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.

南极磷虾综合利用研究进展

谈俊晓^{1,2}, 赵永强¹, 李来好¹, 杨贤庆¹, 吴燕燕¹, 魏 涯¹, 岑剑伟¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所 / 农业部水产品加工重点实验室 /
国家水产品加工技术研发中心, 广东 广州 510300;
2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘要: 我国南极磷虾产业在近年得到不断发展, 但由于捕捞、加工技术不成熟等问题, 我国南极磷虾资源利用率还比较低, 因此, 分析南极磷虾综合利用研究进展对我国发展南极磷虾产业具有重要指导意义。在介绍国内外南极磷虾资源与开发利用现状的基础上, 分别从蛋白质、脂质、矿物质元素含量 3 个方面综述了南极磷虾的营养成分; 从酶类、甲壳素、虾青素含量 3 方面介绍了南极磷虾的活性成分, 并列出了南极磷虾加工产品的主要形式; 分析了南极磷虾资源开发过程中存在的问题, 并提出建议与对策, 为进一步提高南极磷虾资源的综合利用提供参考。

关键词: 南极磷虾; 资源开发; 产品形式; 研究进展

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-874X(2017)03-0143-08

Research progress on comprehensive utilization of Antarctic krill

TAN Jun-xiao^{1,2}, ZHAO Yong-qiang¹, LI Lai-hao¹, YANG Xian-qing¹,
WU Yan-yan¹, WEI Ya¹, CEN Jian-wei¹

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science
/Key Laboratory of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture
/National R&D Center for Aquatic Product Processing, Guangzhou 510300, China;
2. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: China's Antarctic krill industry has been developed continuously in recent years, due to the problems of immature fishing and processing technology, the utilization rate of Antarctic krill in China is relatively low. Therefore, analyzing research progress on comprehensive utilization of Antarctic krill has important meaning to guide the development of China's Antarctic krill industry. On the basis of introduction of domestic and foreign resources of Antarctic krill and its current situation of exploitation and utilization, the nutritional components of Antarctic krill were reviewed respectively from proteins, lipids and mineral elements; and the active ingredients of Antarctic krill from enzymes, chitin and astaxanthin were introduced, then the primary forms of Antarctic krill processing products were listed. Finally, some problems encountered in the process of exploitation and utilization were analyzed, and suggestions and countermeasures were put forward, to offer beneficial reference for further improving of comprehensive utilization of Antarctic krill resources.

Key words: Antarctic krill; resource development; product forms; research progress

收稿日期: 2017-01-15

基金项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费专项 (2016HY-ZD0904)

作者简介: 谈俊晓 (1992-), 女, 在读硕士生, E-mail: tanjunxiao2014@163.com

通讯作者: 李来好 (1963-), 男, 博士, 研究员, E-mail: laihaoli@163.com

南极磷虾通常是指南极大磷虾 (*Euphausia superba* Dana), 它隶属于节肢动物门 (Arthropoda) 甲壳纲 (Crustacea) 磷虾目 (Euphausiacea) 磷虾科 (Euphausiidae) 磷虾属 (*Euphausia*), 形体较小, 体长一般在 4~6 cm, 生物储藏量巨大^[1]。南极磷虾本身还蕴含着丰富的蛋白质、矿质元素及多种不饱和脂肪酸如 EPA、DHA 等, 对人体有良好的医疗及保健功能。此外, 南极磷虾还含有多种活性成分, 如酶类、甲壳素和虾青素等, 这些物质有利于南极磷虾高附加值产品的开发, 极大地提高了对南极磷虾资源的综合利用率。目前, 南极磷虾的主要产品形式有南极磷虾粉和南极磷虾油, 此外还有虾干、虾酱和罐头等初级产品, 而具有高附加值的成熟产品较少, 可见加快对南极磷虾成熟产品的开发对南极磷虾产业发展具有重要意义。近年来有学者对南极磷虾复合纤维、南极磷虾凝胶制品、南极磷虾活性多肽等产品进行研究^[2-4], 以期开发出更多高值产品。南极磷虾在开发过程中会遇到去壳困难、氟含量高及新鲜度下降快等问题, 因此对快速有效的去壳技术、脱氟技术及保鲜与加工新技术的开发也十分重要。本文介绍了国内外南极磷虾资源与开发利用现状、南极磷虾的营养与活性成分及其主要产品形式, 并分析了在其开发与利用过程中遇到的问题和对策, 旨在为我国进一步提高南极磷虾资源的综合利用提供参考。

1 南极磷虾资源与开发捕捞技术现状

尽管各国对南极磷虾资源进行了许多研究, 但对它们的总生物量和繁殖生产量的估计仍然是不确定的。南极磷虾资源量巨大, 但在南极各区的分布密度却极度不同, 这主要是因为南极磷虾的生长繁殖易受南极水域环境的影响。Atkinson 等^[5]结合南极磷虾生长模型和声学方法, 对南极磷虾的最新生物储藏量估计在 3.79×10^8 t 左右。国际上对南极磷虾进行商业化试捕始于前苏联, 其后日本、韩国、挪威等国家也开始了对南极磷虾资源的研究与开发, 我国台湾省于 1977 年开始试捕南极磷虾^[6], 但我国正式进入南极磷虾渔业始于 2009 年末。赵宪勇

等^[7]对国际南极磷虾捕捞产量的变动情况进行了说明, 并将近几十年的南极磷虾捕捞产量变动情况分为发展期、滞长期和回升期 3 个阶段。出现滞长期的主要原因是苏联解体后俄罗斯停止了对南极磷虾的大规模捕捞活动, 日本是此阶段南极磷虾渔业产量最大的国家。由于南极中的企鹅、海豹等动物多以南极磷虾为食, 南极磷虾被视为南极圈食物网中不可缺少的一员, 因此南极海洋生物资源保护委员会对南极磷虾捕捞作业区进行了限额规定, 目前各渔业分区的联合捕捞触发限额为 6.2×10^5 t, 2015 年南极磷虾国际渔业捕捞总量为 2.26×10^5 t^[8], 与 2014 年相比略有下降。随着国际对南极资源开发的重视, 也有学者根据全球气候变化轨迹和南极磷虾生长模式进行了模拟研究, 并表明若气候持续变暖而导致海冰融化, 到本世纪末期南极磷虾栖息地可能会大幅度减少^[9], 这可能会对南极商业发展带来严重挑战。

早期南极磷虾作业区多集中在印度洋海域, 随着渔业发展及对南极磷虾资源调查显示, 南极磷虾主要分布于南大西洋海域, 其中南奥克兰群岛和南设得兰群岛水域是目前南极磷虾的主要渔业区^[8]。Fielding 等^[10]对南乔治亚岛西北地区水域的南极磷虾密度的年际变化和体长进行了调查, 结果表明南极磷虾密度每 4~5 年会有一个波动。根据南极磷虾栖息水层及游泳行为, 中层拖网捕捞方式是目前国际上对南极磷虾进行捕捞的主要方式。相比于其他网具, 南极磷虾中层拖网网具的网囊及囊头部分网衣网目尺寸更小, 可以防止磷虾从网目中逃逸。而我国目前对南极磷虾的捕捞仍以传统作业方式为主, 或依靠国外引进的南极磷虾捕捞加工船, 缺乏自主研发的专业化捕捞船队。

2 南极磷虾营养与活性成分

2.1 营养成分

2.1.1 蛋白质 南极磷虾的生长容易受时间和地域的影响, 不同季节南极磷虾体内脂肪和蛋白含量往往不同, 且两者呈显著负相关关系^[11]。孙雷等^[12]对南极磷虾的营养成分和品质进行分析表明, 与中国明对虾相比, 南极磷

虾肌肉鲜样中粗蛋白含量略低,但必需氨基酸含量高,占氨基酸总量的45%左右,符合FAO/WHO/UNU联合专家委员会的推荐氨基酸摄入量,与Chen等^[13]的研究结果一致。Kim等^[14]对3~8月份期间捕捞的南极磷虾的营养成分进行了分析,表明南极磷虾体内总氨基酸在3月份含量最高、6月份含量最低,其中牛磺酸和甘氨酸在8月份含量最高,而精氨酸、鸟氨酸和赖氨酸则在3月份最高,这为科学安排南极磷虾的捕捞季节提供了依据。

2.1.2 脂类 南极磷虾体内总不饱和脂肪酸占脂类总量的34%左右,且多为多不饱和脂肪酸,其中EPA和DHA含量分别为19%和10%,高于一般鱼虾类^[15]。EPA和DHA作为人体不能合成的必需不饱和脂肪酸,在预防心血管疾病上具有一定作用,南极磷虾丰富的理想脂肪酸特征和显著水平的EPA和DHA说明其可作为高营养价值的脂质,用于补充人类饮食中的必需脂肪酸。Maki等^[16]对肥胖人群的研究表明,富含多种不饱和脂肪酸的南极磷虾油能增加肥胖人群血液中EPA和DHA的浓度,且耐受性良好,没有显示对安全参数的不利影响。

2.1.3 矿质元素 南极磷虾肌肉中含有丰富的矿质元素,特别是Se、P、Mg、Zn等,每100g磷虾肌肉干样中Se含量可达340 μg,远高于中国明对虾和刀额新对虾^[12],而Se在预防与氧化应激和炎症相关的慢性疾病中具有一定功效,因此南极磷虾可作为Se的良好食物来源。

2.2 活性成分

2.2.1 酶类 南极磷虾体内具有高效的酶系统,目前已发现的蛋白酶有8种,包括3种丝氨酸类胰蛋白酶、1种丝氨酸类胰凝乳蛋白酶、2种羧肽酶A和2种羧肽酶B^[17]。Turkiewicz等^[18-19]、Cieśliński等^[20]还发现南极磷虾体内含有糖酶,如葡聚糖水解酶、木聚糖酶和酯酶等。研究表明,利用南极磷虾酶制剂可以清除坏死组织和加速伤口愈合等,且其效果也高于木瓜蛋白酶、纤溶素/核酸酶等其他常用的生物制品^[21]。

2.2.2 甲壳素 甲壳素具有多种医药功能,如强化免疫功能、抑制癌细胞、降低胆固醇、降血

压及降血糖等。南极磷虾壳中含有大量的甲壳素,且由于其个体小、虾壳薄,壳体内的甲壳素易获得。陈雪娇等^[22]以H₂O₂为脱色剂,对南极磷虾的甲壳素进行脱色工艺研究,并获得了高白度甲壳素,提高了南极磷虾的商业开发价值。

2.2.3 虾青素 虾青素是一种类胡萝卜素,具有超强的抗氧化活性,其自由基清除能力是维生素E的近百倍、β-胡萝卜素和玉米黄质等其他类胡萝卜素的10倍以上^[23-24]。此外,虾青素还具有抗癌、增强免疫、促进生长繁殖等作用以及显著的着色能力,在食品、医药、化妆品和饲料等行业具有重要作用。

南极磷虾作为虾青素的一种重要的天然来源,含有游离与酯化两种类型的虾青素。研究表明,虾青素在光照、高温、高浓度酸碱条件下极不稳定,Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Zn²⁺和Al³⁺对虾青素基本没有影响,而Cu²⁺、Fe²⁺和Fe³⁺有明显的破坏作用,其中Fe³⁺对虾青素的影响最大^[25]。用南极磷虾提取虾青素的常见方法是有机溶剂提取法,有研究发现使用酶解法也能得到较高的提取率^[26]。超临界萃取技术作为一种高新技术也被逐渐用于活性成分的提取中,目前多采用超临界流体萃取与有机溶剂提取相结合的方式提取虾壳中的总类胡萝卜素^[27-28]。

3 南极磷虾主要开发产品

在南极磷虾资源开发的不同阶段,其产品形式也不相同。在南极磷虾渔业发展初期,南极磷虾产品主要为冻虾,用于饲料及肥料;随后其产品主要为用于养殖的虾干以及可食用的虾仁、虾糕和虾酱等;随着生产加工技术的发展,在保留前期产品形式的基础上,又相继开发了南极磷虾粉和具有高附加值的南极磷虾油等产品。

3.1 南极磷虾粉

捕捞上来的南极磷虾由于自溶酶作用等原因会很快导致其品质下降,因此需要快速进行初级加工处理。南极磷虾粉一般是在船上直接经过蒸煮、压榨、烘干处理后得到的产品,也是目前南极磷虾船载加工主要的产品之一^[29],它具有营养价值高、氨基酸平衡性好等优点,做饲料可以促进水产动物的生长,Suontama等^[30]研

究发现用南极磷虾粉部分代替鱼粉可增加大西洋鲑鱼和大西洋比目鱼的生长率,并表明在促进生长方面没有对健康不利的影响,甚至可改善鱼肌肉中的脂肪酸组成。

不同加工方法会对磷虾粉的营养产生一定影响,黄艳青等^[31]通过营养品质分析对3种不同加工方式的南极磷虾粉进行了评价,并表明南极磷虾在捕捞后及时进行加工处理并添加抗氧化剂,能较好保证磷虾粉的营养价值。刘志东等^[29]通过探讨挤压加工对南极磷虾粉营养组分的影响发现,相对于传统船载加工南极磷虾粉的方法,双螺杆挤压技术能避免由于原料的过度加热而引起功能性物质的损失,为南极磷虾粉加工技术的改进和市场价值的提升探索了新的路径。

3.2 南极磷虾油

南极磷虾油中含有磷脂、 ω -3 脂肪酸、虾青素等多种活性成分,具有改善大脑健康、提高免疫、抗肿瘤等许多医疗保健功能。Stine 等^[32]通过临床实验表明,南极磷虾油受试者血液中 EPA 和 DHA 含量比鱼油高,且磷虾油具有安全与耐受性良好的优点。Zhou 等^[33]对长期摄取南极磷虾油对自发性高血压大鼠和健康 SD 大鼠动脉血压的影响进行了研究,经过 5 周喂养后,相比于大豆油组,服用磷虾油组的自发性高血压大鼠的动脉血压明显降低,而健康 SD 大鼠的动脉血压无明显变化,说明磷虾油在降低血压方面具有一定治疗效果。Wibrand 等^[34]通过厌恶光刺激回避试验和强迫游泳试验评价了磷虾油对大鼠认知和抑郁的影响,并使用丙咪嗪(IMIP)作为抗抑郁药作为参考,在为期 7 周的实验中,明显观察到磷虾油在改善大鼠认知和抗抑郁方面具有良好效果,并表明在抗抑郁调节上,丙咪嗪和磷虾油的作用机制可能不同。

南极磷虾油的提取原料为冷冻南极磷虾与南极磷虾干粉,目前南极磷虾油的常用的提取方法包括有机溶剂法、酶解法等。徐晓斌等^[35]以冷冻南极磷虾为原料,不需将原料进行干燥,应用复合蛋白酶酶解法,得到了磷脂含量为 28.7% 的南极磷虾油,且含有丰富的 EPA 和 DHA,与曹文静等^[36]用混合溶剂法获得的南

极磷虾油的磷脂含量(29.1%)相当。王玥玮等^[37]将冻干南极磷虾制成虾粉后,以无水乙醇为提取液,结合超声波提取技术得到磷虾油粗品得率为 16.3%,但未对虾油中的脂肪酸组成和含量进行进一步的测定,表明该方法提取出的磷虾油为粗虾油,因此对其精致方法还需进行进一步深入研究。

3.3 其他产品

南极磷虾复合纤维产品的研究主要始于近几年,通常是将南极磷虾蛋白与海藻进行复配,这种复合纤维具有绿色可降解的特点,因而具有广阔的市场发展空间。但相对于海藻纤维,这种复合纤维的热稳定性稍低,而阻燃性和耐霉变性较好^[38]。针对在后期染色过程中存在的溶胀问题,杨利军等^[2]采用湿法纺丝技术制备出海藻/磷虾蛋白复合纤维后,将复合阻溶胀剂与染色工艺相结合,改善了在染色时的过度溶胀现象,为复合纤维的开发提供了新的思路。

目前有关于南极磷虾凝胶制品的研究中,主要是以磷虾为辅料,研究其添加对鱼糜凝胶制品挥发性风味成分的影响。许刚等^[3]以南极磷虾为主料,经研究发现适当添加畜禽肉和鱼肉能不同程度提高南极磷虾凝胶制品挥发性风味品质,为南极磷虾凝胶制品的加工提供了风味学依据。该项研究是以冷冻南极磷虾仁为原料,而南极磷虾由于虾壳较软等特点使其脱壳得肉率较低,因此对快速有效的脱壳技术的研发将十分重要。

利用海洋生物制备活性多肽也是目前研究的热点,有研究表明虾肉及虾加工废弃物可作为天然抗氧化剂的潜在来源^[39-40]。王继宏^[4]对南极磷虾抗氧化活性肽的制备和分离纯化进行研究,并以体外模拟实验对其抗氧化活性进行考察,结果表明分子量在 5~10 ku 的活性多肽有较强的自由基清除能力,但在制备活性多肽的过程可能会存在有机溶剂残留的问题,还需要对分离效率高、无毒副作用的溶剂系统进行探讨。此外,以海洋生物为原料制得的产品会带有一定的苦味和腥味,因此有效脱苦去腥方法的研究也是十分必要的。

除了上述相关产品的研究外,南极磷虾

海鲜酱油、南极磷虾类奶酪食品的研究也有报道^[41-42]。从这些研究中可以看出,针对南极磷虾高氟的特点,在开发新型南极磷虾类食品时安全有效的脱氟技术是关键。这些新型南极磷虾产品的研究为磷虾资源的应用开辟了新的方向,并为南极磷虾新产品形式的开发提供了依据。

4 存在问题与对策

4.1 捕捞方面

南极磷虾渔业区距离我国较远,产品需要长距离运输与保藏,并且南极气候寒冷,对各种设备性能的要求较高,这些都增加了我国开发南极磷虾产业的成本。相对于挪威等国家,我国缺少自主研发设计的专业化南极磷虾捕捞船。目前我国对南极磷虾捕捞的作业方式仍以传统的拖网捕捞为主,相对于专业化的南极磷虾连续捕捞技术,这种作业方式涉及环节较多、捕捞效率低、生产过程复杂,在一定程度上限制了我国对南极磷虾资源的开发利用。

为解决这一问题,我国应加快推进南极磷虾捕捞加工专业船的设计与建造,借鉴国外连续捕捞技术。刘健等^[43]从作业船型、连续捕捞装备和作业过程等方面对南极磷虾捕捞技术进行了探讨,认为南极磷虾泵吸技术在其渔业捕捞生产中应用前景较好,为我国南极磷虾渔业引入连续捕捞装备技术提供了参考。徐鹏翔等^[44]采用田内准则对中国南极磷虾捕捞船队引进的日韩小网目南极磷虾拖网网具性能进行了对比分析,表明日式拖网在快速性方面略逊于韩式拖网,但从其经济性和水动力性能方面考虑,日式南极磷虾拖网的综合性能更优,这些研究为合理调配作业参数、提高作业性能、增加捕捞效率提供了技术支撑。

4.2 加工方面

南极磷虾壳对氟具有较强的富集能力,磷虾死后,虾壳中的氟会很快渗透到虾肉中,从而使虾肉因含氟量过高而失去食用价值。有研究发现,用磷虾粉做鱼饲料,以普通商品饲料作对照,饲养3个月后,经测试鱼骨骼中氟含量与饲养时间呈线性相关,而肌肉中氟含量无明显差异;而以冷冻干燥处理的磷虾肉喂养正在生长

的老鼠,用鱼粉和虾粉作对照时发现,尽管几种饲料的生长效应相同,但用磷虾肉饲喂的老鼠的器官重量和原生质酶都发生异常变化,牙齿、大骨骼都观察到典型的氟反应^[45]。这表明磷虾可以作为水产饲料,但作为人类食品时,应当注意高氟问题。

柳先娜^[46]以生物法和化学法对南极磷虾中氟的脱除方法进行对比研究表明,果皮吸附法对南极磷虾的营养损害较小,但是脱氟率较低,而化学脱氟法虽然脱氟率很高,但对南极磷虾的营养损害较大,因此后续研究可考虑将两者结合的方法进行脱氟。郭帆等^[47]以活性氧化铝吸附脱氟法和钙离子沉淀脱氟法相结合的方法对南极磷虾酶解液进行脱氟研究,在最佳条件下脱氟率可达到94%左右。目前认为最有效的处理方式是捕获南极磷虾后立即进行壳肉分离,从而避免甲壳中的氟向虾肉中迁移,因此需要研究出快速有效的剥壳技术。郑晓伟等^[48]对南极磷虾挤压剥壳工艺进行了研究,试验设备得肉率在30%左右,为南极磷虾剥壳装备的研制以及南极磷虾脱壳技术的应用和产业化提供了参考。

此外,由于内源酶作用,捕捞后的南极磷虾会因自溶而导致新鲜度下降,这就需要将内源酶从磷虾中提取分离出来,或利用内源酶作用使南极磷虾自溶后对自溶液进行深加工以获得高值化的产品。于海宁等^[49]利用木瓜蛋白酶结合自溶酶体系共同作用得到了EPA和DHA质量分数之和在76%左右的南极磷虾油。

针对以上问题,除了需要对南极磷虾脱壳技术的研发和加工方法的完善,还应注意产品市场分析,将南极磷虾产业和国内外消费市场实际相结合,形成立体化的技术研发结构,在不同层次形成关键技术,从而提高对南极磷虾资源的有效利用。

5 展望

南极磷虾资源储量巨大、营养丰富,其体内的多种活性成分可以开发成磷虾油、虾青素等高附加值产品,因此可以在养殖、食品、医药等多个领域得到广泛应用。目前,我国的南极磷虾

产品仍以虾干、虾粉等用于饲料的初级产品为主,对高附加值产品的开发虽有研究,但未形成产业化,国内外市场还未打开。这是由于相对于日本、韩国、挪威等国家,我国对南极磷虾资源的开发利用起步较晚,因此各项技术相对不够完善,但同时我们也可以借鉴国外南极磷虾产业发展的技术和成功经验,积极开发和引进新的加工技术和设备,同时注重南极磷虾加工副产物的利用,从而实现我国南极磷虾产业的快速增长。随着各国对南极磷虾相关研究的不断深入,对南极磷虾的研究已从低、中端技术水平逐渐过渡到对高附加值产品开发等高新技术水平,因此对南极磷虾资源的综合利用也将会逐渐优化起来,使其具有更大的经济效益与发展空间,从而使南极磷虾产业不断壮大。

参考文献

- [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.
- [2] 杨利军, 郭静, 刘孟竹, 等. 海藻/磷虾蛋白复合纤维结构与染色性能研究 [J]. 功能材料, 2016, 47 (2): 2084–2088.
- [3] 许刚, 丁浩宸, 张燕平, 等. 畜禽肉和鱼肉对南极磷虾凝胶制品挥发性风味成分的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2016, 42 (5): 132–139.
- [4] 王继宏. 南极磷虾抗氧化肽制备和纯化的研究 [D]. 上海海洋大学, 2015.
- [5] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, et al. A re-appraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill [J]. Deep Sea Research (Part I): Oceanographic Research Papers, 2009, 56 (5): 727–740.
- [6] 黄永祥. 南极磷虾的开发现状 [J]. 国外水产, 1979 (1): 1–13.
- [7] 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.
- [8] CCAMLR. Krill Fishery Report 2016 [R]. CCAMLR, 2017.
- [9] Piñones A, Fedorov A V. Projected changes of Antarctic krill habitat by the end of the 21st century [J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43 (16): 1–10.
- [10] Fielding S, Watkins J L, Trathan P N, et al. Interannual variability in Antarctic krill (*Euphausia superba*) density at South Georgia, Southern Ocean: 1997–2013 [J]. ICES Journal of Marine Science, 2014, 71 (9): 2578–2588.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Chen Y C, Tou J C, Jaczynski J. Amino acid and mineral composition of protein and other components and their recovery yields from whole Antarctic krill (*Euphausia superba*) using isoelectric solubilization/precipitation [J]. Journal of Food Science, 2009, 74 (2): 31–39.
- [14] Kim M A, Jung H R, Lee Y B, et al. Monthly variations in the nutritional composition of Antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. Fisheries & Aquatic Science, 2014, 17 (4): 409–419.
- [15] 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.
- [16] Maki K C, Reeves M S, Farmer M, et al. Krill oil supplementation increases plasma concentrations of eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids in overweight and obese men and women [J]. Nutrition Research, 2009, 29 (9): 609–615.
- [17] Osnes K K, Mohr V. On the purification and characterization of exopeptidases from Antarctic krill [J]. Comparative Biochemistry and Physiology (Part B): Comparative Biochemistry, 1986, 83 (2): 445–458.
- [18] Turkiewicz M, Kalinowska H, Zielińska M, et al. Purification and characterization of two endo-1, 4- β -xylanases from Antarctic krill, *Euphausia superba*, Dana [J]. Comparative Biochemistry &

- Physiology (Part B): Biochemistry & Molecular Biology, 2000, 127(3): 325–335.
- [19] Turkiewicz M G E Z M. Purification and partial characterization of an endo-(1→3)-β-D-glucanase from *Euphausia superba* Dana (Antarctic krill) [J]. Polar Biology, 1985, 4(4): 203–211.
- [20] Cieśliński H, Białkowska A M, Długolecka A, et al. A cold-adapted esterase from psychrotrophic *Pseudoalteromonas* sp. strain 643A [J]. Archives of Microbiology, 2007, 188(1): 27–36.
- [21] Mekkes J R L I C D. In vitro tissue-digesting properties of krill enzymes compared with Fibrinolysin/DNAse, papain and placebo [J]. Int J Biochem Cell Bio, 1997, 29(4): 703–706.
- [22] 陈雪姣, 姜启兴, 许艳顺, 等. 南极磷虾甲壳素的脱色工艺研究 [J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2014, 29(3): 21–24.
- [23] Miao F, Geng Y, Lu D, et al. Stability and changes in astaxanthin ester composition from *Haematococcus pluvialis* during storage [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(6): 1181–1189.
- [24] Miki W. Biological functions and activities of animal carotenoids [J]. Pure & Applied Chemistry, 1991, 63(1): 141–146.
- [25] 宋素梅, 刘富俊, 姜启兴, 等. 南极磷虾虾壳中虾青素稳定性的研究 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(18): 96–98.
- [26] 于晓, 尚宪明, 刘云, 等. 木瓜蛋白酶酶解南极磷虾壳提取虾青素的研究 [J]. 食品工业科技, 2013, 34(16): 212–217.
- [27] Corrêa N C F, Macedo C D S, Moraes J D F C, et al. Characteristics of the extract of *Litopenaeus vannamei*, shrimp obtained from the cephalothorax using pressurized CO₂ [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2012, 66(66): 176–180.
- [28] Sánchez-Camargo A P, Meireles M Â A, Ferreira A L K, et al. Extraction of ω-3 fatty acids and astaxanthin from Brazilian redspotted shrimp waste using supercritical CO₂+ethanol mixtures [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2012, 61(12): 71–77.
- [29] 刘志东, 陈勇, 曲映红, 等. 挤压加工对南极磷虾粉营养成分的影响 [J]. 海洋渔业, 2016, 38(3): 311–319.
- [30] 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(4): 241–255.
- [31] 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品质评价 [J]. 南方水产科学, 2013, 9(6): 58–65.
- [32] Ulven S M, Kirkhus B, Lamglait A, et al. Metabolic effects of krill oil are essentially similar to those of fish oil but at lower dose of EPA and DHA, in healthy volunteers [J]. Lipids, 2011, 46(1): 37–46.
- [33] Zhou D Y, Liu Y X, Xu Z L, et al. Effects of long-term intake of Antarctic krill oils on artery blood pressure in spontaneously hypertensive rats. [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 97(4): 1143–1148.
- [34] Wibrand K, Berge K, Messaoudi M, et al. Enhanced cognitive function and antidepressant-like effects after krill oil supplementation in rats [J]. Lipids in Health and Disease, 2013, 12(1): 1–13.
- [35] 徐晓斌, 李俊玲, 杨阳, 等. 南极磷虾油酶解法提取工艺研究 [J]. 中国油脂, 2015, 40(5): 5–8.
- [36] 曹文静, 惠欢庆, 沈俊涛, 等. 混合溶剂提取南极磷虾油的工艺研究 [J]. 中国油脂, 2013, 38(12): 6–9.
- [37] 王玥玮, 张斌, 温禄云, 等. 南极磷虾油提取工艺的优化 [J]. 食品研究与开发, 2016, 37(4): 105–107.
- [38] 杨利军, 郭静, 张森, 等. 海藻/磷虾蛋白复合材料的流变性及纤维的制备 [J]. 高分子材料科

- 学与工程, 2015, 31(10): 146-153.
- [39] 张风, 夏旭, 周爱梅, 等. 虾头虾壳蛋白质酶解制备抗氧化肽的研究[J]. 南方水产科学, 2015, 11(6): 79-87.
- [40] Faithong N, Benjakul S, Phatcharat S, et al. Chemical composition and antioxidative activity of Thai traditional fermented shrimp and krill products [J]. Food Chemistry, 2010, 119(1): 133-140.
- [41] 管哲, 董喆, 温敏, 等. 南极磷虾类奶酪食品的研制[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(23): 51-55.
- [42] 吕传萍, 李学英, 杨宪时, 等. 南极磷虾海鲜酱油的品质评价[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 161-164.
- [43] 刘健, 黄洪亮, 李灵智, 等. 南极磷虾连续捕捞技术发展状况[J]. 渔业现代化, 2013, 40(4): 51-54.
- [44] 徐鹏翔, 许柳雄, 孟涛, 等. 日韩小网目南极磷虾拖网性能对比分析[J]. 中国水产科学, 2015, 22(4): 837-846.
- [45] 相建海. 南极磷虾和氟[J]. 海洋科学, 1985, 9(3): 57-59.
- [46] 柳先娜. 南极磷虾脱氟方法研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [47] 郭帆, 施文正, 汪之和. 南极磷虾酶解液脱氟工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(9): 245-249.
- [48] 郑晓伟, 沈建. 南极磷虾捕捞初期适宜挤压脱壳工艺参数[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 252-257.
- [49] 于海宁, 陶艳红, 冯莹超, 等. 蛋白酶结合自溶酶提取南极磷虾油工艺研究[J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(2): 143-147.

(责任编辑 邹移光)