂蛋白含量,进而降低了血浆中甘油三酯的含量,增加线粒体和过氧化酶体中大多数与脂肪酸氧化有关的基因的表达,促进脂肪代谢。然而磷虾油对脂肪代谢基因的调控作用并不明显,主要是影响了血浆中胆固醇的合成水平,而改善肥胖动物的能量动态平衡。此外,与鱼油不同,磷虾油对肝脏中脂肪的累积起的作用较少,主要是减少涉及早期类异戊二烯或胆固醇的合成有关的基因表达<sup>[72-73]</sup>,如胆固醇合成过程中的限速酶 HMG-CoA 还原酶。

## 5 结论与展望

南极磷虾资源丰富。据南极海洋生物资源保护委员会(CCAMR)的估计,南极磷虾的年捕捞量可达到  $8.6 \times 10^6$  t。然而截止到 2012 年的统计数据显示,实际年捕捞量仅为  $2.1 \times 10^5$  t<sup>[74]</sup>,因此南极磷虾资源还有巨大的开发空间。南极磷虾氨基酸、脂肪酸营养均衡,是一种公认的优质蛋白源,可以用于水产饲料中,对养殖动物起到促进生长,改善鱼肉品质,提高繁殖性能等功效。但南极磷虾在水产饲料中的应用还存在以下几个问题:

(1) 尽管南极磷虾的资源量大,但如前文所述,由于其主要分布在南极海域,加之其必须在捕捞后迅速被加工,因此南极磷虾的捕捞及加工需要较高的人力、物力和财力的投入,导致南极磷虾粉及其周边产物的价格高于鱼粉等一般饲料原料,这成为限制其在饲料生产中广泛应用的首要因素。

(2) 不同加工工艺对南极磷虾粉的营养价值产生较大影响,通过脱壳处理<sup>[9,12]</sup>,水解<sup>[42]</sup>,等电点浓缩分离<sup>[5]</sup>等工艺,可以降低南极磷虾中的氟和甲壳素,提高其蛋白的利用率,但究竟哪一种更适合南极磷虾的实际加工,

选择出一套既方便操作又节约成本,还可以得到最佳的南极磷虾产品的加工方案有待于进一步研究。

(3) 南极磷虾粉对水产动物的生长、品质及繁殖性能的影响在不同水产养殖动物间存在一定差异,如何更好地将其在水产饲料中广泛利用,还需要开展大量的研究工作。

(4) 南极磷虾油中富含的磷脂型 n-3 不饱和脂肪酸,对人和啮齿类动物健康有明显的改善作用,但南极磷虾油在水产动物中的应用研究还十分有限。Nunes 等<sup>[44]</sup>发现南极磷虾油可以部分取代鱼油而不显著影响凡纳滨对虾的生长,大西洋鲑饲料中加入同样比例的鱼油和南极磷虾油(15%),结果发现鲑鱼对两种油脂的脂肪消化率均可达以 93% 和 90%<sup>[36]</sup>。南极磷虾油在水产饲料中有广阔的应用前景,但还需要大量的基础研究作为支撑。

综上,南极磷虾可以有效替代鱼粉成为水产饲料新的优质蛋白源,但其在水产养殖中的应用还需要更深度的开发。

#### 参考文献:

- [1] 王南平, 何兰, 曹俊, 等. 南极磷虾的特性和利用[J]. 水产科技情报, 2012, 40(3): 128-131.  
WANG Nanping, HE Lan, CAO Jun, et al. Characters and application of Antarctic krill [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2012, 40(3): 128-131.
- [2] Hertrampf J W. Handbook on Ingredients for Aquaculture Feeds [C]. Dordrecht, Netherland; Kluwer Academic Publishers, 2000: 221-228.
- [3] 常青, 秦帮勇, 孔繁华, 等. 南极磷虾在水产饲料中的应用[J]. 动物营养学报, 2013, 25(2): 256-262.  
CHANG Qing, QIN Bangyong, KONG Fanhua, et al. Application of Antarctic krill in aquatic feed[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2013, 25(2): 256-262.
- [4] Trond Storebakken. Krill as a potential feed source for salmonids [J]. Aquaculture, 1988, 70(3): 193-205.
- [5] Gigliotti J C, Jaczynski J, Tou J C. Determination of the nutritional value protein quality and safety of krill protein concentrate isolated using an isoelectric solubilization /precipitation technique[J]. Food Chemistry, 2008, 111: 209-214.
- [6] 李姝婧. 南极磷虾加工下脚料营养成分分析及蛋白质回收研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.  
LI Shujing. Nutrient Compositions and Protein Recovery of Antarctic Krill Processing by-Products[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [7] 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(4): 57-64.  
SUN Lei, ZHOU Deqing, SHENG Xiaofeng. Nutrition and safety evaluation of Antarctic krill[J]. Marine Fisheries Research, 2008, 29(4): 57-64.
- [8] 刘志东, 陈雪忠, 黄洪亮, 等. 南极磷虾粉的营养成分分析及评价[J]. 中国海洋药物杂志, 2012, 31(2): 43-48.  
LIU Zhidong, CHEN Xuezhong, HUANG Hongliang, et al. Analysis and evaluation of nutritional components of Antarctic krill powder[J]. Chin J Mar Drugs, 2012, 31(2): 43-48.
- [9] Jiang Qixing, Li Shujing, Xu Yanshun, et al. Nutrient compositions and properties of Antarctic krill (*Euphausia superba*) muscle and processing by-products[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2016, 25(3): 434-443.
- [10] Jon Øvrvm Hansen, Karl D. Shearer, Margareth Øverland, et al. Replacement of LT meal with a mixture of partially deshelled krill meal and pea protein concentrates in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. Aquaculture, 2011, 315: 275-282.
- [11] Jon Øvrvm Hansen, Michael Penn, Margareth Øverland, et al. High inclusion of partially deshelled and whole krill meals in diets for Atlantic samon (*Salmo salar*) [J]. Aquaculture, 2010, 310: 164-172.
- [12] Bunji Yoshitomi, Masatoshi Aoki, Syun-ichirou Oshima. Effect of total replacement of dietary fish meal by low fluoride krill (*Euphausia superba*) meal on growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in fresh water [J]. Aquaculture, 2007, 266: 219-225.
- [13] Olsen R E, Suontama J, Langmyhr E, et al. The replacement of fish meal with Antarctic krill, *Euphausia superba* in diets for Atlantic salmon, *Salmo salar* [J]. Aquaculture Nutrition, 2006, 12: 280-290.
- [14] Suontama J, Karlsen Ø, Moren M, et al. Growth, feed conversion and chemical composition of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) fed diets supplemented with krill or amphipods [J]. Aquaculture Nutrition, 2007, 13: 241-255.
- [15] Alessandra Roncarati, Federico Sirri, Alberto Felici, et al. Effects of dietary supplementation with krill meal on pigmentation and quality of flesh of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Italian Journal of Animal Science, 2011, 10(27): 139-145.
- [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 Yue, LI Xueying, YAN Xianshi, et al. Analysis and comparison on the nutritional components of different Antarctic krill meals [J]. Marine Fisheries, 2012, 34(4): 457-463.
- [17] 龚洋洋, 陆建学, 黄艳青, 等. 南极磷虾氨基酸营养价值分析与评价 [J]. 饲料工业, 2013, 34(16): 38-41.  
GONG Yangyang, LU Jianxue, HUANG Yanqing, et al. Analysis and evaluation of the nutritional quality of Antarctic krill meal [J]. Feed Industry, 2013, 34(16): 38-41.
- [18] 黄艳青, 龚洋洋, 陆建学, 等. 不同加工方式的南极大磷虾粉营养成分评价 [J]. 南方水产科学, 2013, 9(6): 58-65.  
HUANG Yanqing, GONG Yangyang, LIU Jianxue, et al. Evaluation of nutritional quality of Antarctic krill meal by different processing methods [J]. South China Fisheries Science, 2013, 9(6): 58-65.
- [19] 麦康森, 李鹏, 赵建民. 鱼类与甲壳类营养需要 [M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 2015.  
MAI Kangsen, LI Peng, ZHAO Jianmin. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp [M]. The First Edition. Beijing: Science Press, 2015.
- [20] 楼乔明, 王玉明, 杨文鸽, 等. 南极磷虾粉脂质及脂肪酸组成成分

- 析[J]. 水产学报, 2012, 36(8): 1256-1262.
- LOU Qiaoming, WANG Yuming, YANG Wenge, et al. Lipid classes and fatty acid compositions of Antarctic krill meal[J]. Journal of fisheries of China, 2012, 36(8): 1256-1262.
- [21] 楼乔明, 王玉明, 刘小芳, 等. 南极磷虾脂肪酸组成及多不饱和脂肪酸质谱特征分析[J]. 中国水产科学, 2011, 18(4): 929-935.
- LOU Qiaoming, WANG Yumin, LIU Xiaofang, et al. Analysis of fatty acid composition and mass spectrometry characterization of polyunsaturated fatty acids in *Euphausia superba* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(4): 929-935.
- [22] Moren M, Malde M K, Olsen R E, et al. Fluorine accumulation in Atlantic salmon (*Salmo salar*), Atlantic cod (*Gadus morhua*), rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*) and Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) fed diets with krill or amphipod meals and fish meal based diets with sodium fluoride (NaF) inclusion [J]. Aquaculture, 2007, 269: 525-531.
- [23] Soevik T, Braekkan O R. Fluoride in Antarctic krill (*Euphausia superba*) and Atlantic krill (*Meganyctiphanes norvegica*) [J]. J Fish Res Board Can, 1979, 36: 1414-1416.
- [24] Adelung D, Buchholz F, Culik B, et al. Fluoride in tissues of krill *Euphausia superba* Dana and *Meganyctiphanes norvegica* M. Sars in relation to moult cycle[J]. Polar Biol, 1987, 7: 43-50.
- [25] Jon Øvrum Hansen, Karl Douglas Shearer, Margareth Øverland, et al. Dietary calcium supplementation reduces the bioavailability of fluoride from krill shell and NaF in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in fresh water[J]. Aquaculture, 2011, 318: 85-89.
- [26] 龚洋洋, 黄艳青, 陆建学, 等. 南极磷虾粉在水产饲料中的应用研究进展[J]. 海洋渔业, 2013, 35(2): 236-242.
- GONG Yangyan, HUANG Yanqing, LU Jianxue, et al. Progress of krill meal application in aquafeeds[J]. Marine Fisheries, 2013, 35(2): 236-242.
- [27] Moren M, Suontama J, Hemre G I, et al. Element concentrations in meals from krill and amphipods. —Possible alternative protein sources in complete diets for farmed fish[J]. Aquaculture, 2006, 261: 174-181.
- [28] 刘志东, 陈雪忠, 曲映红, 等. 南极冰鱼与南极磷虾营养成分分析及比较[J]. 现代食品科技, 2014, 30(2): 228-233.
- LIU Zhidong, CHEN Xuezhong, QU Yinghong, et al. Comparison and evaluation of the nutritional components of Antarctic icefish and krill[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(2): 228-233.
- [29] 郭休玉, 何兰, 曹俊, 等. 南极磷虾油提取方法比较及主要营养成分分析[J]. 水产科技情报, 2013, 40(5): 254-257.
- GUO Xiuyu, HE Lan, CAO Jun, et al. Comparison of extracting methods and analysis of nutrient compositions of Antarctic krill oil [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2013, 40(5): 254-257.
- [30] 刘丽, 刘承初, 赵勇, 等. 南极磷虾的营养保健功效以及食用安全性评价[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 443-447.
- LIU Li, LIU Chengchu, ZHAO Yong, et al. Recent advances in healthcare function and food safety of Antarctic krill[J]. Food Science, 2010, 31(17): 443-447.
- [31] 徐吟梅, 邱卫华, 余丽萍, 等. 南极磷虾粉的营养与功能[J]. 现代渔业信息, 2010, 25(8): 14-16.
- XU Yingmei, QIU Weihua, YU Liping, et al. Nutrition composition and function of Antarctic krill meal[J]. Modern Fisheries Information, 2010, 25(8): 14-16.
- [32] Takao Fujita, Mikio Satake, Shozō Hikichi, et al. Pigmentation of cultured yellowtail with krill oil[J]. Bulletin of Japanese Society of Scientific Fisheries, 1983, 49(10): 1595-1600.
- [33] Eleese Cunningham. Are krill oil supplements a better source of n-3 fatty acids than fish oil supplements[J]. Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics, 2012, 112(2): 344.
- [34] Dong-Mei Li, Da-Yong Zhou, Bei-Wei Zhu, et al. Effects of krill oil intake on plasma cholesterol and glucose levels in rats fed a high-cholesterol diet[J]. J Sci Food Agric, 2013, 93: 2669-2675.
- [35] Manuela Costanzo, Vincenzo Cesi, Enrica Prete, et al. Krill oil reduces intestinal inflammation by improving epithelial integrity and impairing adherent invasive *Escherichia coli* pathogenicity [J]. Digestive and Liver Disease, 2016, 48: 34-42.
- [36] Combo-Hixson Stefanie M, Olsen Rolf E, Milley J E, et al. Lipid and fatty acid digestibility in *Calanus* copepod and krill oil by Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) [J]. Aquaculture, 2011, 313: 115-122.
- [37] 赵玲, 殷邦忠, 陈岩, 等. 2种解冻方式的南极磷虾中20种元素含量分析[J]. 农产品加工(学刊), 2014(3): 37-44.
- ZHAO Ling, YIN Bangzhong, CHEN Yan, et al. Content analysis of twenty elements in two thawing methods of Antarctic krill [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014(3): 37-44.
- [38] 孔凡华, 梁萌青, 吴立新, 等. 南极磷虾粉对大菱鲆生长、非特异性免疫及氟残留的影响[J]. 渔业科学进展, 2012, 33(1): 54-60.
- KONG Fanhua, LIANG Mengqing, WU Lixin, et al. Effect of different level of Antarctic krill meal on growth, non-specific immunity and fluoride retention in diets of turbot *Scophthalmus maximus* [J]. Progeress in Fishery Sciences, 2012, 33(1): 54-60.
- [39] 魏佳丽. 磷虾粉在星斑川鲷和珍珠龙胆石斑鱼幼鱼饲料中的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- WEI Jiali. Application Effects of Krill Meal in Feeds for Juvenile Starry Flounder (*Platichthys stellatus*) and Pearl Gentian Group-er (♀ *Epinephelus fuscocuttatus* × ♂ *Epinephelus lanceolatu*) [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [40] Magdy M a Gaber. The effect of different levels of krill meal supplementation of soybean-based diets on feed intake, digestibility, and chemical composition of juvenile Nile Tilapia *Oreochromis niloticus*, L [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2005, 36(3): 346-353.
- [41] Md Shah Alam, Wade O Watanabe, Katherine B Sullivan, et al. Replacement of menhaden fish meal protein by solvent-extracted soybean meal protein in the diet of juvenile black sea bass supplemented with or without squid meal, krill meal, methionine, and lysine[J]. North American Journal of Aquaculture, 2012, 74: 251-265.
- [42] Kousoulaki K, Rønnestad I, Olsen H J, et al. Krill hydrolysate free amino acids responsible for feed intake stimulation in Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. Aquaculture Nutrition, 2013, 19: 47-61.

- [43] Chiaki Shimizu, Allahpichay Ibrahim, Takashi Tokoro, et al. Feeding stimulation in sea bream, *Pagrus major*, fed diets supplemented with Antarctic krill meals[J]. *Aquaculture*, 1990, 89(1): 43-53.
- [44] Nunes A J P, Sá M V C, Sabry-Neto H. Growth performance of the white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, fed on practical diets with increasing levels of the Antarctic krill meal, *Euphausia superba*, reared in clear - versus green - water culture tanks[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, 17: 511-520.
- [45] 常青, 于朝磊, 秦帮勇, 等. 南极磷虾粉对半滑舌鳎稚鱼生长、消化育及氟含量的影响[C]// 第九界世界华人鱼虾营养学术研讨会论文摘要汇编. 厦门: 中国水产学会水产动物营养与饲料专业委员会, 2013: 419.
- CHANG Qing, YU Chaolei, QIN Banyong, et al. Effect of dietary Antarctic krill meal on growth, development of digestive tract and fluoride retention in tongue sole postlarvae[C]// The ninth symposium of world's Chinese scientists on nutrition and feeding of finfish and shellfish abstract book. Xiamen: The Aquatic Animal Nutrition and Feed Professional Committee, Chinese Society of Aquatic, 2013: 419.
- [46] 龚洋洋, 黄艳青, 陆建学, 等. 不同配比南极磷虾粉饲料对网箱养殖俄罗斯鲟生长及氟累积的影响[J]. *海洋渔业*, 2015, 37(2): 164-170.
- GONG Yangyang, HUANG Yanqing, LU Jianxue, et al. Effects of krill meal on growth performance and fluoride accumulation of cage cultured *Acipenser gueldenstaedtii* [J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37(2): 164-170.
- [47] Floreto E A T, Brown P B, Bayer R C. The effects of krill hydrolysate-supplemented soya-bean based diets on the growth, colouration, amino and fatty acid profiles of juvenile American lobster, *Homarus americanus*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2001, 7: 33-43.
- [48] Krisna Rungruangsak-Torrissen. Digestive efficiency, growth and qualities of muscle and oocyte in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed on diets with krill meal as an alternative protein source [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2007, 31: 509-540.
- [49] Einar Ringø, Sigmund Sperstad, Reidar Myklebust, et al. The effect of dietary krill supplementation on epithelium-associated bacteria in the hindgut of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): a microbial and electron microscopical study [J]. *Aquaculture Research*, 2006, 37: 1644-1653.
- [50] Bunji Yoshitomi, Masatoshi Aoki, Syun-ichirou Oshima, et al. Evaluation of krill (*Euphausia superba*) meal as a partial replacement for fish meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets [J]. *Aquaculture*, 2006, 261: 440-446.
- [51] 龚洋洋, 黄艳青, 陆建学, 等. 饲料中添加南极磷虾产品对施氏鲟鱼子酱品质的影响[J]. *海洋渔业*, 2015, 37(1): 52-59.
- GONG Yangyang, HUANG Yanqing, LU Jianxue, et al. Influence of Antarctic krill included feeds on Amur sturgeon caviar quality[J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37(1): 52-59.
- [52] Ørjan Karlsen, Suontama J, Olsen R E, et al. Effect of Antarctic krillmeal on quality of farmed Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) [J]. *Aquaculture Research*, 2006, 37(16): 1676-1684.
- [53] Shigeru Arai, Tetsu Mori, Wataru Miki, et, al. Pigmentation of juvenile coho salmon with carotenoid oil extracted from Antarctic krill[J]. *Aquaculture*, 1987, 66(3-4): 255-264.
- [54] Allahpichay Ibrahim, Chiaki Shimizu, Michiko Kono. Pigmentation of cultured red sea bream, *Chrysophrys major*, using astaxanthin from Antarctic krill, *Euphausia superba*, and a mysid, *Neomysis sp.* [J]. *Aquaculture*, 1984, 38(1): 45-57.
- [55] Bodil Bjørndal, Rita Vik, Trond Brattelid, et al. Krill powder increases liver lipid catabolism and reduces glucose mobilization in tumor necrosis factor-alpha transgenic mice fed a high-fat diet[J]. *Metabolism Clinical and Experimental*, 2012, 61: 1461-1472.
- [56] 黄艳青, 高露姣, 陆建学, 等. 饲料中添加南极大磷虾粉对点带石斑点幼鱼生长与肌肉营养成分的影响[J]. *海洋渔业*, 2010, 32(4): 440-446.
- HUANG Yanqing, GONG Yangyang, LU Jianxue, et al. Effect of Antarctic krill powder on tissue fluoride accumulation and growth of juvenile grouper (*Epinephelus malabaricus*) [J]. *Marine Sciences*, 2010, 32(4): 440-446.
- [57] 赵敏. 饲料中不同水平牛磺酸和磷虾粉对半滑舌鳎繁殖性能及后代质量的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- ZHAO Min. Effects of different levels of dietary taurine and krill meal on reproductive performance and offspring quality of tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [58] Takeshi Watanabe, Tadashi Koizumi, Hidekazu Suzuki, et al. Improvement of quality of red sea bream eggs by feeding broodstock on a diet containing cuttlefish meal or on raw krill shortly before spawning[J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1985, 51(9): 1511-1521.
- [59] Charles R Weirich, Clifford C O'neal, Karim Belhadjali. Growth body composition and survival of channel catfish *Ictalurus punctatus* fry fed hatchery diets supplemented with krill meal[J]. *Journal of Applied Aquaculture*, 2005, 17(3): 21-35.
- [60] 梁冰, 刘云, 姜国良. 南极磷虾肽对斑马鱼生长及生理生化指标的影响[J]. *饲料研究*, 2014, 17: 42-45.
- LIANG Bing, LIU Yun, JIANG Guoliang. Effects of Antarctic krill peptide on the growth and physical and biochemical parameters of zebra fish[J]. *Feed Research*, 2014, 17: 42-45.
- [61] Bunji Yoshitomi, Ichiro Nagano. Effect of dietary fluoride derived from Antarctic krill (*Euphausia superba*) meal on growth of yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) [J]. *Chemosphere*, 2012, 86: 891-897.
- [62] Moren M, Malde M K, Olsen R E, et al. Fluorine accumulation in Atlantic salmon (*Salmo salar*), Atlantic cod (*Gadus morhua*), rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) fed diets with krill or amphipod meals and fish meal based diets with sodium fluoride (NaF) inclusion [J]. *Aquaculture*, 2007, 269: 525-531.
- [63] 黄艳青, 龚洋洋, 陆建学, 等. 南极大磷虾粉对点带石斑鱼幼鱼氟蓄积的影响[J]. *海洋科学*, 2015, 39(6): 32-38.
- HUANG Yanqing, GONG Yangyang, LU Jianxue, et al. Effect of Antarctic krill powder on tissue fluoride accumulation and growth of juvenile grouper (*Epinephelus malabaricus*) [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(6): 32-38.
- [64] Køre Julshamn, Marian Kjellefold Malde, Kjell Bjorvatn, et al. Fluoride retention of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed krill meal [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2004, 10: 9-13.

- [65] Sally Tandy, Rosanna W S Chung, Elaine Wat, et al. Dietary krill oil supplementation reduces hepatic steatosis, glycemia, and hypercholesterolemia in high-fat-fed mice [J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57: 9339-9345.
- [66] Ming-Fen Lee, Ching-Shu Lai, An-Chin Cheng, et al. Krill oil and xanthigen separately inhibit high fat diet induced obesity and hepatic triacylglycerol accumulation in mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 19: 913-921.
- [67] Zhenya Ivanova, Bodi Bjørndal, Natalia Grigorova, et al. Effect of fish and krill oil supplementation on glucose tolerance in rabbits with experimentally induced obesity[J]. *Eur J Nutr*, 2015, 54: 1055-1067.
- [68] Fabiana Piscitelli, Gianfranca Carta, Tiziana Bisogno, et al. Effect of dietary krill oil supplementation on the endocannabinoidome of metabolically relevant tissues from high-fat-fed mice[J]. *Nutrition & Metabolism*, 2011, 8: 51.
- [69] Jon Skorve, Mika Hilvo, Terhi Vihervaara, et al. Fish oil and krill oil differentially modify the liver and brain lipidome when fed to mice[J]. *Lipids in Health and Disease*, 2015, 14: 88.
- [70] Natalya Filipchuk Vigerust, Bodil Bjørndal, Pavol Bohov. Krill oil versus fish oil in modulation of inflammation and lipid metabolism in mice transgenic for TNF- $\alpha$ [J]. *Eur J Nutr*, 2013, 52: 1315-1325.
- [71] Ghasemi Fard S, Turchini G M, Sinclair A J. Bioavailability of fish oil vs krill oil - influence of gender[J]. *Journal of Nutrition & Intermediary Metabolism*, 2014(1): 1-55.
- [72] Veronika Tillander, Bodi Bjørndal, Lena Burri, et al. Fish oil and krill oil supplementations differentially regulate lipid catabolic and synthetic pathways in mice[J]. *Nutrition & Metabolism*, 2014, 11: 20.
- [73] Veronika Tillander, Lena Burri, Stefan Alexson. Fish oil and Krill oil differentially regulate gene expression 2010 *Chemistry and Physics of Lipids*[J]. *Chemistry and Physics of Lipids*, 2010, 1635: 322-333.
- [74] Stephen Nicol, Jacqueline Foster, So Kawaguchi. The fishery for Antarctic krill recent developments[J]. *Fish and Fisheries*, 2012, 13: 30-40.

## Main Nutrient Compositions of Antarctic Krill and Its Application in Aqua-Feeds

MAI Kang-Sen<sup>1</sup>, WEI Yu-Ting<sup>1</sup>, WANG Jia<sup>2</sup>, ZHANG Wen-Bing<sup>1</sup>

(1. The Key Laboratory of Aquaculture Nutrition and Feeds, Ministry of Agriculture; The Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Qingdao Bio-ways Ingredients Bio-technology Co., Ltd, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Antarctic krill is a recognized high quality protein source because of its large biomass, balanced amino acid and fatty acid compositions. It can be used in aqua-feed to promote growth and improve the quality and reproductive performance of fish. In this paper, the recent years' research progress of krill meal in aqua-feeds has been summarized, including the effects of dietary krill meal on growth, quality, reproductive performance and the scientific and technological factors limiting the application of krill meal in aqua-feeds. At the same time, it summarizes the research progress of effects of dietary krill oil on animal's energy dynamic balance, anti-inflammation and its metabolic mechanism. Based on these progresses, the further studies on the application of krill meal in aqua-feed are also suggested.

**Key words:** krill meal; krill oil; aquaculture animal; feed; nutrition

责任编辑 朱宝象