

南美白对虾加工副产物高值化加工利用研究进展

魏 捷¹ 林海生^{1,2,3,4,5} 黄 和^{1,2,3,4,5}

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东 湛江 524088; 2. 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东 湛江 524088;
3. 广东普通高等学校水产品深加工重点实验室, 广东 湛江 524088; 4. 国家贝类加工技术研发分中心(湛江),
广东 湛江 524088; 5. 南海生物资源开发与利用协同创新中心, 广东 湛江 524088)

摘要:南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*)是中国主要的虾类养殖品种之一,随着养殖技术的快速发展,其产量逐年增加,成为沿海地区出口创汇和乡村振兴的重要经济支柱。南美白对虾的主要加工产品集中在虾仁、虾球、冷冻全虾以及冷冻预制虾等,加工过程中产生了大量的虾头和虾壳等副产物,利用程度低,资源浪费、环境污染以及副产物再利用问题日益受到关注。文章综述了南美白对虾加工副产物的营养及功能成分,并探讨了其提取与回收技术,如超临界CO₂萃取、酶解法和微生物发酵法,还分析了这些成分在食品和医药等领域的高值化利用现状,明确了当前研究的技术瓶颈,展望了未来创新方向。

关键词:南美白对虾;加工副产物;高值化利用;提取技术

Research progress on the high-value processing and utilization of processing by-products of *Litopenaeus vannamei*

WEI Jie¹ LIN Haisheng^{1,2,3,4,5} HUANG He^{1,2,3,4,5}

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;
2. Guangdong Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;
3. Key Laboratory of Aquatic Products Deep Processing of Guangdong Universities, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;
4. National Research and Development Branch Center for Shellfish Processing Technology (Zhanjiang), Zhanjiang,
Guangdong 524088, China; 5. South China Sea Biological Resources Development and Utilization Collaborative
Innovation Center, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

Abstract: *Litopenaeus vannamei* is one of the major cultivated species of shrimp products in China. With the rapid development of aquaculture technology, the production of *L. vannamei* has continued to rise in recent years, which has become an important economic pillar for export earnings and rural revitalization in coastal regions. The primary commercial processing products of *L. vannamei* include shrimp meat, shrimp surimi products, frozen whole shrimp, and preprocessed frozen shrimp. Substantial quantities of by-products (heads and shells) are generated during processing, yet current utilization strategies remain underdeveloped. As a result, issues such as resource waste, environmental pollution, and the reuse of by-products are receiving increasing attention. This review systematically examines the nutrition and bioactive compounds in processing by-products of *L. vannamei* and discusses techniques for their extraction and recovery, including supercritical CO₂ extraction, enzymatic hydrolysis, and microbial fermentation. Furthermore, this study analyzes the high-value utilization status of these bioactive components in food and pharmaceutical applications, identifies key technical bottlenecks, and proposes directions for future innovation.

Keywords: *Litopenaeus vannamei*; processing by-products; high-value utilization; extraction technology

基金项目:海南省重点研发计划项目子课题(编号:ZDYF2024GXJS316);“十三五”国家重点研发计划重点专项(编号:2019YFD0901605)

通信作者:林海生(1985—),男,广东海洋大学副教授,博士。E-mail:haishenglin@163.com

收稿日期:2025-03-27 改回日期:2025-08-19

引用格式:魏捷,林海生,黄和.南美白对虾加工副产物高值化加工利用研究进展[J].食品与机械,2026,42(1):194-201.

Citation:WEI Jie, LIN Haisheng, HUANG He. Research progress on the high-value processing and utilization of processing by-products of *Litopenaeus vannamei*[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 194-201.

南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*),又被称为凡纳滨对虾、太平洋白虾,属于节肢动物门甲壳纲十足目游泳亚目对虾科滨对虾属,为广温、广盐性的热带虾类^[1]。该物种原产于南美洲太平洋沿岸海域,具有生长速度快、适应性强等特性,目前已是全球产量最高的对虾养殖品种,2024年养殖产量达223.84万t^[2],其规模化养殖已成为全球海洋经济的重要组成部分,在促进沿海地区出口创汇、稳定渔业就业及驱动水产加工技术创新等方面发挥关键作用。

南美白对虾出肉率高、味道鲜美。在营养特性上,其具有高蛋白、低脂肪的特点且富含人体8种必需氨基酸,是优质蛋白的主要来源之一^[3]。此外,还含有虾青素、甲壳素和壳聚糖等多种生物功能成分,具有较高的经济价值和药用价值^[4],被广泛应用于食品、药品等领域。目前,南美白对虾的工业化加工体系呈现初级产品规模化与精深加工多元化并行的特征,核心加工产品主要有单体速冻虾仁、冻熟整虾及预制调理制品以及深加工重组制品(如虾滑、虾饼)等。然而,南美白对虾在加工过程中会产生大量废弃物,主要包括虾头、虾壳和虾尾,占其体重的40%~60%^[5]。这些废弃物通常被丢弃,不仅造成了资源浪费,还对环境造成了污染。事实上,废弃的虾头、虾壳和虾尾中含有丰富的虾青素、甲壳素、油脂和蛋白质等成分。这些成分经提取回收后,可被制成食品调味酱、添加剂和生物活性肽等高附加值产品,在食品与医药等领域得以应用,从而使副产物实现高值化利用。

文章拟综述南美白对虾加工副产物的成分(虾青素、甲壳素、壳聚糖、油脂和蛋白质)的成分特性及其提取和回收技术,探讨这些成分在食品和医药领域的高值化利用现状。同时,分析当前研究中存在的不足,并对其未来发展方向进行展望,旨在为南美白对虾产业的可持续发展提供理论依据。

1 副产物的功能性成分特性

1.1 虾青素

虾青素(astaxanthin),又称虾黄素,是一种天然脂溶性酮式类胡萝卜素,为红色固体粉末,在酵母、磷虾及其他海产品中普遍存在。超强的抗氧化能力^[6],使虾青素在增强细胞活力、预防炎症侵扰和延缓肌肤衰老进程等方面具有重要功效^[7]。南美白对虾加工过程产生的废弃物含有丰富的虾青素。研究表明,虾青素含量及其存在形式对虾壳色泽有显著影响,而色泽变化是衡量虾品质的重要指标之一。虾头、虾壳中的虾青素含量分别为62.62,55.85 μg/g^[8],且虾青素的主要存在形式是与血蓝蛋白相结合,并参与虾壳颜色的变化^[9]。因此,从南美白对虾加工副产物中提取虾青素,不仅能实现副产物的回收再利用,还能为相关产业提供更丰富的原料来源,具有重要的经济和环保价值。

1.2 多糖物质

南美白对虾加工副产物中富含多种多糖物质,且主要存在于虾壳中^[5]。主要包括甲壳素、壳聚糖和糖胺聚糖。甲壳素约占干基虾壳的20.49%,其化学式为(C₈H₁₃O₅N)_n,是由N-乙酰-D-氨基葡萄糖通过β-1,4-糖苷键连接而成的多糖^[10]。甲壳素的外观呈现淡米黄色至白色,特性为易溶于酸性物质,而不溶于水、有机溶剂和碱性物质。甲壳素具备降低血脂和胆固醇、抗菌、增强机体免疫力等多种生理活性。壳聚糖是甲壳素的脱乙酰基衍生物,属于天然的碱性多糖,其性质为易溶于稀酸,但不溶于水,且具有补充氨基酸、促进矿物质吸收、抗菌消炎等功能。糖胺聚糖,又称黏多糖,属于杂多糖的一种,具有保持水分,参与免疫调节和细胞活动等重要生理功能。每千克南美白对虾副产物可回收79 mg(湿基)糖胺聚糖^[11]。糖胺聚糖提取物主要包含硫酸乙酰肝素(HS)、硫酸软骨素(CS)和硫酸皮肤素(DS)^[12]。

1.3 油脂

油脂作为人体每日不可缺少的营养成分,在供给能量、促进营养物质吸收以及维持生理机能等方面具有重要作用。南美白对虾加工副产物中的油脂主要由甘油三酯和磷脂构成。虾头、虾壳中脂肪含量分别为0.66 g/100 g^[13]。这些脂肪由不同的脂肪酸组成,且脂肪酸主要集中于虾头中。在每100 g虾头所含的脂肪酸中,饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸含量分别为61.54~73.16,6.05~15.83,16.26~30.33 g,其中,棕榈酸(C_{16:0})、硬脂酸(C_{18:0})、油酸(C_{18:1})以及二十碳五烯酸(EPA, C_{20:5}, n-3)等脂肪酸含量较为丰富^[13]。适量摄入虾类脂肪酸,尤其是不饱和脂肪酸,有助于降低心血管疾病风险、促进大脑和视力发育^[13]。此外,磷脂作为一类两亲性物质,具有乳化、增稠、抗衰老以及降血脂等多种功能,在医药领域具有一定的应用价值。南美白对虾副产物中的磷脂主要存在于虾头中,含量约为虾头总脂的45.7%,主要含有磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰乙醇胺(PE)、磷脂酰肌醇(PI)、磷脂酰丝氨酸(PS)和鞘磷脂(SM)5种成分^[14]。

1.4 蛋白质

蛋白质是人体每日必需摄入的营养物质,是生命活动的物质基础,也是细胞的关键组成部分。在生物体中,蛋白质参与各种生理过程,起着至关重要的作用。南美白对虾的虾头和虾壳中含有丰富的蛋白质,每100 g虾头、虾壳中蛋白质含量分别为6.56,7.98 g^[13]。氨基酸作为蛋白质的基本组成单元,虾头、虾壳中含有8种人体必需氨基酸,其含量分别为4.49,4.73 g/100 g^[13]。同时,虾头和虾壳中还含有谷氨酸、天冬氨酸、丙氨酸、甘氨酸等7种鲜甜味氨基酸。此外,虾头中包含消化道和消化腺等消化器官,其中含有蛋白酶、脂肪酶、转氨酶等大量内源酶,这些内源酶在虾类自身消化过程中发挥着重要作用,同时也为后续的加工利用提供了潜在价值。

2 功能性成分的提取与制备技术

2.1 虾青素的提取与制备

从南美白对虾副产物中提取虾青素的常见方法有水浴振荡法^[15]、超声提取法^[15]、有机溶剂浸提法^[16]和油溶法^[17]。然而,这些传统提取方法均存在一定弊端:水浴振荡法存在提取时间长、效率低等问题,其提取率仅有179.10 μg/g 虾壳^[15];超声提取法的效率虽有所提升,但设备投入成本较高,且长时间超声操作易降低虾青素纯度^[15,17];有机溶剂浸提法常使用乙醇、二氯甲烷和正己烷等有机溶剂,不仅存在毒性,易造成环境污染,而且溶剂回收成本高^[17];油溶法提取虾青素虽具有操作简便、成本较低的优势,但其提取率低于有机溶剂萃取法,且提取后残留油脂的去除较为困难^[17]。有机溶剂浸提结合超声波辅助法能有效减少环境污染和资源浪费。韩青佑^[16]运用无水乙醇浸提结合超声波辅助法提取虾壳中的虾青素,提取量达到280.3 μg/g 虾壳,而单独使用有机溶剂浸提法的提取量仅为172.21 μg/g 虾壳,该方法能显著提高副产物中的虾青素提取量^[18~19]。韩露等^[17,20]采用深共晶溶剂法从虾头和虾壳中提取虾青素。在 $m_{\text{氯化胆碱}}/1,2\text{-丁二醇} : m_{\text{水}} = 90:10$, 超声功率 70 W, 液固比 15:1 (mL/g), 提取时间 30 min 下, 虾头、虾壳中的虾青素提取率分别为 146, 218 μg/g(干重)。该方法具有提取率高、毒性低、环境污染小且成本相对较低等优势,但存在黏度大影响传质、生物活性化合物回收困难等问题。通过工艺优化(如添加辅助溶剂降低黏度)或联合技术(如与膜分离技术耦合)有望克服上述挑战,未来有较大的工业化应用前景。

2.2 多糖物质的提取与制备

2.2.1 糖胺聚糖 酶解法是从南美白对虾加工副产物中提取糖胺聚糖的主要方法,其中蛋白酶是常用的酶制剂^[11~12,21]。Cahú 等^[11]将虾头自溶,并向提取类胡萝卜素和脂质后的干燥沉淀物中加入蛋白酶,在 50 mmol/L 三羟甲基氨基甲烷盐酸盐(Tris-HCl)溶液中,60 °C 酶解 24 h, 经后续沉淀、透析、冻干等可获得 79 mg/kg 虾头(湿基)糖胺聚糖提取物。该方法通过生物酶催化实现目标成分的高效释放,具有条件温和、选择性高、对环境友好等优势。然而,目前研究存在酶解时间较长、酶制剂成本较高等局限性^[11],且针对南美白对虾副产物中糖胺聚糖的提取方法研究较少,现有酶解法的普适性工艺参数仍需进一步优化。未来可通过酶种类筛选、酶解条件优化及多技术协同,进一步提升提取效率与产物品质。

2.2.2 甲壳素与壳聚糖 在甲壳素提取过程中,脱盐、脱蛋白和脱色是关键步骤,酸碱法、酶解法和微生物发酵法是常用的提取方法^[5]。传统酸碱法在脱盐、脱蛋白过程中分别采用 HCl 和 NaOH^[22],但强酸强碱的使用会导致提取速度慢、溶剂残留以及环境污染等问题。随着对绿色、高效提取技术的探索,酶解法作为一种温和且精准的手段,

成为提取甲壳素的重要方法。邓俊劲^[23]通过毕赤酵母和枯草芽孢杆菌表达系统获得了酶活较高的 5 种酸性蛋白酶和 1 种几丁质酶,最终从中选用水解效果最佳的酸性蛋白酶 P6281(来源于哈茨木霉)及 Saccharopepsin(来源于热带假丝酵母)水解虾壳蛋白,再用几丁质酶 Chit46(来源于哈茨木霉)水解脱蛋白虾壳,制备出的甲壳素回收率达 88.9%。然而,酶解法仍存在酶制剂筛选成本较高、多酶协同工艺复杂等局限性。微生物发酵法的原理是利用特定细菌或真菌在发酵过程中生成的生物酶和酸碱性代谢产物来实现脱盐与脱蛋白。Quiñones-Cerna 等^[24]分别利用铜绿假单胞菌 QF50 和沙雷氏菌属 QCS23 进行发酵,从凡纳滨对虾壳废弃物中提取甲壳素,所得甲壳素产量分别为 76.81%, 71.30%。微生物发酵法因绿色、环保且提取率高,也已成为提取甲壳素的主要方法之一,但该方法目前仍存在发酵周期较长、微生物代谢产物调控难度大等问题亟待改进。上述提取出的甲壳素经进一步脱乙酰化反应即可得到壳聚糖,是目前制备壳聚糖最普遍的方法^[25]。

2.3 油脂的提取与制备

溶剂萃取法是常用的油脂提取技术。解冬晓等^[26]采用 95% 乙醇溶液、正己烷与丙酮作为有机溶剂,从南美白对虾虾头中提取磷脂,得率为 0.43%。然而,采用该方法提取出的虾油和磷脂往往会含有有机溶剂且具有一定毒性^[27]。超临界 CO₂萃取技术是利用 CO₂ 在超临界状态下溶解能力随压力、温度显著变化的特性,通过调控压力、温度、时间等条件,使超临界 CO₂ 对目标溶质进行选择性溶解,并实现目标溶质与其他物质分离的一种技术。魏帅等^[28]采用超临界 CO₂ 联合超声提取虾油,提取率可达 52.97%。相比于溶剂萃取法,该方法具有无毒、无污染和提取率高等优点。但该技术存在设备投资成本高、工艺参数调控复杂等局限性,制约其大规模工业化应用。目前,南美白对虾加工副产物中油脂提取技术相对较少。但鉴于对油脂健康摄入以及预防控制相关疾病的需求不断增加,开发低成本、高效化且兼具功能性成分保留的新型提取技术(如酶法辅助萃取、纳米载体靶向分离等)将成为重要发展方向。

2.4 蛋白质的提取与制备

2.4.1 内源性酶制剂 内源性酶制剂是生物体内自身产生的,可从生物组织或细胞中提取,具有特定催化功能,能参与生物体内各自生理生化反应的一类酶制剂形式。硫酸铵分级沉淀结合层析法是提取虾头内源性酶制剂的常用方法^[29]。王贺^[29]先对虾头进行短波紫外线(UV-C)照射胁迫,再分别在 70%, 60% 硫酸铵浓度下沉淀虾头内源性酸性蛋白酶和碱性蛋白酶,并对其进行 S-100 凝胶层析、SDS-PAGE 凝胶电泳得到虾头内源酸性蛋白酶和碱性蛋白酶。对其进行质谱鉴定和同源性分析发现,虾头内源酸性、碱性蛋白酶分别与南美白对虾的胃蛋白酶

和胰蛋白酶具有 100% 的同源性,该方法通过分级沉淀与层析技术的结合,为虾头内源酶的高效分离提供可行路径,但其在实际应用中仍存在一定局限性,如工艺步骤繁琐、纯化周期较长及酶活性损失风险较高等^[29]。

2.4.2 生物活性肽与氨基酸 通过酶解法可有效从南美白对虾加工副产物中制备降血糖肽、降压肽、抗氧化肽、免疫活性肽等多种生物活性肽。制备出的生物活性肽经过进一步水解与分离纯化等过程可提取氨基酸。向熙^[30]从 5 种食品级蛋白酶(风味蛋白酶、木瓜蛋白酶、碱性蛋白

酶、动物蛋白酶和复合蛋白酶)中选用动物蛋白酶解虾头,在酶解时间 4.2 h,加酶量 3%,料液比 1:8.8 (g/mL)的最佳工艺下制备二肽基肽酶(DPP-IV)抑制肽,并对其进行超滤分离、凝胶色谱、反相高效液相色谱等分离纯化过程,最后鉴定出活性最高的 4 条 DPP-IV 抑制肽的肽序列为 Tyr-Pro-Gly-Glu、Val-Pro-Trp、His-Pro-Leu-Tyr 及 Tyr-Ala-Thr-Pro,符合 DPP-IV 抑制肽的第 N 端第二位为丙氨酸(A)和脯氨酸(P)的典型特征。南美白对虾副产物酶解制备生物活性肽的制备信息见表 1。

表 1 南美白对虾副产物酶解制备生物活性肽信息表

Table 1 Information of bioactive peptides prepared by enzymatic hydrolysis of by-products of *Litopenaeus vannamei*

生物活性肽类	酶	肽段序列组成	应用价值	参考文献
降血糖肽(二肽基肽酶(DPP-IV)抑制肽)	动物蛋白酶	Tyr-Pro-Gly-Glu(YPGE) Val-Pro-Trp(VPW) His-Pro-Leu-Tyr(HPLY) Tyr-Ala-Thr-Pro(YATP)	开发降血糖功能性 食品或药品	[30]
降压肽(血管紧张素转化酶(ACE)抑制肽)	复合蛋白酶(胰蛋白酶+风味蛋白酶)		降血压	[31]
抗氧化肽	碱性蛋白酶协同虾头内 源自溶酶		抵御自由基对人体 的伤害,延缓衰老	[32]
免疫活性肽	动物蛋白酶	Pro-Ser-Pro-Phe-Tyr-Phe-Thr-Tyr(PSPFPYFT) Ser-Ala-Gly-Phe-Pro-Glu-Gly-Phe(SAGFPEGF) Gly-Pro-Gln-Gly-Pro-Pro-Gly-His(GPQGPPGH) Gln-Gly-Phe(QGF) Pro-Gly-Met-Arg(PGMR) Trp-Gln-Arg(WQR)	增强机体免疫水平	[33]

然而,酶解法提取生物活性肽同样存在酶种类筛选复杂、最优工艺参数普适性不足以及分离纯化步骤复杂导致肽得率较低等问题。

2.4.3 蛋白粉 蛋白粉是以蛋白质为主要成分的营养补充剂,从南美白对虾加工副产物中提取蛋白粉,主要通过酶解或发酵处理虾头和虾壳,提取酶解液或发酵液,再经喷雾干燥制备而成^[34-35]。曹环等^[34]采用风味蛋白酶,在 60 ℃下对虾头、虾壳酶解 30 min,并经过灭酶、过滤、真空浓缩等步骤后,在进风温度 190 ℃,入料浓度 15%,虾固体与麦芽糊精比例 4:1 的条件下喷雾干燥,得到感官评分为 94 分的蛋白粉。刘培^[35]利用地衣芽孢杆菌发酵虾头,经过滤、喷雾干燥后,获得蛋白质含量为 67.60% 的虾蛋白粉。喷雾干燥是制备粉状产品的常用方法,具有操作简便、生产效率高等优势,但存在高温使蛋白变性、参数难控制、产品质量不稳以及设备投资及能耗大等问题。

3 高值化应用领域

3.1 食品领域

3.1.1 食品保鲜 食品保鲜是食品加工中的关键环节,涂膜保鲜作为广泛应用的技术手段,通过在食品表面均

匀涂上一层可食用薄膜,可有效抑制微生物生长、减少水分散失和延缓食品变质,从而延长食品的货架期和保持其品质^[36]。韩青佑^[16]在虾青素的最佳比率(0.02%)下制备虾青素—明胶复合膜,并将其应用于新鲜蓝莓保鲜,与明胶液组和空白组进行对照。结果表明,该复合膜处理的蓝莓失重率、腐败率显著低于对照组,且有效抑制了丙二醛的积累,从而实现了延长货架期的目的。目前,通过提取南美白对虾加工副产物获得的虾青素、壳聚糖等成分可进一步制备虾青素—明胶复合膜、虾青素—羟甲基壳聚糖复合膜、虾青素—壳聚糖明胶复合膜和壳聚糖—柠檬酸可食用涂膜等多种复合膜。这些薄膜应用于果蔬、水产品后可有效延长食品的货架期和维持其原有品质,且在抗菌、抗氧化食品包装等方面也具有较大的应用前景^[16,37-39]。然而,目前基于南美白对虾副产物的涂膜保鲜研究多集中于单一膜材料性能优化,复合膜协同增效机制尚不明确;且膜材料在复杂食品基质中的适用性及安全性评估体系仍需完善。

3.1.2 调味料 南美白对虾加工副产物中富含多种呈味氨基酸,是开发食品调味料的优质原料。吴书建等^[39]利用菠萝蛋白酶和风味蛋白酶制备出具有良好鲜味特性的

水解物。该水解物的游离氨基酸组成中,游离鲜甜味氨基酸在总游离氨基酸中占 47%,其中,对鲜味贡献突出的游离谷氨酸和游离天冬氨酸占总游离氨基酸的 12%,且游离鲜甜味氨基酸含量远超游离苦味氨基酸。在水解物的总氨基酸组成中,52% 的氨基酸为游离鲜甜味氨基酸,表明该水解物滋味良好,在调味品开发领域具有广泛的应用前景。

虾油是一种富含多种风味物质、维生素和油酸、亚油酸等多不饱和脂肪酸的海鲜调味品。袁三月^[40]采用加曲发酵工艺,在液固比 0.63:1 (mL/g)、盐度 25.25%、加曲量 19.16%、发酵温度 35 ℃的条件下,从南美白对虾头中提取虾油。所制得的虾油含有烷烃、吡嗪类、酮类、醇类和醛类 5 种挥发性成分,氨基酸态氮含量为 0.68 g/100 mL,鲜味、甜味氨基酸含量分别为 28.57, 20.61 mg/mL。该虾油鲜味浓郁、咸味适中,在感官评价中整体接受度较高。

虾酱是一种以小虾或虾副产物为原料,经加盐腌制,发酵制成的酱类调味品,因其具有独特的风味且营养丰富,深受沿海地区人们的喜爱^[41]。对虾头进行加曲发酵或复合发酵剂发酵,能够制备出风味优良且可被广泛应用于炒制菜肴、腌制食材、制作汤品等方面的虾酱调味品^[41-44]。罗美燕^[41]将仅添加海盐的传统虾酱与外接微生物发酵加曲虾酱进行对比,经电子鼻和电子舌分析发现,后者制成的虾酱能更好地提升虾酱本身的鲜味、减少苦涩味,整体风味得到有效改善。

3.2 生物医药领域

3.2.1 生物医学材料 在生物医学材料领域,南美白对虾副产物的高值化利用备受关注。其中以虾壳壳聚糖为原料制备伤口敷料展现出显著的应用潜力。壳聚糖作为天然多糖材料,凭借其良好的生物抗菌性、生物相容性等特性,被广泛应用于医用敷料领域^[45]。Eulálio 等^[45]以马来酸作为交联剂,采用溶剂浇铸法制备壳聚糖薄膜用于伤口敷料,制备出的壳聚糖薄膜呈现出良好的水蒸气渗透性、水蒸气透过率、润湿性、可降解性和拉伸强度等特性^[45]。这些特性与伤口愈合需要的微环境调控、防黏连及物理保护功能相符^[46],证实该薄膜可作为伤口敷料材料。目前,该壳聚糖薄膜仍存在复杂环境中的长期稳定性不足,且交联剂的残留毒性风险及大规模生产中的均匀性控制等问题尚未完全解决,因此其临床转化进程暂被限制。该研究不仅为虾壳中壳聚糖的高值化利用开辟了新路径,还为生物医学材料的发展提供了更具潜力的选择,有望在未来应用于慢性伤口护理、术后创面修复等医用场景中,推动生物医学材料向绿色化、高值化方向发展。

3.2.2 疾病防治 阿尔兹海默症(AD)是一种神经退行性疾病,临床表现为认知和记忆功能衰退等症状,对老年人群的身体健康和生活质量造成严重危害,是导致老年痴呆的主要原因^[47]。目前,临幊上暂无该病症的治愈方法,主要通过姑息疗法和药物疗法等多种方式缓解症状。

其中,抗凝剂肝素对 AD 具有潜在治疗作用,但其强大的抗凝活性可能引发出血风险等安全问题,因此无法在临幊上被广泛使用^[12,21]。Mycroft-West 等^[12]研究发现,从南美白对虾中提取的糖胺聚糖具有低抗凝活性且能有效抑制 β -淀粉样前体蛋白裂解酶 1(BACE-1)。相较于传统抗凝剂肝素,南美白对虾来源的糖胺聚糖治疗指數提升了 22.7 倍,显著提高了治疗安全性和有效性。但该研究仍处于基础探索阶段,目前多基于体外细胞或斑马鱼模型,缺乏人体临幊试验数据,其药代动力学特性尚未明确。

心血管疾病(CVD)是心脏和血管疾病的统称,涵盖冠心病、心律失常、动脉粥样硬化等多种病症。随着生活水平提升、饮食结构失衡和体力活动减少,CVD 发病率不断提高,严重危害人类的身体健康。促血管生成作为修复血管损伤、改善心肌供血的关键机制,成为心血管防治的重要环节^[48]。近年来,Zhang 等^[14,26,49]基于斑马鱼模型评估了南美白对虾虾头磷脂的心血管活性,发现其具有逆转血管损伤、抗血栓形成和心脏保护等功效。在提取出的多种磷脂类型中,PC 含量占比最高,且对斑马鱼体节间血管和肠下静脉血管生成的促进作用最为显著^[49]。然而,目前研究仍需突破两大瓶颈:① 虾头磷脂中活性成分(如 PC)在体内的作用靶点和分子机制尚未完全解析,需结合蛋白质组学或基因敲除技术深入探究;② 规模化生产中磷脂纯度控制存在技术瓶颈,需开发高效层析分离或纳米过滤等新型工艺。

高血压、高血脂、糖尿病等慢性疾病的防治同样不可忽视,药物防治是较为常用的手段。相较于传统药物防治,生物活性肽因其具有副作用小、安全性更高等优势,逐渐被人们接受,并在慢性疾病的防治方面发挥重要作用^[50]。食源性蛋白是提取生物活性肽的常用方法,相较于传统化学合成法,其获得的生物活性肽安全性更高^[51]。南美白对虾加工副产物作为优质食源性蛋白资源,在生物活性肽开发方面具有显著优势^[13]。血管紧张素转化酶(ACE)抑制肽是一种降压肽,其通过抑制 ACE 活性,降低血管紧张素 II 的浓度,从而达到降血压的目的^[31]。秦莹等^[31]采用风味蛋白酶和胰蛋白酶复合酶解制备南美白对虾虾头 ACE 抑制肽,抑制率可达 83.57%,表明其在降血压方面具备较大的应用潜力。此外,南美白对虾加工副产物还可提取降压糖肽、抗氧化肽和免疫活性肽等,各类生物活性肽在慢性疾病防治方面的应用价值见表 1。尽管生物活性肽在慢性疾病防治中呈现出显著应用前景,但其临床转化仍面临稳定性不足、剂型开发滞后和多肽协同作用机制尚未明确等关键瓶颈。

4 结论与展望

南美白对虾加工副产物的高值化利用研究已取得阶段性进展,通过多学科技术手段实现了虾青素、甲壳素、油脂及蛋白质等功能成分的高效提取与转化。超临界

CO₂萃取、酶解技术及微生物发酵等方法在提升副产物利用率方面展现出显著优势,尤其是在虾青素抗氧化性能开发、壳聚糖生物相容性应用及活性肽功能化研究等领域形成了特色技术路径。然而,目前研究仍面临提取工艺绿色化程度不足、高附加值产品开发深度有限、副产物综合利用体系尚未完善等瓶颈问题。此外,副产物中痕量重金属残留控制、活性成分构效关系解析及规模化生产稳定性等关键技术亟待突破。

未来研究可从以下5个方面进行深入推进:①开发基于绿色化学理念的集成提取技术,重点突破深共晶溶剂萃取、微波辅助酶解等新型技术的工业化适配性,构建低碳环保的副产物加工体系。②强化活性成分的精准修饰与靶向应用研究,如通过分子印迹技术提升虾青素稳定性,利用纳米载体增强壳聚糖生物利用度,开发具有特定功能的活性肽组合物,并明确其在复杂生理环境中的作用靶点。③探索副产物在生物医药领域的创新应用,重点开展糖胺聚糖抗阿尔茨海默病机制研究、虾青素脂质体药物递送系统开发及抗菌肽新型敷料研制。④构建“副产物—中间体—高值产品”的全链条利用模式,开发虾壳基生物吸附材料、虾头源微生物发酵饲料添加剂等跨界产品。⑤建立副产物质量安全评价体系,完善重金属脱除技术标准,制定活性成分提取与应用的行业规范。通过多学科交叉融合,推动南美白对虾产业向资源高效利用、环境友好的可持续发展模式转型,为海洋生物加工副产物的高值化利用提供理论支撑与技术范例。

参考文献

- [1] 段少奇. 凡纳滨对虾真空微波干燥工艺优化及干制过程中风味成分变化规律的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2021: 1.
- [2] 王丹, 高宏泉. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 22-24.
- [3] 方佳琪, 韩情, 马阳瑜, 等. 一种多金属氧酸盐对多酚氧化酶的抑制活性评价及在南美白对虾保鲜上的应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 114-121.
- [4] 聂斌, 李傲婷, 崔小凡, 等. 海参体腔液提取物对南美白对虾自溶的抑制作用[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 15-19.
- [5] 林晓彤. 南美白对虾壳主要组分清洁提取与综合利用研究[D]. 厦门: 集美大学, 2022: 1-51.
- [6] LIN X T. Study on clean extraction and comprehensive utilization of main components in the shell of *Litopenaeus vannamei*[D]. Xiamen: Jimei University, 2022: 1-51.
- [7] 相欢, 赵娟娟, 黄卉, 等. 不同运载体对南美白对虾源虾青素的消化吸收的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(9): 80-90.
- [8] XIANG H, ZHAO J J, HUANG H, et al. Effects of different carriers on the digestion and absorption of astaxanthin from *Litopenaeus vannamei*[J]. Food Science, 2025, 46(9): 80-90.
- [9] 张钰婕, 于晨旭, 张沛敏, 等. 虾青素脂质体的制备及其应用研究[J]. 广东化工, 2023, 50(19): 45-47.
- [10] ZHANG Y J, YU C X, ZHANG P M, et al. Preparation and application of astaxanthin liposomes[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(19): 45-47.
- [11] 张旭飞. 冻藏条件及加热方法对凡纳滨对虾色泽、虾青素含量及体外抗氧化活性研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2021: 10-23.
- [12] ZHANG X F. Study on frozen storage conditions and heating methods on the color, astaxanthin content and in vitro antioxidant activity of *Litopenaeus vannamei*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2021: 10-23.
- [13] PAN C, ISHIZAKI S, NAGASHIMA Y, et al. Functional and structural properties of red color-related pigment-binding protein from the shell of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(4): 1719-1727.
- [14] 张巧, 李永成. 南美白对虾壳甲壳素的提取工艺及结构分析[J]. 食品科技, 2020, 45(4): 187-192.
- [15] ZHANG Q, LI Y C. Preparation and structural characterization of chitin from shrimp shell of *Penaeus vannamei*[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(4): 187-192.
- [16] CAHÚ T B, SANTOS S D, MENDES A, et al. Recovery of protein, chitin, carotenoids and glycosaminoglycans from Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) processing waste [J]. Process Biochemistry, 2012, 47(4): 570-577.
- [17] MYCROFT-WEST C J. Non-anticoagulant glycosaminoglycan extracts isolated from aquatic species inhibit bace-1, a key drug target in Alzheimer's disease[D]. Keele, West Midlands, UK: Keele University, 2022: 17-243.
- [18] 刘振洋. 凡纳滨对虾虾头贮藏过程中鲜度和风味物质的变化[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2021: 12-17.
- [19] LIU Z Y. Changes in freshness and flavour compounds of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) heads during storage[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2021: 12-17.
- [20] ZHANG M Q, LI P H, WANG F X, et al. Separation, identification and cardiovascular activities of phospholipid classes from the head of *Penaeus vannamei* by lipidomics and zebrafish models[J]. Food & Function, 2021, 12(5): 2282-2291.
- [21] 齐宇, 贾喆, 宋茹. 南美白对虾不同部位虾青素的提取及特征分析[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(18): 188-190, 193.
- [22] QI Y, JIA Z, SONG R. Analysis of extraction and

- characteristics of astaxanthin derived from different parts of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(18): 188-190, 193.
- [16] 韩青佑. 虾壳中虾青素的提取及其在保鲜中的应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 7-35.
- HAN Q Y. Extraction and application on preservation of astaxanthin to shrimp shell[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017: 7-35.
- [17] 韩露, 项丹丹, 谢丹, 等. 甲壳类水产及其加工副产物中虾青素提取方法研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 197-204.
- HAN L, XIANG D D, XIE D, et al. Advances in extraction methods of astaxanthin from crustacean aquatic products and their processing by-products[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(8): 197-204.
- [18] 李念, 陈露珠, 安鑫, 等. 3 种虾壳中虾青素提取工艺优化及其抗氧化活性比较[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 298-308.
- LI N, CHEN L Z, AN X, et al. Optimization of extraction process and comparison of antioxidant activities of astaxanthin from three kinds of shrimp shells[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(1): 298-308.
- [19] GULZAR S, BENJAKUL S. Ultrasound waves increase the yield and carotenoid content of lipid extracted from cephalothorax of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2018, 120(5): 1700495.
- [20] ZHANG H, TANG B K, ROW K H. A green deep eutectic solvent-based ultrasound-assisted method to extract astaxanthin from shrimp byproducts[J]. *Analytical Letters*, 2014, 47(5): 742-749.
- [21] MYCROFT-WEST C J, DEVLIN A J, COOPER L C, et al. Glycosaminoglycans from *Litopenaeus vannamei* inhibit the Alzheimer's disease β secretase, BACE1[J]. *Marine Drugs*, 2021, 19(4): 203.
- [22] CURBELO HERNANDEZ C, PALACIO DUBOIS Y. Wastes shrimp chemical treatment for chitin obtaining[J]. *Centro Azucar*, 2021, 48(2): 103-116.
- [23] 邓俊劲. 新型蛋白酶及几丁质酶的开发及其在虾加工废弃物中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 19-74.
- DENG J J. Development of proteases and chitinases and their applications in shrimp shell wastes utilization[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 19-74.
- [24] QUIÑONES-CERNA C, RODRÍGUEZ-SOTO J C, HURTADO-BUTRÓN F, et al. Efficient chitin extraction from shrimp exoskeletons through single-step fermentation by *pseudomonas aeruginosa* QF50 and *serratia* sp. QCS₂[J]. *Processes*, 2024, 12(6): 1 184.
- [25] NASCIMENTO J I G, STAMFORD T C M, MELO N F C B, et al. Chitosan-citric acid edible coating to control *colletotrichum gloeosporioides* and maintain quality parameters of fresh-cut guava[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 163: 1 127-1 135.
- [26] 解冬晓, 李昊楠, 孟荣华, 等. 基于斑马鱼模型研究不同磷脂促血管生成活性[J]. *食品科学*, 2022, 43(17): 182-187.
- XIE D X, LI H N, MENG R H, et al. Angiogenic promoting activity of different phospholipids in zebrafish[J]. *Food Science*, 2022, 43(17): 182-187.
- [27] 李雨霖, 余炼, 倪婕, 等. 对虾加工下脚料的综合提取技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(23): 337-345.
- LI Y L, YU L, NI J, et al. Research progress on comprehensive extraction technology of prawn processing scraps[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(23): 337-345.
- [28] 魏帅, 唐鉴珺, 马嘉亿, 等. 超临界 CO_2 萃取联合超声处理对凡纳滨对虾虾头油脂提取效果的影响[J]. *保鲜与加工*, 2024, 24(1): 15-19.
- WEI S, TANG Y J, MA J Y, et al. Effects of supercritical CO_2 extraction combined with ultrasound treatment on shrimp (*Litopenaeus vannamei*) head oil extraction[J]. *Storage and Process*, 2024, 24(1): 15-19.
- [29] 王贺. UV-C 照射胁迫诱导凡纳滨对虾头内源蛋白酶激活的机制研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019: 23-63.
- WANG H. Activation mechanism of endogenous protease in shrimp head of *Litopenaeus vannamei* induced by UV-C irradiation stress[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019: 23-63.
- [30] 向熙. 南美白对虾虾头蛋白源二肽基肽酶IV(DPP-IV)抑制肽的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 1-8, 10-30.
- XIANG X. Study on dipeptidyl peptidase-IV (DPP-IV) inhibitory peptides derived from shrimp (*Penaeus vannamei*) head[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022: 1-8, 10-30.
- [31] 秦莹, 马丹妮, 陆节塑, 等. 复合酶解南美白对虾虾头制备 ACE 抑制肽的工艺优化[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(13): 120-128, 149.
- QIN Y, MA D N, LU J K, et al. Optimization of ACE inhibitory peptide preparation from the head of *Penaeus albus* by complex enzymatic hydrolysis[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(13): 120-128, 149.
- [32] 吴泽龙, 何建林, 白锴凯, 等. 南美白对虾副产物酶解工艺优化及其蛋白肽活性评价[J]. *应用海洋学报*, 2023, 42(3): 495-506.
- WU Z L, HE J L, BAI K K, et al. Optimization of enzymatic digestion process of *Penaeus vannamei* by-products and the bioactivity evaluation of the enzymatic hydrolysates[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2023, 42(3): 495-506.
- [33] 蒋蔚薇. 凡纳滨对虾虾头免疫活性肽的制备及其免疫作用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023: 10-59.
- JIANG W W. Preparation and immunomodulatory effect of immunomodulatory peptides from the heads of *Litopenaeus vannamei*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023: 10-59.
- [34] 曹环, 周爱梅, 叶雪丽, 等. 喷雾干燥应用于对虾加工废弃物制造水解蛋白粉的研究[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(12): 272-275.
- CAO H, ZHOU A M, YE X L, et al. Study on the production

- of hydrolyzed protein powder from wastes of shrimp using spray drying[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 31(12): 272-275.
- [35] 刘培. 南美白对虾虾头的微生物法综合利用技术[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 32-38.
- LIU P. Microbial technology utilization of *Penaeus vannamei* boone shrimp head[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: 32-38.
- [36] 郝丹青, 孙海燕, 刘笑, 等. 蓝莓涂膜保鲜研究进展[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(9): 129-132.
- HAO D Q, SUN H Y, LIU X, et al. Research advances on coating techniques of blueberry[J]. *Storage and Process*, 2021, 21(9): 129-132.
- [37] 李念. 南极磷虾虾青素提取、性质及其保鲜应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 30-40.
- LI N. Study on extraction, properties and preservation application of astaxanthin from *Euphausia superba*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021: 30-40.
- [38] XU J H, WEI R B, JIA Z, et al. Characteristics and bioactive functions of chitosan/gelatin-based film incorporated with ϵ -polylysine and astaxanthin extracts derived from by-products of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 100: 105436.
- [39] 吴书建, 张佳男, 高世珏, 等. 南美白对虾虾头制备鲜味水解物的研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 34-42, 50.
- WU S J, ZHANG J N, GAO S J, et al. Preparation of hydrolysate with umami from white shrimp (*Penaeus vannamei*) head[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(4): 34-42, 50.
- [40] 负三月. 利用副产物发酵虾油的工艺优化及变温发酵对虾油品质的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018: 15-40.
- YUN S Y. The optimization of fermentation process and the effect under temperature variation on the quality of shrimp sauce fermented with by-product[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018: 15-40.
- [41] 罗美燕. 虾酱快速发酵工艺的优化及微生物多样性和风味分析研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2022: 34-65.
- LUO M Y. Optimization of rapid fermentation process and analysis of microbial diversity and flavor of shrimp paste[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2022: 34-65.
- [42] 黄爱莲, 安敏, 罗美燕, 等. 利用南美白对虾虾头加曲快速发酵制备虾酱的工艺研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(8): 106-110.
- HUANG A L, AN M, LUO M Y, et al. Study on the technology of rapid fermentation of *Penaeus vannamei* head with koji for preparing shrimp paste[J]. *China Condiment*, 2023, 48(8): 106-110.
- [43] 谢静雯, 于靖, 杨锡洪, 等. 蔗糖对复合菌快速发酵虾头酱产品品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 13-18, 24.
- XIE J W, YU J, YANG X H, et al. Effect of sucrose on the quality of shrimp head sauce rapidly fermented by compound bacteria[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42 (3): 13-18, 24.
- [44] YU J, LU K, SUN J Y, et al. The flavor and antioxidant activity change pattern of shrimp head paste during fermentation[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2022, 21(1): 195-203.
- [45] EULÁLIO H Y C, VIEIRA M, FIDELES T B, et al. Physicochemical properties and cell viability of shrimp chitosan films as affected by film casting solvents. I-potential use as wound dressing[J]. *Materials*, 2020, 13(21): 5 005.
- [46] 程海霞, 陈玲玲, 鲍丽超. 现代伤口敷料在慢性伤口护理中的研究进展[J]. 全科护理, 2025, 23(5): 825-827.
- CHENG H X, CHEN L L, BAO L C. Research progress of modern wound dressings in chronic wound care[J]. *Chinese General Practice Nursing*, 2025, 23(5): 825-827.
- [47] 易英如, 夏莎莎, 陈媛媛, 等. 膳食多酚对阿尔茨海默症的潜在防治作用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 356-364.
- YI Y R, XIA S S, CHEN Y Y, et al. Potential preventive and therapeutic effects of dietary polyphenols on Alzheimer's disease: a review[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(9): 356-364.
- [48] 孙帝力, 肖纯, 杨向东. 心血管疾病的血管生成及巨噬细胞调控策略[J]. 中国动脉硬化杂志, 2025, 33(11): 981-988.
- SUN D L, XIAO C, YANG X D. Angiogenesis and macrophage regulation strategies in cardiovascular diseases[J]. *Chinese Journal of Arteriosclerosis*, 2025, 33(11): 981-988.
- [49] 李昊楠. 虾头磷脂的高纯度制备及活性研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021: 21-50.
- LI H N. Study on the preparation and activity evaluation of phospholipids with high purity from shrimp head[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021: 21-50.
- [50] 徐琳杰, 蒋蓉, 张成桂, 等. 生物活性肽调控细胞凋亡作用机制的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(9): 240-249.
- XU L J, JIANG R, ZHANG C G, et al. Research progress on the mechanism of bioactive peptides regulating cell apoptosis [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(9): 240-249.
- [51] 王琳琳, 陈立, 李建科. 食源血管紧张素转化酶抑制肽研究进展[J]. 中国果菜, 2020, 40(6): 71-76.
- WANG L L, CHEN L, LI J K. Research progress of natural dietary ACE inhibitory peptide[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2020, 40(6): 71-76.