

酶解技术在南极磷虾油提取中的应用研究进展

谢丹¹, 李磊磊², 谢亮亮¹

(1. 安徽工程大学生物与食品工程学院, 安徽芜湖 241000; 2. 益海嘉里(安徽)粮油工业有限公司, 安徽芜湖 241000)

摘要: 南极磷虾油是提取自南极磷虾的重要产品, 其作为一种新兴功能性海洋脂质, 具有广阔的市场前景。首先概述了南极磷虾油的提取方法, 在此基础上针对南极磷虾油酶解法提取工艺中涉及的蛋白酶种类、原料和酶解液脱脂方法进行综述, 同时详述了酶解法处理过程中副产品的综合利用。酶解法提取南极磷虾油存在酶制剂价格较高、酶解后油相、水相存在乳化等问题, 但该方法不仅可以得到高品质的南极磷虾油, 而且脱脂后的酶解副产品可进一步利用, 最终实现南极磷虾的高值化利用。

关键词: 南极磷虾油; 酶解; 油脂提取

中图分类号: TS224; TS225.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2021)04-0133-06

Progress on application of enzymatic hydrolysis in the extraction of Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil

XIE Dan¹, LI Leilei², XIE Liangliang¹

(1. College of Biological and Food Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China;

2. Yihai Kerry (Anhui) Grain and Oil Industry Co., Ltd., Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: Antarctic krill oil is an important product extracted from Antarctic krill (*Euphausia superba*). As an emerging functional marine lipid, krill oil has a broad market prospect. The production methods of Antarctic krill oil were firstly summarized. Then the types of proteases, raw materials and oil extraction methods from enzymatic hydrolysis solution in the extraction of Antarctic krill oil by enzymatic hydrolysis process were reviewed. The comprehensive utilization of by-products in the enzymatic hydrolysis process was also described. The enzymatic extraction of Antarctic krill oil had disadvantages such as high price of enzyme and the existence of emulsification layer between the water phase and oil phase after enzymolysis. However, the enzymatic extraction method could not only obtain high-quality Antarctic krill oil, but also the enzymatic hydrolysis by-products after defatting could be further utilized, and the high-value utilization of Antarctic krill could be realized.

Key words: Antarctic krill oil; enzymatic hydrolysis; oil extraction

南极磷虾是南极生态系统的重要物种, 是须鲸、乌贼、食蟹海豹和刷尾企鹅等其他大型南极海洋动物的主要捕食对象。据最新估算, 南极磷虾生物量约为 3.79 亿 t^[1], 每年可捕量为 400 万~600 万 t, 相当于全球一年海洋鱼类和甲壳类捕捞的总产量^[2], 同时其富含优质脂质和蛋白质^[3], 是一种极

具开发价值的潜在渔业资源。然而, 南极海洋生物资源养护委员会 (CCAMLR) 的数据显示^[4], 目前全球对南极磷虾的年捕捞量远低于其限定的捕捞量, 表明南极磷虾尚有很大的开发空间。

南极磷虾油是提取自南极磷虾的重要产品, 近年来对其的研究及开发逐渐深入。南极磷虾油富含磷脂、*n*-3 多不饱和脂肪酸、虾青素、生育酚等活性物质, 且其 *n*-3 多不饱和脂肪酸多与磷脂结合, 增益了二者的功能性。众多研究表明, 南极磷虾油具有多种有益的生理功能, 如抗炎^[5]、抗氧化^[6]、调节免疫^[7]、预防脂肪肝、辅助治疗心脑血管疾病、降血

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2020-08-15

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(2008085QC142); 安徽工程大学引进人才科研启动基金(2019YQQ017)

作者简介: 谢丹(1987), 女, 讲师, 博士, 研究方向为油脂加工技术 (E-mail) xdwawj@163.com。

脂和降血糖^[8-10]等。随着世界各地相继将南极磷虾油纳入新食品原料,关于其提取工艺的研究也逐渐增多。本文首先概述了南极磷虾油的提取方法,在此基础上对近年来国内外南极磷虾油酶解法提取工艺进行综述,同时详述了酶解法处理过程中副产品的综合利用,旨在阐明酶解法在南极磷虾油提取中的应用现状及其优缺点,以期为拓宽改进酶解技术在磷虾油提取中的应用提供技术参考,最终实现南极磷虾的高值化利用。

1 南极磷虾油的提取方法

早期,南极磷虾油的提取方法主要借鉴于传统植物油提取,主要包括有机溶剂提取法及机械压榨法。机械压榨法是一种较简单的、利用机械压力将磷虾中的脂质从原料虾中挤压出来的方法,虽然不需要添加其他物质,避免了添加物质残留的问题,但是这种纯物理的提取方法得油率低、能量消耗大且容易造成资源浪费^[11-12]。有机溶剂提取法存在提取时间长、营养物质降解、溶剂残留难以控制等缺陷,同时由于磷虾脂质成分的复杂性,溶剂种类的不

同会对所提磷虾油组成造成显著影响^[12-13]。随着高新技术的发展,超/亚临界流体萃取法及酶解法也逐步应用于磷虾油提取领域。超/亚临界流体萃取技术具有低黏度、高扩散性、无污染及高选择性等良好特征,但是萃取设备昂贵、一次性投入大,产品成本高且制取条件苛刻^[12,14],难以形成规模化生产。酶解法是近年来新兴的油脂提取工艺,酶解技术的兴起弥补了许多传统加工技术的不足,尤其适用于鱼、虾等生物的脂质提取,因为这些生物的脂质大多储藏在内脏和结缔组织中,且与蛋白质结合在一起,运用酶的前处理可使蛋白质和脂质分离,从而使脂质得以释放,再结合离心、压榨或有机溶剂进一步提取脂质^[15]。酶解法提取磷虾油具有诸多优势:①提取条件温和,有利于保持油的品质;②原料适用性高,干燥的磷虾粉或含水量较高的鲜虾或冻虾均可,降低了原料处理成本;③酶解后的下脚料可进一步利用,提高产品附加值。基于以上优势,越来越多的学者针对南极磷虾油的酶解法提取工艺进行研究。表1为不同磷虾油提取方法比较。

表1 不同磷虾油提取方法比较^[11-16]

方法	溶剂	优点	缺点
有机溶剂提取法	乙醇、丙酮、己烷、石油醚等	操作简单,成本低,提取率高。	溶剂消耗量大,有溶剂残留风险。
超/亚临界流体萃取法	超临界 CO ₂ 、亚临界丁/丙烷等	提取质量高,速度快;安全性高,污染小。	仪器设备昂贵、前期投入大,难以规模化生产。
机械压榨法		简单易行,无需添加其他物质。	得油率低,效率低、能耗大。
酶解法	不使用有机溶剂或有机溶剂辅助萃取	适用性高,操作条件温和、有利于保持油品质,同时可获得高品质副产物。	酶制剂的投资成本大。

2 南极磷虾油酶解法提取工艺

2.1 以蛋白酶的来源分类

2.1.1 外源蛋白酶处理

食品工业中酶解动物组织常用的外源蛋白酶包括微生物酶(酸性蛋白酶、中性蛋白酶、碱性蛋白酶及复合蛋白酶)、植物蛋白酶(菠萝蛋白酶、无花果蛋白酶及木瓜蛋白酶)和动物蛋白酶(胃蛋白酶、胰蛋白酶、动物蛋白水解酶)^[17]。外源蛋白酶的应用给磷虾油的提取带来了诸多便利,酶解完成后,通过萃取或机械分离的方式可以分离出优质的磷虾油和蛋白质^[15,18],但蛋白酶种类会影响得油率以及磷虾油产品中脂肪酸组成、磷脂含量及微量成分等。Wang等^[18]考察了6种常用的蛋白酶,包括胰蛋白酶、酸性蛋白酶、碱性蛋白酶、中性蛋白酶、木瓜蛋白酶、复合蛋白酶,对酶解所得南极磷虾油得率及品质的影响,结果表明磷虾油得率随着蛋白酶的不同在

3.23%~5.29%之间浮动,但均比传统有机溶剂提取法要高,所得磷虾油中磷脂的含量在33.49%~50.19%之间,且磷虾油中微量成分的含量也存在显著差异。表2汇总了上述6种常用蛋白酶对酶解所得南极磷虾油得率及品质的影响,总体来说,碱性蛋白酶展示了较好的磷虾油得率以及品质。

选用外源蛋白酶处理时还可以选择两种或者两种以上酶的组合形式提取南极磷虾油。如采用碱性蛋白酶和中性蛋白酶分步进行酶解,可获得高达64.52%的南极磷虾油提取率^[15],显著高于单一蛋白酶的提取率。用中性蛋白酶、木瓜蛋白酶、风味蛋白酶的混合酶制剂可以获得3.89%的南极磷虾油得率^[19]。徐晓斌等^[20]采用复合蛋白酶处理,经石油醚结合乙醇提取后,南极磷虾油提取率为96.06%,磷脂含量可达28.7%。这表明多种酶复合使用提油效果优于使用单一蛋白酶。

表2 不同蛋白酶对酶解所得南极磷虾油得率及品质的影响^[18]

项目	胰蛋白酶	酸性蛋白酶	木瓜蛋白酶	中性蛋白酶	复合蛋白酶	碱性蛋白酶
得率/%	3.23	3.29	4.03	4.73	4.90	5.29
磷脂含量/%	33.49	36.69	43.53	49.45	40.93	50.19
脂肪酸组成/%						
EPA	18.70	20.05	18.75	20.78	19.80	21.22
DHA	8.55	5.27	8.05	8.65	6.20	10.69
饱和脂肪酸	10.23	10.99	13.73	12.60	10.42	14.65
单不饱和脂肪酸	28.12	40.51	47.39	37.56	41.90	51.62
多不饱和脂肪酸	28.70	25.03	28.33	30.82	27.51	34.49
n-3 多不饱和脂肪酸	26.75	24.38	26.09	26.78	25.33	31.42
微量成分						
虾青素/(mg/kg)	320.08	272.10	450.50	285.81	370.12	520.75
维生素 A/(μ g/100 g)	92.15	87.80	88.95	86.67	88.35	95.32
生育酚/(mg/100 g)	22.04	23.33	30.71	15.50	30.57	39.28

2.1.2 内源蛋白酶处理

南极磷虾体内分布着丰富的自溶酶,因此南极磷虾在捕捞上岸后极易发生自溶现象^[21]。磷虾内源自溶酶体系中主要是蛋白酶和脂溶酶^[22],酶系中含量丰富的蛋白酶可以高效降解与脂质结合的蛋白质,达到释放脂质的目的。外源蛋白酶处理时磷虾中脂质的释放程度与原料水解程度有很大关系^[23],因此理论上来说,科学合理地利用南极磷虾自溶酶体系进行酶解可以达到与添加外源蛋白酶同样的水解效果,大大节约商业化酶制剂的投入成本。

但是仅依靠自溶酶体系处理也存在缺陷。研究发现,外源蛋白酶处理提取得到的磷虾油中 EPA + DHA 含量明显高于自溶酶体系处理所得到的磷虾油^[24],这可能由于仅依靠自溶酶体系脂肪释放程度低,也可能是自溶影响原料新鲜程度所致。另外,由于影响磷虾自溶的因素不一,这会使得自溶酶处理时过程控制非常困难,甚至造成原料腐败,影响产品品质^[25]。因此,在利用自溶进行工艺设定时需要对自溶酶的相关特点进行深入研究,从而控制各种因素的影响来进行磷虾油的制备。

如此看来,单纯依靠南极磷虾体内的自溶酶进行酶解处理虽然可以减少酶的投入,节约成本,但是存在着反应过程控制困难、营养物质释放不充分、酶解产物不稳定等问题。

2.1.3 内源、外源蛋白酶结合处理

合理利用内源蛋白酶可以减少外源蛋白酶的使用量,有效节约成本,但过程难以控制。而通过内源、外源蛋白酶结合处理,即先使磷虾进行适度自溶之后,再添加外源蛋白酶作进一步的降解,可以在节约成本的基础上使反应过程变得易于控制。并且,

内源、外源蛋白酶结合处理对磷虾油的提取和油品质量有积极作用。于海宁等^[24]的研究表明,南极磷虾自溶酶体系结合木瓜蛋白酶共同作用可以使磷虾油中 EPA 和 DHA 质量分数之和在总脂肪酸中占比达 78% 以上,明显高于单一种类酶处理的结果。朱蓓薇等^[26]公布的一项专利技术也表明利用自溶酶和碱性蛋白酶分步处理,结合有机溶剂提取,可以得到品质较优的南极磷虾油,同时指出,自溶之前增加紫外线照射可以增进南极磷虾的自溶能力。

2.2 以原料性状分类

2.2.1 以冻虾为原料

冻虾是南极磷虾运输的主要形式,冻虾解冻后经过适当的粉碎或匀浆处理可以直接用作酶解法制取南极磷虾油的原料^[15],可以大大减少原料预处理成本,同时避免了预处理过程中脂质的损失。此外,由于冻虾一直在低温状态下保存,抑制了磷虾脂质理化性质的变化,减少了油脂受热氧化酸败及抗氧化物的流失,因此有助于保证磷虾油的质量。

周长平^[27]将解冻、粉碎后的南极磷虾采用中性蛋白酶及碱性蛋白酶两步酶解后获得了高达 73.42% 的磷虾油提取率,且磷虾油中极性脂质含量高于传统有机溶剂提取法,同时获得了高品质的磷虾蛋白水解液。徐晓斌^[28]以解冻、粉碎后的南极磷虾为原料进行酶解,结合溶剂提取,磷虾油提取率接近 100%,并且经进一步富集处理后磷脂含量可达 44.69%,虾青素含量为 153 mg/kg。谈俊晓等^[29]以冻虾为原料,采用碱性蛋白酶和木瓜蛋白酶双酶酶解法,可提取 90% 以上的虾青素。

值得注意的是,磷虾原料中氟含量较高,随着冷

冻贮藏时间的延长, 虾壳中的氟会向虾肉中转移^[30], 且随着冷冻贮藏时间的延长, 冻虾中游离态氟的含量会呈现增高趋势^[31]。因此, 以冻虾为原料进行南极磷虾酶解处理时需要格外关注酶解液以及磷虾油中氟的含量。

2.2.2 以虾粉为原料

为了贮藏及运输便利性, 南极磷虾捕捞后可在船上进行脱水、粉碎变为干燥虾粉, 相比冻虾更易于保存, 也大大节约了运输成本^[32]。但是磷虾油质量会受到虾粉脱水加工方式的影响, 高温脱水过程可能会导致磷虾脂质的劣变, 进一步会影响到所提取磷虾油的品质^[33-34]。传统提取方法中, 以虾粉为提油原料时, 由于脱除水分之后脂质得到了浓缩, 得油率比以冻虾为原料时的高^[35], 并且在工业生产中消耗的溶剂较少, 成本投入更低。然而, 以虾粉为原料进行酶解需要复添大量水分, 目前较少有酶解法制油研究采用虾粉为原料, 以虾粉为原料进行酶解的工艺大多关注水解后所形成的磷虾蛋白肽^[36-38], 而忽视了磷虾油的得率与品质。

2.3 按酶解液脱脂工艺分类

2.3.1 机械分离法

磷虾酶解反应完成后, 利用油水密度的不同, 采用机械方法, 如离心、静置分层等方法可以从酶解液中回收释放的磷虾脂质, 但由于磷虾脂质中富含具有双亲乳化特性的磷脂, 因此油水无法完全分离, 导致得油率低。如周大勇等^[39]公布的专利中, 南极磷虾经加热处理、匀浆后酶解, 酶解液离心后存在两层乳化层, 磷虾脂质提取率低, 需要对乳化层进行破乳才能获得 60% 左右的脂质回收率。酶解液经过冷冻、解冻处理之后可以起到破乳作用, 离心之后可以获得部分游离油相^[27]。综上所述, 尽管机械分离法不需要溶剂, 安全、环保, 但仍无法完全分离磷虾油, 需要借助其他手段进行酶解液中脂质的回收。

2.3.2 有机溶剂提取法

目前, 利用有机溶剂从酶解液中提取脂质仍是回收南极磷虾油的主要方法。石油醚、乙醇具有良好的溶油能力以及破乳特性, 是最常用的辅助提油溶剂^[19, 27-28]。徐晓斌^[28]采用体积比 1:2 的乙醇-石油醚混合溶剂萃取南极磷虾酶解液, 磷虾油提取率高达 96.02%。周长平^[27]使用蛋白酶处理南极磷虾, 酶解液进行冷冻、解冻破乳处理后, 采用己烷-乙醇混合溶剂萃取, 磷虾油提取率达到 73.42%。董寰^[40]将捕捞的南极磷虾粉碎后加入蛋白酶进行酶解, 将酶解液加热至 70~90℃ 分层, 沉淀物经离心得到富含磷脂的上层, 冷冻干燥或低温干燥处理

(水分小于 10%) 后用乙醇提取, 得到磷脂含量大于 40% 的南极磷虾油。可以看出, 酶解法与有机溶剂结合提取南极磷虾油的得率较高, 但是不同极性的溶剂对磷虾油中成分的提取程度是不同的, 还可能存在溶剂残留的问题。

3 酶解法提取南极磷虾油副产品综合利用

在酶解过程中, 蛋白酶作用于磷虾组织, 在释放脂质的同时, 也将蛋白质水解为不同肽链长度的多肽^[41]和游离氨基酸^[42]。除了游离氨基酸, 寡肽在人体中转运及消化、吸收更容易。因此, 分离脂质后的酶解液如若进行合理利用, 可大大提高磷虾产品附加值。张华丹等^[43]研究发现, 经过碱性蛋白酶酶解后的南极磷虾蛋白粉水解度可达到 15.27%。郑景如等^[37]对脱脂后的南极磷虾进一步酶解后, 通过超滤、凝胶层析等技术优选出了具有抗氧化能力的南极磷虾蛋白肽, 与合成的抗氧化活性肽相比, 动物性天然肽安全性更高, 对人体的副作用小。另外, 酶解后的磷虾水解蛋白经过脱除苦味肽后, 可以用来制备风味调味品、调味料、呈味基料等, 其鲜味突出、口感饱满、风味浓郁、营养丰富、生物效价高^[42, 44-45]。

酶解液中除了富含蛋白肽外, 还残余有未提取完全的脂质及其伴随物。虾青素使得磷虾油具有很强的抗氧化性, 是一种重要的生理活性成分。但是磷虾中的虾青素大多集中于虾壳中, 采用酶解法很难将虾青素提取完全^[27]。在 Lee^[46]申请的一种酶辅助提取工艺的专利中, 使用超高压 (10~300 MPa) 反应器, 使磷虾易于液化, 并确保原料与蛋白酶充分接触, 反应完成后, 对液化磷虾进行过滤分离滤液和滤渣, 再使用乙醇从滤渣中提取虾青素, 避免了脂质活性成分的浪费。

由此可见, 相对于传统方法, 使用酶解法提取磷虾油因为酶的催化作用要求条件温和, 所以脱脂后的蛋白质不易变性, 这样可以使油脂和蛋白质同时得到利用。表 3 汇总了通过酶解工艺可获取的除了南极磷虾油外的高附加值产品。酶解法副产品综合利用的空间和价值很大, 在未来进行工艺优化提高副产品的利用率就显得尤为重要。

表 3 酶解法副产品综合利用

来源	产品	参考文献
酶解液	磷虾蛋白肽	[37, 43, 47-49]
	磷虾酱油	[50-51]
	磷虾膏	[52]
	磷虾酱	[53-54]
滤渣	虾青素	[46]

4 结论

南极磷虾生物资源丰富,磷虾中含有丰富的营养成分,开发利用价值高。南极磷虾油作为一种重要的磷虾产品,市场价值高,开发前景广阔。早期,南极磷虾油的提取方法主要借鉴于传统植物油提取,主要包括有机溶剂提取法及机械压榨法,但分别存在溶剂使用量大及得油率低的问题。酶解法作为一种新兴的提油技术,弥补了二者的不足,合理的酶解工艺不仅可以提取出高品质的南极磷虾油,而且脱脂后的酶解副产品可进一步利用,为南极磷虾的高值化利用提供了新的思路。当然,目前南极磷虾油的酶解法制取工艺仍存在酶制剂价格相对较高、酶解后的油相、水相存在乳化、酶解工艺过程欠佳等问题。但是随着对南极磷虾开发的不断深入以及酶工业的飞速发展,相信未来这种方法会有更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 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 Res Pt I*, 2009, 56(5): 727-740.
- [2] 冯迪娜. 南极磷虾资源综合利用研究现状[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(9): 120-122.
- [3] TOU J C, JACZYNSKI J, CHEN Y C. Krill for human consumption: nutritional value and potential health benefits[J]. *Nutr Rev*, 2007, 65(2): 63-77.
- [4] Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR). Krill fisheries and sustainability [EB/OL]. (2018-11-03) [2020-08-05]. <https://www.ccamlr.org/en/fisheries/krill-fisheries>.
- [5] BONATERRA A 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 [2020-08-05]. <http://doi.org/10.3390/md15030074>.
- [6] 王亚恩, 姜国良, 徐恺, 等. 南极磷虾油对高脂血症大鼠血脂和抗氧化力的影响[J]. *中国海洋药物*, 2011, 30(3): 56-59.
- [7] 周大勇, 王君妍, 刘潇阳, 等. 南极磷虾油对小鼠免疫功能的调节作用[J]. *大连工业大学学报*, 2015, 34(2): 97-100.
- [8] ZHU J J, SHI J H, QIAN W B, et al. Effects of krill oil on serum lipids of hyperlipidemic rats and human SW480 cells[J]. *Lipids Health Dis*, 2008, 7(1): 30-36.
- [9] TANDY S, CHUNG R W S, WAT E, et al. Dietary krill oil supplementation reduces hepatic steatosis, glycemia, and hypercholesterolemia in high - fat - fed mice[J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(19): 9339-9345.
- [10] FERRAMOSCA A, CONTE A, BURRI L, et al. A krill oil supplemented diet suppresses hepatic steatosis in high - fat fed rats[J]. *Plos One*, 2012, 7(6): 1-14.
- [11] DIMITRI S K, TORO G R R, CHIONG L M M. Solvent - free process for obtaining phospholipids and neutral enriched krill oils: US 8865236 B2[P]. 2014-07-08.
- [12] 刘志东, 陈雪忠, 李斌, 等. 制备方法对南极磷虾油品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(1): 191-196.
- [13] 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.
- [14] SUN D, CAO C, LI B, et al. Antarctic krill lipid extracted by subcritical *n* - butane and comparison with supercritical CO₂ and conventional solvent extraction[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2018, 94: 1-7.
- [15] 周长平, 孙军涛, 王洪新, 等. 酶解法提取南极磷虾油的研究[J]. *中国油脂*, 2013, 38(3): 1-5.
- [16] 孙甜甜, 薛长湖, 薛勇, 等. 南极磷虾脂质提取方法的比较[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(16): 115-121.
- [17] 周婷, 杨恒, 王鑫, 等. 酶解技术提取动物组织中的胶原蛋白及其肽的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(15): 332-338.
- [18] WANG L, YANG F, RONG Y, et al. Effects of different proteases enzymatic extraction on the lipid yield and quality of Antarctic krill oil[J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(7): 2224-2230.
- [19] 徐海军. 水酶法提取南极磷虾油工艺研究[J]. *食品工业*, 2016, 37(6): 125-128.
- [20] 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.
- [21] 杭虞杰, 李学英, 杨宪时, 等. 南极磷虾自溶酶性质的初步研究[J]. *食品科学*, 2011, 32(13): 198-200.
- [22] 史博文, 孙维维, 薛长湖, 等. 酶在南极磷虾高值化利用中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(13): 320-324.
- [23] 吕传萍, 李学英, 杨宪时, 等. 南极磷虾酶解工艺的研究[J]. *湖南农业科学*, 2011(17): 130-133.
- [24] 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.
- [25] 胡玲萍, 张晓梅, 张鸿伟, 等. 南极磷虾自溶前后氨基酸和胰蛋白酶降解产物的变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(11): 1-6.
- [26] 朱蓓薇, 周大勇, 秦磊, 等. 一种南极磷虾油的制备方法: CN 201010587615[P]. 2010-12-14.

- [27] 周长平. 南极磷虾油脂提取、精炼及多不饱和脂肪酸的富集研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2013.
- [28] 徐晓斌. 南极磷虾油制备工艺的建立及优化[D]. 济南: 济南大学, 2015.
- [29] 谈俊晓, 赵永强, 李来好, 等. 响应面优化南极磷虾虾青素的复合酶法提取工艺研究[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(4): 514-521.
- [30] 朱兰兰, 赵彦玲, 周德庆, 等. 南极磷虾冻藏过程中氟的迁移变化规律[J]. 中国食品学报, 2015, 15(4): 81-86.
- [31] 曹明秀. 南极磷虾中氟在贮藏过程中的迁移、转化规律及其生物学毒性评价[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [32] 赵伟, 刘建君, 苏学锋, 等. 南极磷虾粉制备新工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(13): 65-68.
- [33] 刘建君, 赵伟, 苏学锋, 等. 虾粉生产方式对南极磷虾油品质的影响[J]. 渔业现代化, 2014, 41(6): 43-46.
- [34] 刘志东, 陈雪忠, 黄洪亮, 等. 南极磷虾粉加工与贮藏技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(16): 357-361.
- [35] 孙维维, 姜晓明, 徐杰, 等. 太平洋磷虾油提取工艺优化及与南极磷虾油品质的比较[J]. 中国油脂, 2018, 43(1): 8-12.
- [36] 朱兰兰, 侯钟令, 崔亚菲, 等. 应用BP神经网络优化南极磷虾酶解工艺[J]. 食品与发酵工业, 2020(21): 125-130.
- [37] 郑景如, 孙馨娉, 蔡紫仪, 等. 优选南极磷虾蛋白肽抗氧化活性组分[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(1): 189-195.
- [38] WANG Y, CHANG Y, YIN L, et al. A novel technological process of extracting l-tyrosine with low fluorine content from defatted Antarctic krill (*Euphausia superba*) by-product by enzymatic hydrolysis[J]. Food Bioprocess Tech, 2016, 9(4): 621-627.
- [39] 周大勇, 徐文思, 宋泽宇, 等. 水酶法制备南极磷虾油及其微胶囊和低氟南极磷虾肽的方法: CN 201410629513[P]. 2014-11-10.
- [40] 董寰. 一种水酶法制备富含磷脂的南极磷虾油的方法: CN 201410659093[P]. 2014-11-18.
- [41] 李明杰, 姜国良, 赫佳明. 南极磷虾肽制备工艺优化及抗氧化测定[J]. 食品工业科技, 2012, 33(3): 279-282, 301.
- [42] 黄艳青, 陆建学, 龚洋洋, 等. 南极磷虾酶解液特性分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 23-30.
- [43] 张华丹, 张玲云, 张国玉, 等. 响应面法优化南极磷虾蛋白酶解工艺条件[J]. 食品工业, 2019, 40(7): 94-98.
- [44] 付光中. 虾呈味基料的制备工艺及其风味研究[D]. 广东 湛江: 广东海洋大学, 2010.
- [45] 杨昭, 姚玉静, 黄佳佳, 等. 异丁醇萃取三种酶解产物苦味肽的研究[J]. 中国调味品, 2018, 43(12): 36-43.
- [46] LEE S. Krill oil and method for manufacturing the same: US 8624046[P]. 2014-01-07.
- [47] 于建伟, 魏星, 邹鹏飞, 等. 一种低致敏性脱腥南极磷虾肽的制备方法: CN 201911155273.2[P]. 2019-11-22.
- [48] 王炎冰, 龙秀红, 刘扬, 等. 一种具有抗氧化活性南极磷虾肽的制备方法: CN 201911354876.5[P]. 2019-12-25.
- [49] 白义化, 王欣, 邢晓明, 等. 一种以南极磷虾粉为原料提取小分子肽的方法: CN 201910313049.5[P]. 2019-04-18.
- [50] 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.
- [51] 姜维, 刘宇, 胡世伟, 等. 一种南极磷虾酱油的快速制备方法: CN 201711287956.4[P]. 2018-04-20.
- [52] 肖金星, 杨志坚, 郑刚, 等. 一种酶解制备南极磷虾膏的方法: CN 201910385162.4[P]. 2019-08-20.
- [53] 徐军. 响应面优化复合酶酶解制备南极磷虾酱工艺研究[J]. 中国调味品, 2015, 40(4): 24-28.
- [54] 孙娜, 陆雪琪, 沈佳颖, 等. 铁强化南极磷虾酱及其制备方法: CN 201910275267.4[P]. 2019-07-23.