

吴园园, 郑克炜, 李文珠, 等. 带鱼生物活性肽酶法制备和功能特性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 425-433. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030213

WU Yuanyuan, ZHENG Kewei, LI Wenzhu, et al. Research Progress on Enzymatic Preparation and Functional Properties of Bioactive Peptides in Hairtail[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 425-433. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030213

· 专题综述 ·

带鱼生物活性肽酶法制备和功能特性 研究进展

吴园园¹, 郑克炜², 李文珠¹, 李澄³, 严小军¹, 马庆保^{1,2,*}, 姜维^{1,2,*}

(1. 浙江海洋大学国家海洋设施养殖工程技术研究中心(创新应用研究院), 浙江舟山 316022;

2. 浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江舟山 316022;

3. 浙江兴业集团有限公司, 浙江舟山 316022)

摘要: 带鱼是我国重要的经济鱼种, 富含蛋白质等营养成分, 是制备生物活性肽的优质来源。本文综述了带鱼活性肽的酶解法制备工艺及相关辅助方法, 酶解液的抗氧化活性的研究较为广泛, 碱性和木瓜蛋白酶是制备带鱼活性肽常用酶种, 但对于酶解液中哪些肽序发挥作用及其作用机制的研究相对较少; 本文阐述了带鱼活性肽抗氧化、降血压、抗菌、降血糖、抗疲劳、抗贫血、动物生长调节等活性的研究现状, 总结了带鱼活性肽的活性评价方法、主要影响因素及其作用效果, 但目前关于带鱼活性肽的研究多停留在体外活性层面, 体内活性验证和分子层面的研究是未来的重要方向; 本文还总结和展望了带鱼活性肽研究中的问题, 以期对带鱼活性肽的开发和应用提供参考。带鱼源生物活性肽制备简便且活性丰富, 在食品工业、保健品以及医药等领域具有广阔的应用前景。

关键词: 带鱼, 生物活性肽, 功能特性

中图分类号: TS254.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)04-0425-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030213



本文网刊:

Research Progress on Enzymatic Preparation and Functional Properties of Bioactive Peptides in Hairtail

WU Yuanyuan¹, ZHENG Kewei², LI Wenzhu¹, LI Cheng³, YAN Xiaojun¹, MA Qingbao^{1,2,*}, JIANG Wei^{1,2,*}

(1. National Engineering Research Center for Marine Aquaculture (Institute of Innovation and Application),

Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

3. Zhejiang Xingye Industrial Group Co., Ltd., Zhoushan 316022, China)

Abstract: Hairtail is a significant economic fish species in China, rich in protein and other nutrients, making it an excellent source of bioactive peptides. This review provides the enzymatic hydrolysis processes and auxiliary methods used for preparing hairtail bioactive peptides. The antioxidative activity of enzymatic hydrolysates is extensively studied, with alkaline protease and papain being the most commonly used enzymes. However, research on the specific peptide sequences responsible for bioactivity and their underlying mechanisms remains limited. This review discusses the current state of research on the bioactivities of hairtail peptides, including antioxidative, antihypertensive, antibacterial, antidiabetic, antifatigue, anti-anemia, and growth regulation activities. The evaluation methods, key influencing factors, and effectiveness of these bioactivities are summarized. Most existing studies on hairtail bioactive peptides focus on *in vitro*

收稿日期: 2024-03-15

基金项目: 浙江省教育厅一般科研项目(Y202457283); 国家重点研发计划项目(2023YFD2401501); 浙江省基础公益研究计划项目(TGN23C200051); 舟山市科技项目(2023C13014)。

作者简介: 吴园园(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: wuyuanyuan@zjou.edu.cn。

* 通信作者: 马庆保(1991-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 海洋活性肽研究与开发, E-mail: qbma0303@zjou.edu.cn。

姜维(1987-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品加工与贮藏, E-mail: jiangw@zjou.edu.cn。

activities, highlighting the need for *in vivo* activity verification and molecular-level research as important future directions. This review also addresses current issues in hairtail bioactive peptide research, providing insights for their development and application. The simple preparation process and diverse bioactivity of hairtail-derived bioactive peptides present broad application prospects in the food industry, health products, and pharmaceuticals.

Key words: hairtail; bioactive peptides; functional properties

带鱼(*Trichiurus lepturus*)又名刀鱼,牙带,鳞刀鱼等,是我国沿海水域中一种具有重要经济价值的鱼类^[1],2023年中国渔业统计年鉴数据显示,2022年我国带鱼捕捞产量达到90.3万吨^[2]。带鱼富含丰富的多不饱和脂肪酸、多种维生素和矿物质,尤其富含高质量的蛋白质,涵盖了人体所需的各类必需氨基酸^[3]。除了直接食用外,带鱼还被加工成如鱼糜、罐头、鱼油等产品,在加工过程中会产生占总带鱼重量约40%的内脏、鱼骨等副产物^[4]。目前,带鱼及其副产物中的蛋白质资源尚未得到有效利用,因此以带鱼及其副产物为原料制备生物活性肽,将其转化为高附加值的产品,提高其生物利用率,是带鱼资源高值高质化利用的重要研究和产业应用方向。

近年来,在带鱼中发现了多种具有生物活性的物质,包括带鱼糖蛋白^[5]和带鱼多肽等,具有抗疲劳、抗氧化^[6]、降血糖^[7]、降血压^[8]、抗菌^[9]等多种生理功能。其中带鱼生物活性肽研究最为广泛。生物活性肽(Bioactive Peptides)是由氨基酸组成的具有特定生理功能的短肽链,通常在2~20个氨基酸之间,其在生物体内发挥调节生理过程、参与细胞信号传导、调节免疫系统等多种功能^[10]。生物活性肽易于消化吸收,能够直接参与人体蛋白质的合成^[11]。同时,活性肽在体内还能与矿物质和金属离子形成螯合物,提高微量元素的吸收利用率^[12]。截止2023年,“BIOPEP”数据库已收录4746种生物活性肽^[13],生物活性肽来源于天然产物,毒副作用较小,在生物学和医学等领域受到广泛关注,具有极大的应用潜力。

本文介绍了带鱼生物活性肽的制备和功能特性,总结了带鱼生物活性肽的研究现状,并展望了带鱼生物活性肽的发展方向,以期带鱼中蛋白资源的开发利用提供重要参考。

1 酶解法制备带鱼活性肽

生物活性肽的制备方法中,酶解法因其成本低、效率高、操作简单且具有较高的安全性等特点,成为制备带鱼生物活性肽最常用的方法^[14]。酶解法是以带鱼及其副产物为原料制备抗氧化肽、抗菌肽和生长调节肽等活性肽的主要方法。而且原料的来源也比较丰富,如带鱼、带鱼肉、带鱼鱼糜、带鱼鱼糜洗涤水^[15]、带鱼脊骨等。

蛋白酶是酶解法制备带鱼生物活性肽的主要工具,包括碱性蛋白酶、木瓜蛋白酶、风味蛋白酶等,不同蛋白酶的酶解位点不同,产生的多肽片段可能具有不同的功能活性^[16]。以带鱼及其副产物为原料,利用酶解法制备生物活性肽的过程中,不同蛋白酶所得到

的生物活性肽种类差异显著。许多抗氧化肽通常由碱性蛋白酶水解产生,如JIN等^[17]以带鱼为原料,采用碱性蛋白酶水解得到了含有较高比例疏水性氨基酸的抗氧化肽,这可能是因为疏水性氨基酸在清除自由基方面发挥着重要作用^[18],而碱性蛋白酶的酶切位点主要为含有疏水性氨基酸的肽键,因此通常选择碱性蛋白酶进行抗氧化肽的制备。

采用单一酶水解法可能会造成水解程度不足,进而影响生物活性肽的产量、稳定性及活性。而复合酶解法能够实现更为深度的蛋白质水解,产生更多的肽段。目前,带鱼制备生物活性肽的研究中,有超过三分之一的活性肽是通过复合蛋白酶制备而得到的。例如,丁冬各^[19]分别采用碱性蛋白酶和木瓜蛋白酶水解带鱼鱼肉制备抗氧化肽,DPPH自由基清除率分别为53%和48%,采用碱性蛋白酶和木瓜蛋白酶复合酶解制得产物的DPPH自由基清除率提高至61%。

酶解法制备带鱼活性肽过程中,酶解条件也是重要的影响因素。一般采用正交试验或者响应面法进行酶解条件的优化,而酶解时间(2~12.1 h)、温度(35~60 °C)、pH(2~8.5)、加酶量以及料液比是常用到的优化因素(表1)。

此外,为了促进蛋白质酶解进程及提高酶解产物的活性,微波和超声波等辅助技术在酶解过程中得到了广泛的关注与应用。微波辅助酶解具有高效、反应时间短、产物得率高等优点^[20],HUANG等^[21]发现与水浴酶解相比,微波辅助酶解显著缩短了蓝点马鲛蛋白酶解产物的制备时间,并显著提高了其总抗氧化能力。超声波是一种具有能量和波动的双重机械波,将超声波与酶解反应结合,可以提高酶解反应的速度从而缩短酶解时间,在带鱼活性肽制备中得到广泛应用。马洁等^[22]的研究结果显示,带鱼经过20 min的超声辅助酶解后,酶解产物的水解度、黄嘌呤氧化酶抑制率以及肌肽和鹅肌肽的含量均显著升高,这可能归因于超声波的空化作用,其能够破坏细胞结构,促使胞内物质加速释放出来。

2 带鱼金属螯合肽的制备

金属元素在维持人体生命活动中扮演着至关重要的角色。金属螯合肽的初步制备主要是通过物理、化学等方法将蛋白分解成多肽,而酶解法因条件温和、安全性高、成本低等优点,成为金属螯合肽初期制备的主要方法^[23]。肽的氨基酸残基提供了羧基、氨基和酮基等配体位点,使其能够与金属离子如钙^[24]、铁^[25]、锌^[26]等形成金属离子螯合肽。金属离

表 1 带鱼活性肽的制备条件
Table 1 Preparation conditions of active peptides from hairtail

序号	活性	来源	蛋白酶种类	酶解条件					水解度	文献
				时间(h)	温度(°C)	pH	加酶量	料液比(g/mL)		
1		带鱼	碱性蛋白酶	4	55	7.5	0.6%	1:2	/	[17]
2		带鱼	碱性蛋白酶 风味蛋白酶	2 3.5	50 45	9.0 7.0	4% 4%	1:5	26.3%	[19]
3				3.8	48	/	1.65%	1:3	/	
4	抗氧化	带鱼	碱性蛋白酶	5.5	50	/	1.6%	1:2	/	[37]
5				2	50	/	0.6%	1:20	/	
6				3	50	/	3.2%	1:3	/	
7		带鱼肉	木瓜蛋白酶 碱性蛋白酶	5 6	50 50	7.0 8.5	2% 2%	1:5	/	[38]
8		带鱼鱼糜	中性蛋白酶	12.1	44.74	/	1858.85 U/g	/	/	[40-41]
9		带鱼鱼糜	木瓜蛋白酶	8	35-40	6.5	20000 U/g	1:10	/	[30]
10	生长调节	带鱼副产物	胃蛋白酶	12	60	6.5	25000 U/g	1:8	/	[44]
11		带鱼鱼糜	木瓜蛋白酶	8	40	6.5	0.1%	1:3	/	[45]
12		带鱼副产物	风味蛋白酶+动物复合酶	/	40	7.0	6×10 ³ IU/100 mL	41:1000	/	[4]
13		带鱼	木瓜蛋白酶+胃蛋白酶	4.2	36.5	4.4	0.2%	1:10	32.64%	[9]
14	抗菌	带鱼	胃蛋白酶	/	35	3.5	0.2%	1:10	/	[16]
			木瓜蛋白酶	/	40	6.5	0.05%			
15		带鱼	碱性蛋白酶 木瓜蛋白酶	9 8	45 45	8.0 6.0	22000 U/g 22000 U/g	/ /	52.22%	[32]
16	抗疲劳	带鱼鱼糜	中性蛋白酶	/	44.7	6.5	/	1:4	/	[29]
17		带鱼鱼糜	木瓜蛋白酶	8	45	6.5	/	1:10	/	[59]
18	抗贫血	带鱼	碱性蛋白酶	8	40	7.0	0.1%	1:3	/	[31]
19		带鱼鱼糜	木瓜蛋白酶	8	40	7.0	/	1:5	/	[33]
20	降血糖	带鱼	风味蛋白酶	4.5	45	7.0	1.6%	1:3	/	[7]
21	降血压	带鱼脊骨	酸性蛋白酶	3	40	3.0	1%	1:2	/	[8]
22	降尿酸	带鱼肉	碱性蛋白酶	5	49	/	5000 U/g	1:3	21.9%	[22]
23	降血脂	带鱼副产物	中性蛋白酶+风味蛋白酶	/	50	7.0	0.1%	1:1	/	[65]
24	抗抑郁	冻干带鱼	胃蛋白酶	4	37	2.0	2400 U/g	1:20	/	[66]
			胰蛋白酶	4	37	7.5	300 U/g			

子螯合肽以其安全稳定、易吸收和高生物利用度等优势而备受关注^[27]。目前,带鱼源的金属离子螯合肽主要以亚铁离子螯合肽为主,常采用单酶-螯合法的酶解方式,并通常以木瓜蛋白酶为主要水解酶,制备了具有抑菌^[4]、抗贫血^[28]、抗疲劳^[29]和生长调节^[30]等活性的金属螯合肽。斯兴开等^[31]以带鱼为原料,FeCl₂为金属离子来源,采用木瓜蛋白酶水解制备了带鱼多肽亚铁螯合物 Fe-FPH,铁含量达 60.18 g/kg,研究表明,该促铁吸收肽效果优于 FeSO₄。肽的结构特征对螯合肽的形成有重要影响,林慧敏^[32]利用 RP-HPLC 分离得到了抑菌能力最强的肽段 HYD,并利用红外光谱结合 1H-NMR 推导出小肽亚铁螯合物的结合机制为:三肽上的两个-NH-和一个-NH₂与 Fe²⁺发生配位,两个三肽末端-COOH 上的-C=O 及-OH 与 Fe²⁺发生配位,形成不稳定结构的螯合物。袁宁等^[33]通过红外光谱发现 Fe²⁺与带鱼蛋白肽的螯合主要位点是羧酸酯基团,该活性肽中如谷氨酸、甘氨酸和组氨酸含量高。可以得出,不同的带鱼活性肽中氨基酸组成和结构不同,导致亚铁离子的螯合位置不一。

3 带鱼活性肽的功能特性

目前,已从带鱼及其副产物中提取并鉴定出多种生物活性肽,涵盖了抗氧化、生长调节、抗菌、降血糖、降血压等多种活性。带鱼生物活性肽的功能活性、肽序、分子量及活性评价见表 2。

3.1 抗氧化活性

氧化应激(OS)是指人体内氧化与抗氧化失衡的状态,通常是因为自身产生的抗氧化剂无法有效清除生成的活性自由基所致。这导致了 ROS 的积累,引发细胞代谢的氧化应激,破坏了人体的代谢平衡,进而加速了一些慢性疾病的发展,如心脏病、胃肠炎症、关节炎等^[34]。带鱼抗氧化肽通过清除机体内的 ROS 和自由基,干扰氧化链式反应,发挥了抗氧化的作用^[35]。带鱼抗氧化肽的活性与其分子量大小和序列中氨基酸组成存在一定的相关性^[36]。

分子量较低的带鱼抗氧化肽更容易穿过肠道屏障,被人体吸收,因此更有效地发挥抗氧化作用。厉望^[37]分析了制备的带鱼抗氧化酶解产物在不同抗氧化体系中的抗氧化能力,结果显示其对 DPPH 自由

表 2 带鱼活性肽的活性、理化性质及活性评价

Table 2 Activity, physicochemical properties and evaluation of the activity of active peptides from hairtail

活性	来源	肽序或分子量	活性评价	文献
抗氧化	带鱼	337~6007 Da	DPPH 自由基清除率 46.15%; OH 自由基清除率 75.65%; O ₂ ⁻ 自由基清除率 82.5%	[17]
	带鱼	/	DPPH 自由基清除率 60.72%±1.05%; OH 自由基清除率 58.17%±1.53%	[19]
	带鱼	/	DPPH 自由基清除率 60.13%; OH 自由基清除率 58.73%; ABTS ⁺ 自由基清除率 69.58%; O ₂ ⁻ 自由基清除率 47.31%	[37]
动物生长调节	带鱼肉	KA; 217.1 Da AKG; 274.1 Da IYG; 351.0 Da	DPPH 自由基清除率 53.45%±1.05%; OH 自由基清除率 48.76%±1.64%	[38]
	带鱼鱼糜	DLYANTVLSGGTTMYPGIADR; 2214.0627 Da	总抗氧化能力 29.7085±0.9226 U/mL	[40-41]
	带鱼鱼糜清洗水	<4 kDa	抗氧化能力 1.59 mmol/L FeSO ₄ 当量	[15]
抑菌	带鱼鱼糜	/	成活率、增重率、特定生长率提高; 肌肉组织弹性增强, 硬度加大, 品质增强	[30]
	带鱼副产物	/	成活率、增重率、特定生长率和肌肉指标值提高	[44]
	带鱼鱼糜	/	脂肪酶、超氧化物歧化酶、溶菌酶和丙二醛活性升高; 肠道菌群中乳酸杆菌和芽孢杆菌增加	[45]
抗疲劳	带鱼副产物	<2 kDa	大肠杆菌的抑菌圈直径为 14.1 mm; 金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径为 13.8 mm	[4]
	带鱼	/	对大肠杆菌抑菌率为 78.56%	[9]
	带鱼	HYD; <3 kDa	对金黄色葡萄球菌的最小抑菌浓度为 0.20 mg/mL; 最小杀菌浓度为 0.26 mg/mL	[32]
抗贫血	带鱼鱼糜	/	小鼠力竭游泳时间延长	[29]
	带鱼鱼糜	/	大鼠力竭游泳时间延长	[59]
降血糖	带鱼	/	血红蛋白含量、平均红细胞体积、血红蛋白分布 宽度和铁蛋白浓度增加	[31]
	带鱼鱼糜	/	贫血大鼠血红蛋白含量和红细胞数升高	[33]
降血压	带鱼	/	DPP-IV 抑制率为 96.97%	[7]
降尿酸	带鱼脊骨	<3000 u	ACE 抑制率 91.56%	[8]
降血脂	带鱼肉	<1 kDa	黄嘌呤氧化酶抑制率 52.03%	[22]
抗抑郁	带鱼副产物	/	抑制高血脂大鼠的 TC、TG、HDL 升高	[65]
	冻干带鱼	LPNSLYQQ、FEVFW、FADAME、LPNSLYQK	MAO-A 抑制活性为 71.97%±0.86%	[66]

基、OH 自由基、ABTS⁺ 自由基和 O₂⁻ 自由基均表现出清除效果, 其中小于 3 kDa 的组分具有最强的抗氧化活性, 进一步采用凝胶层析 Sephadex G-75 分离该组分发现带鱼抗氧化多肽分子量大约为 552 Da。丁东各^[19] 研究了带鱼酶解液中不同组分的抗氧化能力, 发现分子量小于 1 kDa 的组分表现出最佳的抗氧化活性。

带鱼抗氧化肽的氨基酸组成对其活性有一定的影响。YANG 等^[38] 从带鱼肌肉蛋白水解液中纯化得到的 8 条抗氧化肽, 其中疏水性氨基酸含量高的肽段表现出较强的清除 DPPH 自由基、OH 自由基和 ABTS⁺ 自由基的能力。这可能是由于疏水性氨基酸有利于多肽与脂溶性 ROS 的结合, 从而终止脂质过氧化作用, 同时疏水性高的抗氧化肽可能更容易穿过细胞膜进入细胞内部发挥抗氧化作用^[39]。WANG 等^[40-41] 对带鱼鱼糜制备的抗氧化肽进行氨基酸组成分析后发现谷氨酸、天冬氨酸和精氨酸含量较高, 带负电的氨基酸谷氨酸和天冬氨酸可能因其过剩的电子和作为氢供体的能力而具有抗氧化效应, 精氨酸可

能通过胍基基团向自由基提供电子并与自由基反应, 从而终止自由基链反应而显示抗氧化能力。综上所述, 带鱼抗氧化肽大多是小于 1 kDa 的小肽, 且大多含有谷氨酸、天冬氨酸和精氨酸等极性氨基酸, 极性带电氨基酸可以吸引带有异性电荷的自由基和金属离子, 赋予带鱼活性肽抗氧化能力^[42]。虽然有很多对于带鱼通过酶解制备抗氧化肽的研究, 但大多数未进行多肽的组成、结构分析, 对带鱼抗氧化肽的分离纯化、活性筛选及序列鉴定, 是今后重点研究方向。

在实际生产中, 投入更低的成本能够获得更高的产量, 增加经济效益。在带鱼抗氧化肽的研究中, 厉望^[37] 制备的抗氧化肽被证实对四种自由基均有较高的抑制作用, 且制备条件简单、省时、快捷, 未来在对多肽进行进一步的结构鉴定, 探索氨基酸序列和空间结构对活性的影响后, 具有开发制备抗氧化功能产品的潜力。

3.2 生长调节活性

带鱼活性肽能够与亚铁离子形成金属离子螯合肽, 其在提高机体繁殖和生长能力、增强抗病免疫

力,以及对生理代谢进行调节等方面发挥着重要作用^[43]。ZHANG 等^[44]的研究表明,在饲料中添加适量的带鱼亚铁螯合肽能够提高克氏原螯虾的生长性能和其他非特异性免疫酶活性,并且增强了克氏原螯虾对病原体、重金属、氮化合物和农药等外部污染物的防御能力。梁营芳等^[30]发现添加带鱼亚铁螯合肽的饲料显著提高了凡纳滨对虾的成活率、增重率和特定生长率,同时虾肌肉组织在弹性、硬度等品质方面得到提升,免疫相关指标也得到提高。LIN 等^[45]通过活体成像评估了异硫氰酸荧光素标记的带鱼亚铁螯合肽在泥鳅体内的分布,同时通过高通量测序检测了肠道微生物群落的变化,表明带鱼亚铁螯合肽提高了泥鳅的非特异性免疫水平,并改善其肠道健康。带鱼活性肽作为饲料添加剂改善动物的生理机能,这可能与活性肽在机体内的特殊转运和吸收的机制有关,酶解肽和金属螯合物一并吸收到特定的靶器官,增强机体的非特异性免疫能力,也提高了生物体对营养物质的利用效率,改善动物的生长性能。带鱼活性肽与亚铁离子的结合形成的金属离子螯合肽不仅为水产养殖和动物营养学领域提供了新的思路和方法,也为提升养殖业效率和动物整体健康水平提供了新的解决方案。

3.3 抗菌活性

抗菌肽有抗细菌^[46]、抗真菌^[47]和抗病毒^[48]等多种类型,一般具有两亲性和富含半胱氨酸的特点,主要通过膜渗透、非膜靶向和免疫调节等机制来发挥作用^[49]。目前,抗细菌肽研究较为深入,包括其制备工艺、活性影响因素以及对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌等的抑制机理。何定芬等^[9]以大肠杆菌为指示菌优化了舟山小带鱼抗菌肽的制备工艺,对大肠杆菌的抑菌率达到 44.48%,经进一步分离纯化后抑菌率上升至 78.56%。李远慧等^[16]探究了温度、pH、胰蛋白酶、 β -内酰胺酶、反复冻融和金属离子对带鱼蛋白抗菌肽抑菌效果的影响,结果显示带鱼蛋白抗菌肽在热稳定方面表现出较强的抗性,在 pH 为 4.8 时抑菌活性最高,抗菌肽的抗菌效力随着冻融次数的增多而下降,对 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 表现出较低的耐受性。

带鱼抗细菌肽的抑制机制有多种假设。霍健聪^[4]研究了带鱼活性肽亚铁螯合物对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌的影响,并分析了潜在的抑菌机理,其中一种假设是通过作用于革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌外膜表面形成内外连通的孔道,导致菌体细胞壁破裂,内容物外泄,最终导致细胞死亡;另一种机制是多肽亚铁螯合物与微生物竞争性结合铁元素,进而影响了微生物的正常生长繁殖。林慧敏^[32]分析了带鱼抗菌肽亚铁螯合物的抑菌活性,发现分子量小于 3 kDa 的组分表现出最强的抑菌活性,对金黄色葡萄球菌的抑制率为 91.3%,主要作用于金黄色葡萄球菌在对数生长期的菌体分裂。综上所述,带鱼来源的抗菌肽大

多为分子量小于 3 kDa 的小肽,且大多含有非极性、疏水性氨基酸,李海蓝等^[50]提出鱼源抗菌肽的抗菌机制大多是对细胞膜的作用,具有疏水氨基酸的肽段能通过典型的环孔模型与细胞膜作用而发挥抑菌作用。目前,对于带鱼抗菌肽研究仅停留在抑制大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等细菌方面,而对于真菌,病毒的研究较少,这就需要进一步研究带鱼活性肽的其他抗菌活性,并研究其结构与活性的关系和作用机制,为抗菌肽分子的改造和设计提供足够的理论依据。

3.4 抗疲劳活性

疲劳是一种常见的身体状况,包括身体疲劳和精神疲劳。疲劳可由剧烈的体育锻炼或脑力劳动引起,并与贫血、甲状腺功能障碍、早衰和抑郁等疾病有关^[51]。目前关于机体疲劳的假说有自由基理论^[52]、代谢物质堆积理论^[53]和能源耗尽理论^[54]等。抗疲劳肽被认为是延缓或消除疲劳的有效途径,其主要机制包括消除疲劳物质的积累,提高运动耐力,并促进机体迅速恢复体力^[55]。此外,抗疲劳肽还能通过调节人体炎症反应,参与并调节能量代谢,调节神经递质等途径来缓解疲劳^[56]。目前,对带鱼抗疲劳肽的主要评价方式为实验鼠运动实验结合抗氧化指标。WANG 等^[29]通过力竭游泳实验来评估带鱼水解液的抗疲劳性能,结果显示带鱼抗疲劳肽的补充延长了小鼠的力竭负重游泳时间,提高了肝糖原和肌糖原水平,降低了乳酸、尿素氮和肌酸激酶水平,也降低了丙二醛的含量。同时对小鼠粪便短链脂肪酸分析表明,肠道短链脂肪酸的增加可能有助于小鼠的抗疲劳作用,这可能与短链脂肪酸修复肠道损伤^[57]、参与器官能量代谢^[58]有关。HUANG 等^[59]利用带鱼鱼糜酶解液螯合亚铁离子制备了带鱼抗疲劳肽,通过大鼠强制游泳实验后发现饲喂带鱼抗疲劳肽的大鼠有更高的血红蛋白再生效率,更长的力竭游泳时间和更高的超氧化物歧化酶活性,血乳酸和丙二醛含量也更低。以上研究说明带鱼抗疲劳肽的作用机制是多方面的,可能涉及到能量代谢、肌肉疲劳、抗氧化和调节肠道环境等多个方面的调节作用。

3.5 抗贫血活性

缺铁性贫血(iron deficiency anemia)是指由于体内合成血红蛋白所需的贮存铁不足或利用障碍,导致血红蛋白合成减少,进而形成的一种小细胞低色素性贫血。该疾病遍及全球,是发达国家中唯一常见的营养缺乏症,也是发展中国家中最为普遍的贫血类型。患病率在发展中国家、经济不发达地区、以及婴幼儿和育龄妇女中尤为显著^[60]。目前的研究表明利用带鱼生物活性肽作为铁螯合剂制备螯合物的方法,可以提高铁的生物利用度^[61-62]。袁宁等^[33]以带鱼蛋白酶解肽作为铁螯合剂,以 $FeCl_2$ 为铁源制备出带鱼蛋白亚铁螯合肽 $Fe(II)$ -FPH,以缺铁性贫血大鼠为对象来研究 $Fe(II)$ -FPH 的抗贫血功效,并对 $Fe(II)$ -FPH 进行了急性毒性实验、小鼠骨髓微核实验、小

鼠精子畸形试验和体外哺乳动物细胞染色体畸变试验,证实带鱼蛋白亚铁螯合肽具有抗贫血的功能,且食品安全性良好。LIN等^[28]进一步研究了Fe(II)-FPH其在贫血模型大鼠中的抗贫血机制,发现该产物对大鼠的血红蛋白、平均红细胞体积、血红蛋白分布宽度和铁蛋白浓度有积极影响,并能改善大鼠肠道菌群和炎症反应,促进肠道内铁的溶解和释放并增加肠道上皮细胞对铁的吸收。活性肽的氨基酸组成是其能否与金属螯合的重要因素之一,据报道某些氨基酸如谷氨酸、甘氨酸和组氨酸与Fe²⁺的亲合力明显高于其他氨基酸^[63],在带鱼活性肽亚铁螯合物中,谷氨酸、甘氨酸、亮氨酸和组氨酸这四种氨基酸的含量居多,这可能是带鱼活性肽与Fe²⁺的螯合能力较高,具有较好的抗贫血功能的原因之一。

3.6 其他活性

除上述提到的活性外,带鱼降血压肽、降血糖肽、降尿酸肽、降血脂肽和抗抑郁肽等也得到了研究。王金玲等^[8,64]以酸性蛋白酶水解带鱼脊骨获得了具有降血压活性的酶解液,其中分子量小于3 kDa的组分表现出最强的降血压活性,其IC₅₀为0.727 mg/mL,该带鱼脊骨ACE抑制肽降低了原发性高血压大鼠的血压,展现出了体内降血压效果。靳挺等^[7]利用风味蛋白酶水解带鱼蛋白制备了具有降血糖活性的带鱼二肽基肽酶IV(DPP-IV)抑制肽。马洁等^[22]采用超声辅助酶法制备具有降尿酸活性的带鱼活性肽,黄嘌呤氧化酶抑制率为52.03%、鹅肌肽和肌肽含量为0.66%和0.15%。谢超等^[65]利用中性蛋白酶和风味蛋白酶混合水解带鱼副产物得到氨基态氮含量为1.5 g/L的水解物,该水解物具有降低大鼠总胆固醇、甘油三酯和高密度脂蛋白胆固醇的作用。杨小雪^[66]通过体外模拟胃肠道消化得到带鱼单胺氧化酶A(MAO-A)抑制肽,利用分子对接技术筛选得到VFEVFW、LPNSLYQQ、LPNSLYQK和FADAME四条多肽,通过构建SH-SY5Y细胞应激模型,发现这四条多肽可以缓解地塞米松诱导引起的细胞损伤,同时上调了与神经可塑性相关以及抑郁相关的蛋白BDNF/CREB/Bcl-2 mRNA的表达水平,表现出潜在的抗抑郁作用。

4 结语和展望

本文综述了带鱼活性肽的制备和功能活性研究的最新进展,着重介绍了其酶解制备工艺及其生物活性(抗氧化活性、生长调节活性、抗菌活性和抗疲劳活性等),为后续带鱼活性肽研究开发提供参考。我国丰富的带鱼资源为带鱼活性肽的开发和研究提供了广阔的空间。对带鱼活性肽功能活性的深入研究,不仅可以提高带鱼资源的综合利用率,同时也为预防和治疗某些疾病提供了科学依据,具有开发为功能性食品的潜力。通过不断拓展研究领域和采用创新技术手段,可以更全面、深入地认识带鱼活性肽的潜在价值,为其在医药和保健品领域的应用打下坚实

基础。

但目前对于带鱼活性肽的研究还有一定的不足和局限性,例如,目前关于带鱼活性肽的研究主要集中在制备、纯化及活性评价上,而未在分子层面阐明构效关系。此外,活性肽的食品安全性未得到充分的验证,要在市场上生产及应用还需要评价其毒性和致敏性等指标。未来的研究方向可以侧重于以下几个方面:首先,结合现代科技手段,如基因编辑和分子模拟,可以更精准地设计和优化活性肽的结构,提高其生物利用度和稳定性;其次,继续探索优化带鱼活性肽的制备工艺和辅助技术,挖掘带鱼活性肽的加工专用酶,分析酶的催化机制,为实现特定结构和序列的多肽加工提供核心工具;另外,带鱼活性肽的结构修饰和生物制造也是重要的研究方向,突破活性肽传统制备方法存在的耗时且鉴定难度大的技术瓶颈;最后,加强对带鱼活性肽在体内的活性验证,通过临床实验和动物模型研究,确保其安全性和有效性,这将为未来将带鱼活性肽应用于人类健康管理提供更加可靠的科学依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 马明珠,周宇芳,缪文华,等.傅里叶变换红外光谱法鉴别不同产地带鱼[J].食品安全质量检测学报,2022,13(21):6932-6938. [MA M Z, ZHOU Y F, MOU W H, et al. Identification of *trichiurus haumela* from different origins by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(21): 6932-6938.]
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴[M].中国农业出版社,2023:39. [Fisheries and fisheries administration of the ministry of agriculture and rural affairs. China fishery statistical yearbook[M]. China Agriculture Press, 2023: 39.]
- [3] 李佳蔚,丁玉竹,薛敬林,等.莱州湾6种海水鱼肌肉营养成分与健康评价[J].食品工业,2023,44(11):319-322. [LI J W, DING Y Z, XUE J L, et al. Muscle nutrients and health evaluation of six species of marine fish in Laizhou bay[J]. The Food Industry, 2023, 44(11): 319-322.]
- [4] 霍健聪.带鱼下脚料蛋白酶水解物亚铁螯合修饰及其抗菌机理研究[D].重庆:西南大学,2010. [HUO J C. Study on ferrous chelating modification of *trichiurus haumela* offal hydrolysate by enzymolysis and research for antibacterial mechanism[D]. Chongqing: Southwest University, 2010.]
- [5] 陈佳琪,陆晓丹,沈熠杰,等.超声辅助制备带鱼副产物糖蛋白工艺优化[J].食品研究与开发,2023,44(2):73-79. [CHEN J Q, LU X D, SHEN Y J, et al. Optimization of ultrasonic-assisted preparation of glycoprotein from hairtail by-products[J]. Food Research and Development, 2023, 44(2): 73-79.]
- [6] LIN H M, DENG S G, HUANG S B. Antioxidant activities of ferrous-chelating peptides isolated from five types of low-value fish protein hydrolysates[J]. Journal of Food Biochemistry, 2014, 38(6): 627-633.
- [7] 靳挺,武玉学,刘春平.带鱼蛋白水解液抑制二肽基肽酶

- IV 活性的研究[J]. 中国食品学报, 2016, 16(9): 48-52. [JIN T, WU Y X, LIU C P. Research on inhibition of DPP-IV by hydrolysates of hairtail[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(9): 48-52.]
- [8] 王金玲, 何国庆. 酶解法制备带鱼脊骨降血压肽及其降血压效果[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(4): 54-58. [WANG J L, HE G Q. Study on aceip production by enzyme hydrolysis from ribbonfish (*Trichiurus haumela*) backbone and its anti-hypertensive activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(4): 54-58.]
- [9] 何定芬, 郑霖波, 周英杰, 等. 响应面法优化舟山小带鱼蛋白抗菌肽制备工艺及其抑菌效果分析[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(10): 141-147. [HE D F, ZHENG L B, ZHOU Y J, et al. Optimization of preparation process and antibacterial effect of Zhoushan small hairtail protein antibacterial peptide by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2020, 41(10): 141-147.]
- [10] 王耀冉, 陈明杰, 李治平, 等. 生物活性肽制备、鉴定及其生物活性研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(12): 349-354. [WANG Y R, CHEN M J, LI Z P, et al. Research progress on preparation, identification and biological activity of bioactive peptides[J]. The Food Industry, 2021, 42(12): 349-354.]
- [11] 方磊, 李治光, 陈亮, 等. 小麦低聚肽营养成分和特征功能肽段研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 178-182. [FANG L, LI Y G, CHEN L, et al. Study on nutritional components and characteristic functional peptides of wheat oligopeptides[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(11): 178-182.]
- [12] 王思怡, 杨晰茗, 王震宇, 等. 肽锌络合物促锌吸收机制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(19): 172-179. [WANG S Y, YANG X M, WANG Z Y, et al. Progress in zinc absorption mechanism of peptide-zinc complex[J]. Food Research and Development, 2023, 44(19): 172-179.]
- [13] MINKIEWICZ, IWANIAK, DAREWICZ. BIOPEP-UWM database of bioactive peptides: current opportunities[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(23): 5978.
- [14] 惠珍珍, 李娜, 王晓莹, 等. 文蛤免疫活性肽酶解条件的优化及其活性研究[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 161-169. [HUI Z Z, LI N, WANG X X, et al. Studies on optimization of enzymatic hydrolysis conditions of immunoactive peptides from *Meretrix meretrix* linnaeus and it's activity[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(11): 161-169.]
- [15] ZHOU Q W, DING H C, LI D F, et al. Antioxidant activity of enzymatic hydrolysate derived from hairtail surimi wash water using an immobilized chymotrypsin-trypsin column reactor: Protein recovery from hairtail surimi wash water[J]. Journal of Food Biochemistry, 2016, 40(1): 39-46.
- [16] 李远慧, 郑霖波, 谢超, 等. 带鱼蛋白抗菌肽抑菌效果的影响因素[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(20): 66-72. [LI Y H, ZHENG L B, XIE C, et al. Factors influencing antibacterial activity of hairtail protein antimicrobial peptide[J]. Food Research and Development, 2022, 43(20): 66-72.]
- [17] JIN T, WU Y X. Antioxidant activities of protein hydrolysates from little hairtail (*Trichiurus haumela*) of east China sea[J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2015, 7(5): 354-360.
- [18] 杨静. 鸭血浆蛋白抗氧化肽的分离鉴定及作用机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2023. [YANG J. Study on the identification and mechanism of duck plasma antioxidant peptides[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2023.]
- [19] 丁冬各. 带鱼抗氧化肽和高 F 值寡肽制备工艺研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019. [DING D G. Studies on the preparation and purification of antioxidant-peptide and high fischer ratio oligopeptide from hairtail[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019.]
- [20] 郭元新, 郭宇, 朱凤, 等. 微波联合金属离子对麦胚中肽的富集研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 217-223. [GUO Y X, GUO Y, ZHU F, et al. Study on the enrichment of peptides in wheat germ by microwave combined with metal ions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 217-223.]
- [21] HUANG Y, RUAN G, QIN Z, et al. Antioxidant activity measurement and potential antioxidant peptides exploration from hydrolysates of novel continuous microwave-assisted enzymolysis of the *Scomberomorus nipponius* protein[J]. Food Chemistry, 2017, 223: 89-95.
- [22] 马洁, 胡宇, 王得发, 等. 带鱼黄嘌呤氧化酶抑制肽制备及工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(6): 285-294. [MA J, HU Y, WANG D F, et al. Preparation and process optimization of xanthine oxidase inhibitory peptide from *Trichiurus lepturus*[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(6): 285-294.]
- [23] 李雪芬, 杜斌, 丁轲, 等. 金属螯合肽分离纯化及其抗氧化活性的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2016, 22(3): 35-39. [LI X F, DU B, DING K, et al. Research progress of separation and purification of metal chelating peptides and antioxidant activity[J]. Food and Nutrition in China, 2016, 22(3): 35-39.]
- [24] 苑晴晴, 罗琴, 何凯鑫, 等. 肽钙螯合物的研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2023, 30(2): 24-26. [YUAN Q Q, LUO Q, HE K X, et al. Progress of calcium chelate of microalgal peptide[J]. Cereal and Food Industry, 2023, 30(2): 24-26.]
- [25] 慈傲特, 王彪, 何玮, 等. 亚铁离子螯合肽的研究进展[J]. 云南化工, 2023, 50(12): 1-5. [CI A T, WANG B, HE W, et al. Research progress in ferrous ion chelating peptides[J]. Yunnan Chemical Technology, 2023, 50(12): 1-5.]
- [26] 刘晶晶, 徐蕴桃, 林秋逸, 等. 锌离子螯合修饰河蚬抗氧化肽的工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 148-152. [LIU J J, XU Y T, LIN Q Y, et al. Technology of antioxidant peptides from *Corbicula fluminea* modified by zinc ion[J]. The Food Industry, 2019, 40(5): 148-152.]
- [27] 刘凌云. 国内外多肽金属离子螯合物的研究进展[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(8): 32-34. [LIU L Y. Research progress in peptide metal ion chelates at home and abroad[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, 49(8): 32-34.]
- [28] LIN H M, DENG S G, HUANG S B, et al. The effect of ferrous-chelating hairtail peptides on iron deficiency and intestinal flora in rats: Anti-anemia activities of Fe(II)-FPH[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(8): 2839-2844.
- [29] WANG P, ZENG H, LIN S, et al. Anti-fatigue activities of hairtail (*Trichiurus lepturus*) hydrolysate in an endurance swimming mice model[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 74: 104207.
- [30] 梁芳芳, 林慧敏, 石芸洁, 等. 带鱼酶解蛋白亚铁螯合肽对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)生长、免疫及品质的影响[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(6): 1257-1262. [LIANG Y F, LIN H M, SHI Y J, et al. Effects of hairtail protein ferrous chelating peptide feed on growth, immune performance, and quality characteristics of *litopenaeus vannamei*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(6): 1257-1262.]
- [31] 斯兴开, 黄赛博, 林慧敏, 等. 带鱼酶解肽亚铁螯合物对贫血大鼠的治疗效果[J]. 中国食品学报, 2017, 17(5): 18-24. [SI X K, HUANG S B, LIN H M, et al. Therapeutic effects of ferrous

- chelates including hairtail protein hydrolysates on iron deficiency anemia in rats[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(5): 18–24.]
- [32] 林慧敏. 带鱼下脚料酶解小肽亚铁螯合物结构鉴定及其生物活性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012. [LIN H M. Study on structure identification and biological activity of enzymolyzed hairtail and ferrous chelated small peptides[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.]
- [33] 袁宁, 林慧敏, 邓尚贵, 等. 带鱼蛋白亚铁螯合肽抗贫血活性及安全性评价[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(11): 274–279. [YUAN N, LIN H M, DENG S G, et al. Safety evaluation and anti-anemia effect of hairtail protein ferrous-chelating peptide in mice[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(11): 274–279.]
- [34] YANG S, LIAN G. ROS and diseases: Role in metabolism and energy supply[J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2020, 467(1-2): 1–12.
- [35] AKBARIAN M, KHANI A, EGHBALPOUR S, et al. Bioactive peptides: Synthesis, sources, applications, and proposed mechanisms of action[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(3): 1445.
- [36] 郑淋. 抗氧化肽的构效关系及定向制备的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016. [ZHENG L. Structure-activity relationship and directional preparation of antioxidant peptide[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.]
- [37] 厉望. 带鱼蛋白酶解制备抗氧化活性肽的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. [LI W. Preparation of antioxidant peptides derived from hairtail protein[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.]
- [38] YANG X R, ZHANG L, DING D G, et al. Preparation, Identification, and activity evaluation of eight antioxidant peptides from protein hydrolysate of hairtail (*Trichiurus japonicus*) muscle[J]. *Marine Drugs*, 2019, 17(1): 23.
- [39] OLIVEIRA D, BERNARDI D, DRUMMOND F, et al. Potential use of tuna (*Thunnus albacares*) by-product: Production of antioxidant peptides and recovery of unsaturated fatty acids from tuna head[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2017, 13(7): 20150365.
- [40] WANG P, ZHANG J, TANG Y, et al. Purification and characterization of antioxidant peptides from hairtail surimi hydrolysates and their effects on beef color stability[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(7): 2898–2909.
- [41] WANG P, LIN Y, WU H, et al. Preparation of antioxidant peptides from hairtail surimi using hydrolysis and evaluation of its antioxidant stability[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 40(4): 945–955.
- [42] 左依瑾, 于子淇, 申雪晴, 等. 鱼源抗氧化肽的结构与其功能关系研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(14): 419–429. [ZUO Y J, YU Z Q, SHEN X Q, et al. Recent advance on the structure-activity relationship in antioxidant peptides of fish[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(14): 419–429.]
- [43] MIAO J, LIN H, ZHANG S, et al. Effect on amino acid and mineral content of the loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) by adding Fe (II) chelating hairtail protein hydrolysates (Fe (II)-HPH) to the feed[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(3): 1575–1582.
- [44] ZHANG B, SHI Z, WANG X, et al. The effects of hairtail protein hydrolysate-Fe²⁺ complexes on growth and non-specific immune response of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. *Aquaculture International*, 2016, 24(4): 1039–1048.
- [45] LIN H M, ZENG C, SHUI S S, et al. Effects of Fe (II)-chelating hairtail protein hydrolysates on the immune characteristics and intestinal microorganisms in loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 19: 100630.
- [46] ZHAO Q, SHI Y, WANG X, et al. Characterization of a novel antimicrobial peptide from buffalo casein hydrolysate based on live bacteria adsorption[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(12): 11116–11128.
- [47] WANG Y, ZHANG Y, LEE W, et al. Novel peptides from skins of amphibians showed broad-spectrum antimicrobial activities[J]. *Chemical Biology & Drug Design*, 2016, 87(3): 419–424.
- [48] STEWART J, SHAWON J, ALI M A, et al. Antiviral peptides inhibiting the main protease of SARS-CoV-2 investigated by computational screening and *in vitro* protease assay[J]. *Journal of Peptide Science*, 2024, 30(4): e3553.
- [49] RODRÍGUEZ A A, OTERO-GONZÁLEZ A, GHATTAS M, et al. Discovery, optimization, and clinical application of natural antimicrobial peptides[J]. *Biomedicines*, 2021, 9(10): 1381.
- [50] 李海蓝, 陈亚楠, 刘文博, 等. 鱼类低值副产物制备抗菌肽研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(23): 191–197. [LI H L, CHEN Y N, LIU W B, et al. Reviews on preparation of antimicrobial peptides from fish low-valued by-products[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(23): 191–197.]
- [51] KANG N, KIM S Y, RHO S, et al. Anti-fatigue activity of a mixture of seahorse (*Hippocampus abdominalis*) hydrolysate and red ginseng[J]. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017, 20(1): 3.
- [52] LAMOU B, TAIWE G S, HAMADOU A, et al. Antioxidant and antifatigue properties of the aqueous extract of *Moringa oleifera* in rats subjected to forced swimming endurance test[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016, 2016: 1–9.
- [53] WANG X, XING R, CHEN Z, et al. Effect and mechanism of mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) peptides for anti-fatigue[J]. *Food & Function*, 2014, 5(9): 2113.
- [54] JIN H M, WEI P. Anti-fatigue properties of tartary buckwheat extracts in mice[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2011, 12(8): 4770–4780.
- [55] 王培鑫, 陈悦宇, 王睿, 等. 抗疲劳肽的研究进展[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2019, 48(3): 273–284. [WANG P X, CHEN Y Y, WANG R, et al. The research progress of anti-fatigue peptides[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2019, 48(3): 273–284.]
- [56] 沈畅华, 张远红, 曾晓房. 植物源抗疲劳肽的研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(8): 8–11, 15. [SHEN C H, ZHANG Y H, ZENG X F. Research progress on plant-derived anti-fatigue peptides[J]. *Cereals and Oils*, 2022, 35(8): 8–11, 15.]
- [57] FANG H, LI H, CHEN Y, et al. Bifidobacterium breve CCFM1310 enhances immunity in immunosuppressed mice via modulating immune response and gut microbiota[J]. *Food Bioscience*, 2024, 59: 104058.
- [58] ZHANG X, WANG D, ZHENG Y, et al. Sex-dependent effects on the gut microbiota and host metabolome in type 1 diabetic mice[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Basis of Disease*, 2021, 1867(12): 166266.
- [59] HUANG S, LIN H, DENG S. Study of Anti-fatigue effect in rats of ferrous chelates including hairtail protein hydrolysates[J]. *Nutrients*, 2015, 7(12): 9860–9871.
- [60] 管玲娟. 阿胶肽铁螯合物调控缺铁性贫血小鼠肠道炎症的作用及其微胶囊化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [GUAN L J. Effects of ejiao peptide-iron chelate on intestinal inflammation in

- mice with iron deficiency anemia and its microencapsulation[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
- [61] 李博. 鸭蛋蛋清肽-亚铁整合物的制备及抗缺铁性贫血研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. [LI B. Study on preparation of duck egg white peptide-ferrous chelate and its effect on ameliorating iron deficiency anemia[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.]
- [62] WU H, LIU Z, ZHAO Y, et al. Enzymatic preparation and characterization of iron-chelating peptides from anchovy (*Engraulis japonicus*) muscle protein[J]. *Food Research International*, 2012, 48(2): 435-441.
- [63] ABDEL RAHMAN L H, EL KHATIB R M, NASSR L A E, et al. Metal based pharmacologically active agents: Synthesis, structural characterization, molecular modeling, CT-DNA binding studies and *in vitro* antimicrobial screening of iron (II) bromosalicylidene amino acid chelates[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, 117: 366-378.
- [64] 王金玲, 李恒星, 董晓美, 等. 酶解法生产降血压肽的水产蛋白原料筛选研究[J]. *中国食品学报*, 2009, 9(3): 111-116. [WANG J L, LI H X, DONG X M, et al. Screening of aquatic protein material for ACEIIP producing by enzyme hydrolysis[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2009, 9(3): 111-116.]
- [65] 谢超, 邓尚贵, 夏松养, 等. 带鱼(*Trichiurus lepturus*)下脚料蛋白水解物的成分分析及抗高血脂功效的研究[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(3): 307-312. [XIE C, DENG S G, XIA S Y, et al. Nutritional ingredient and antihyperlipidemia action of protein hydrolysates from hairtail (*Trichiurus lepturus*) waste[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(3): 307-312.]
- [66] 杨小雪. 带鱼多肽的 MAO-A 抑制活性及其抗抑郁机理的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023. [YANG X X. Study on the MAO-A inhibitory activity of hairtail peptides and their antidepressant mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.]