DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260205002
引用格式: 崔娥玲, 许运鹏, 信雨林, 等. 鱼类加工副产物来源抗氧化肽的制备、构效关系及食品应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 1–10.
CUI EL, XU YP, XIN YL, *et al*. Research progress on preparation, structure-activity relationship and food application of antioxidant peptides derived from fish processing by-products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 1–10. (in Chinese with English abstract).

鱼类加工副产物来源抗氧化肽的制备、构效关系及食品应用研究进展

崔娥玲, 许运鹏, 信雨林, 于基成*
(大连民族大学生命科学学院, 大连 116000)

摘 要: 鱼类加工副产物富含胶原蛋白、肌原纤维蛋白及多种内源性酶, 是制备天然抗氧化肽的重要蛋白资源。近年来, 相关研究更加重视制备过程对肽段结构和抗氧化活性的影响, 并逐步将活性评价延伸至食品基质。本文围绕原料特征、制备技术、构效关系和食品应用, 综述鱼皮、鱼鳞、鱼骨、鱼头、内脏及鱼鳔等副产物来源抗氧化肽的研究现状, 重点分析酶解、微生物发酵和超声辅助酶解对肽段分子量分布、活性残基暴露及序列组成的影响, 并从分子量、氨基酸组成、序列位置、二级结构和食品界面作用等方面归纳其构效关系。综上, 本文为鱼类加工副产物的高值化利用、抗氧化肽的定向制备以及其在食品抗氧化和保鲜中的应用提供理论依据。

关键词: 鱼类副产物; 抗氧化肽; 酶解; 构效关系; 食品保鲜

Research progress on preparation, structure-activity relationship and food application of antioxidant peptides derived from fish processing by-products

CUI E-Ling, XU Yun-Peng, XIN Yu-Lin, YU Ji-Cheng*
(*College of Life Science*, *Dalian Minzu University*, *Dalian* 116000, *China*)

ABSTRACT: Fish processing by-products are rich in collagen, myofibrillar proteins and endogenous enzymes, and are valuable protein resources for the preparation of natural antioxidant peptides. Recent studies have paid increasing attention to the effects of preparation processes on peptide structure and antioxidant activity, and have extended activity evaluation to food matrices. This review summarized the research progress of antioxidant peptides derived from fish skin, scales, bones, heads, viscera and swim bladders, with emphasis on the effects of enzymatic hydrolysis, microbial fermentation and ultrasound-assisted hydrolysis on molecular weight distribution, exposured of active residues and peptide sequence composition. The structure-activity relationships were discussed in terms of molecular

收稿日期: 2026-02-05
基金项目: 辽宁省科技厅重点研发项目(2024JH2/102500008); 辽宁省教育厅基础科研项目(LJ222412026014)
第一作者: 崔娥玲(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品生物工程。E-mail: elingcui@gmai.com
***通信作者:** 于基成(1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: yujc@dlnu.edu.cn

weight, amino acid composition, sequence position, secondary structure and interfacial action in food systems. In summary, this review provides a theoretical basis for the high-value utilization of fish processing by-products, the targeted preparation of antioxidant peptides, and their applications in food antioxidation and preservation.

KEY WORDS: fish by-products; antioxidant peptides; enzymatic hydrolysis; structure–activity relationship; food preservation

0 引 言

活性氧(reactive oxygen species, ROS)在适量条件下参与细胞信号传递，但当其生成量超过机体或食品体系的清除能力时，可诱导脂质过氧化、蛋白质氧化和核酸损伤，并进一步引起品质劣变或生理功能异常[1]。传统合成抗氧化剂具有成本低、效率高等优势，但其安全性和消费者接受度受到持续关注。与之相比，食源性抗氧化肽可通过供氢、供电子、金属螯合和调节内源性抗氧化防御等方式发挥作用，具有天然来源、结构可调和生物相容性较好等特点[2]。

鱼类加工副产物是水产资源高值化利用中较具代表性的蛋白质来源。近年来，鱼蛋白水解物不仅被视为营养补充成分，也被用于开发具有抗氧化、降血压、抗炎、乳化稳定和活性包装功能的食品配料[3]。联合国粮农组织在《世界渔业和水产养殖状况 2024》中提出，应提高水产资源综合利用水平[4]。因此，将鱼皮、鱼鳞、鱼骨、鱼头、内脏和鱼鳔等副产物定向转化为抗氧化肽，既符合水产加工绿色利用要求，也为天然抗氧化因子的开发提供了原料基础。

近 3~5 年的研究表明，鱼类副产物抗氧化肽研究已不再局限于活性筛选，而是更加关注制备条件、肽段结构和食品应用效果之间的关系[5−6]。现有综述多从资源、提取、纯化或生物活性角度展开[7−9]，对制备条件如何影响肽段结构、结构差异如何决定抗氧化效应，以及体外活性如何在实际食品基质中体现等问题仍讨论不足。鱼类副产物抗氧化肽的研究通常包括原料选择、制备提取、分离鉴定、构效关系分析及食品应用评价等环节，其整体研究框架如图 1 所示。基于此，本文重点综述制备调控、构效机制及其在食品保鲜、脂质氧化抑制和活性包装中的应用进展，为鱼类副产物抗氧化肽的制备和食品化利用提供参考。

1 鱼类加工副产物类型与原料特征

鱼类加工副产物的组成受鱼种、规格、加工方式及产品类型影响明显，通常包括鱼皮、鱼鳞、鱼骨、鱼头、内脏、鱼鳔和鱼片修整残余等。与单纯以“废弃物”处理不同，这些组织含有胶原蛋白、肌浆蛋白、肌原纤维蛋白、酶类、矿物质和少量脂质，是制备生物活性肽的重要底物[10]。从近年研究看，鱼类副产物来源抗氧化肽的开发价值不仅体现在原料量大，更体现在不同组织蛋白组成差异可提供不同的酶切位点和序列来源。



图 1 鱼类加工副产物抗氧化肽的制备、分离与鉴定技术

Fig.1 Preparation, separation and identification technology of antioxidant peptides from fish processing by-products

根据组织组成、蛋白类型和酶切特征差异，鱼类副产物可归纳为两类：一类是以鱼皮、鱼鳞、鱼骨为代表的胶原基结构性组织，主要提供甘氨酸-X-Y 重复序列(glycine-X-Y motif, Gly-X-Y motif)等胶原特征序列；另一类是以内脏、鱼头、鱼尾和鱼鳔为代表的复杂器官组织，通常含有更多肌肉蛋白、膜蛋白及内源性蛋白酶体系。两类原料在蛋白可及性、肽段组成、前处理需求和抗氧化作用方式上存在差异，是影响后续制备效率和功能表现的重要基础。

在原料评价中，还应区分“蛋白含量高”和“适宜制备抗氧化肽”两个概念。前者强调资源量，后者还涉及蛋白质构象、交联程度、脂质含量、灰分、酶切可及性及潜在安全风险。例如，鱼鳞和鱼骨虽然胶原资源丰富，但矿物质含量较高，若脱矿不足会影响蛋白溶出和酶解均一性；鱼内脏蛋白更易水解，但脂质氧化、异味和微生物风险也更突出。因而，原料筛选应以蛋白回收率、特征肽产率、安全性和后续食品适配性为综合指标。

1.1　胶原基结构性组织原料

鱼皮是鱼类加工中较典型的胶原蛋白来源, 通常富含 I 型胶原和明胶, 经过适当脱脂、溶胀和酶解后可释放低分子量肽段。在鱼皮研究中, 巴沙鱼、鲟鱼、虹鳟等原料常被用于制备胶原肽, 其中低分子量组分的 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical, DPPH)自由基、2,2'-联氮基双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) radical, ABTS]阳离子自由基以及 Trolox 当量抗氧化能力(trolox equivalent antioxidant capacity, TEAC)结果普遍优于未水解蛋白, 提示胶原蛋白从大分子纤维结构转化为短肽后, 活性残基的可及性显著增加[11–12]。此外, 尾斑光鳃鱼鱼皮副产物来源肽还被报道具有抗氧化和抗菌等活性[13], 表明鱼皮来源活性肽不仅具有自由基清除能力, 还可能在食品保鲜中发挥抑菌与抗氧化协同作用。近年研究也持续关注鱼副产物来源活性肽作为天然食品功能配料的应用潜力[14]。

鱼鳞和鱼骨同样以胶原蛋白和无机矿物为主要特征, 但其前处理要求高于鱼皮。鱼鳞含有 I 型胶原与羟基磷灰石, 脱矿过程会影响胶原溶出和后续酶解效率[15]。鲢鱼鳞胶原肽、草鱼鳞明胶肽等研究显示, 小分子组分不仅能提高自由基清除率, 还可在人肝癌细胞(human hepatocellular carcinoma cell line, HepG2)模型中降低活性氧和丙二醛(malondialdehyde, MDA)水平, 并增强超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)或谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)活性[16–17]。鱼骨则兼具胶原蛋白与生物钙来源双重价值, 鲟鱼骨和金枪鱼骨经响应面优化、挤压预处理或双酶酶解后, 可获得具有显著自由基清除能力的肽段[18–19]。

总体而言, 胶原基组织的优势在于来源稳定、胶原含量高和可形成特征性低分子肽; 不足在于鱼鳞、鱼骨需要脱矿, 鱼皮需要脱脂, 且胶原序列相对重复。若仅依赖常规体外自由基清除实验, 难以充分说明不同原料的功能差异。因此, 后续研究应结合肽段序列、二级结构和食品脂质氧化模型评价其应用价值。

1.2　非胶原基复杂器官组织

与胶原基组织相比, 鱼内脏、鱼头、鱼尾和鱼鳔等组织的蛋白组成更复杂, 既含有肌原纤维蛋白和结缔组织蛋白, 也可能携带内源性蛋白酶、脂质氧化底物和矿物质。复杂组成提高了活性肽序列多样性, 也增加了风味、安全性和批次稳定性控制难度。安康鱼鱼鳔来源肽 QDYD、ARW、YPAGP 等被报道可降低细胞内 ROS, 并调节腺苷酸活化蛋白激酶/核因子 E2 相关因子 2 (AMP-activated protein kinase/nuclear factor erythroid 2-related factor 2, AMPK/Nrf2)相关通路[20]; 虹鳟内脏蛋白水解物中低分子量组分也显示出较强自由基清除能力[21]。

我国学者对太平洋褶柔鱼内脏蛋白肽的研究表明, 该类肽对 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基、羟自由基和超氧阴离子均具有一定清除能力, 并在一定温度和 pH 范围内保持较好稳定性[22]。此外, 黄鳍金枪鱼尾、石斑鱼头骨和金枪鱼头等副产物可通过组分分离、蛋白酶制备、明胶提取和酶解联用实现全组分利用, 进一步体现了复杂副产物的生物炼制价值[23–25]。

因此, 非胶原基复杂组织更适合筛选序列多样、作用靶点多元的抗氧化肽, 但其开发价值应与脂质氧化副产物、生物胺、重金属、腥味及过敏原风险等安全性因素同步评价。对于食品应用而言, 复杂组织来源肽的可控性和安全性评价应与抗氧化活性评价同步开展(表 1)。

2　抗氧化肽的制备、分离与鉴定技术

鱼类副产物抗氧化肽的获得通常包括前处理、蛋白释放或富集、定向水解、分离纯化、序列鉴定和活性验证等步骤。近年研究表明, 制备技术并非孤立环节, 而是通过改变底物结构、酶切位点暴露、水解度和分子量分布, 进一步影响抗氧化肽的构效关系。

表 1　不同副产物来源抗氧化肽的代表研究

Table 1　Representative studies of antioxidant peptides derived from different by-products

副产物来源	代表原料	核心制备/分离方式	主要结构或活性特征	文献
鱼皮	巴沙鱼、鲟鱼、虹鳟	酶解、超滤、反相高效液相色谱法	低分子胶原肽活性较强; GDRGESGPA 等肽段具有 DPPH 清除能力	[11–12]
鱼鳞	沙丁鱼、鲢鱼、草鱼	酸/酶法提取、脱矿、超滤	小于 1 kDa 组分及草鱼鳞明胶肽可降低 ROS 和 MDA 水平	[13–15]
鱼骨	鲟鱼、金枪鱼	响应面优化、挤压预处理、双酶酶解	GDRAFLI、SGPAGPA、AGPQGP 等低分子肽表现出自由基清除能力	[7,16]
内脏/鱼鳔	虹鳟、安康鱼、褶柔鱼	碱性蛋白酶酶解、超滤、液相色谱-串联质谱法	QDYD、ARW、YPAGP 等可调控 ROS 和抗氧化酶活性	[18–20]
鱼头/鱼尾	黄鳍金枪鱼、石斑鱼、金枪鱼	组分分离、明胶提取、酶解与发酵联用	适合全组分利用, 可获得抗氧化肽和其他功能组分	[21–23]

2.1 前处理与蛋白富集

鱼副产物在酶解前通常需进行清洗、切割、粉碎、脱脂、脱矿、溶胀或胶原提取。脱脂主要用于鱼皮、鱼骨、鱼头等脂质含量较高的原料，乙醇、石油醚等溶剂可降低脂质对酶解和活性测定的干扰。同时，脂质去除不仅有助于提高蛋白纯度，还可减少酶解过程中氧化脂质与肽段发生相互作用而造成的活性误判[26]。

对于鱼鳞和鱼骨，脱矿是决定胶原释放效率的重要步骤。除酸处理外，超声等物理预处理也可用于酶解前促进组织破碎和蛋白构象展开[27]。酸处理可去除羟基磷灰石等无机成分，使胶原纤维结构变得松散，利于后续胃蛋白酶或复合蛋白酶作用[28–31]。然而，酸浓度过高或处理时间过长可能导致胶原降解、氨基酸侧链修饰或灰分残留异常。因此，前处理参数的确定需兼顾蛋白提取得率、后续酶解效率和活性肽稳定性。

鱼头、鱼架和内脏等复杂原料可采用生物炼制方式，将油脂、矿物质、蛋白水解物和微生物培养基等组分分步回收[32–33]。该方式能够提高副产物整体利用率，但工艺环节较多，需分别明确各组分的质量控制要求。例如，蛋白水解物中盐分、残留脂质和内源性酶活性均可能影响后续抗氧化评价。

2.2 抗氧化肽的制备

酶解是目前制备鱼源抗氧化肽最主要、最可控的方法。其关键在于通过酶种选择、酶/底物比、pH、温度和时间等参数，使目标肽段在适宜分子量区间内富集，而非单纯提高蛋白水解程度。碱性蛋白酶、风味蛋白酶、木瓜蛋白酶、胃蛋白酶和胰蛋白酶等因酶切特异性不同，会产生不同的末端残基和序列组合[34–37]。

水解度是反映酶解进程的重要指标，但其与抗氧化活性并非简单线性关系。适度提高水解度通常会增加小于 1 kDa 或 3 kDa 肽段比例，提高供氢/供电子位点暴露。但过度水解可能破坏具有协同作用的序列片段，或产生苦味氨基酸和过多游离氨基酸，从而降低食品适用性。因此，水解度宜与肽段分子量分布、主要序列和感官特性共同评价[38–40]。

多酶分步或复合酶解是提升肽段释放效率的重要方向。内切酶可优先破坏大分子蛋白骨架，增加肽链断裂点；外切酶则可进一步修饰端基并释放更短肽段。若两类酶使用顺序、比例和作用时间设计合理，既能避免大分子蛋白残留，又能减少过度水解造成的活性序列破坏[26]。对于胶原基底物，可先通过酸溶或胃蛋白酶促使胶原纤维松散，再使用 Alcalase 或 Flavourzyme 富集低分子肽[34]；对于内脏和鱼头等复杂底物，则应同步监测脂质氧化产物，防止酶解过程中产生新的促氧化物质[37]。

在具体工艺设计中，酶解温度和 pH 不仅决定蛋白酶活性，也会改变底物蛋白构象和侧链电离状态。例如，偏碱性条件有利于部分微生物蛋白酶发挥作用，并可能促进疏水区域暴露；偏酸性条件则更适合胃蛋白酶处理胶原或明胶底物。酶/底物比过低时，大分子蛋白降解不足，低分子活性肽释放受限；酶/底物比过高时，成本增加且可能引起目标序列过度裂解[27,35]。因此，工艺优化宜将水解度、目标分子量组分比例、关键序列丰度和抗氧化活性共同纳入评价体系。

2.3 发酵与物理辅助酶解：复合酶系和构象展开

微生物发酵可利用乳酸菌、枯草芽孢杆菌、曲霉等微生物在生长过程中分泌的复合蛋白酶体系释放活性肽[41–42]。相较于商业酶制剂，发酵体系具有成本较低、多酶协同和风味改良潜力；同时，微生物代谢过程还能生成有机酸、氨基酸和呈味物质，使其更适合部分传统水产发酵食品。枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*A26 发酵鱼肉蛋白后，产物低分子肽段增加并表现出抗氧化活性[43]；泰国传统半干发酵鲶鱼和鱼露副产物中也分离出具有自由基清除能力的肽段[44–45]。

发酵制肽的主要限制因素在于批次稳定性和安全性。不同菌株、接种量、温度、水分活度和盐度均会影响蛋白水解程度；若控制不当，还可能产生生物胺、真菌毒素或异常风味[46–47]。因此，发酵制肽的优势需建立在菌株安全性、发酵过程可控性和产肽机制清晰的基础上。结合肽组学、代谢组学和菌株全基因组信息，有助于明确核心蛋白酶和目标肽段之间的关系。

超声辅助酶解属于物理场与酶法协同技术。超声空化效应可破坏组织结构并促进蛋白构象展开，使疏水残基和酶切位点暴露，从而提高水解效率[27]。但超声功率和时间过高也可能导致蛋白聚集、局部过热或活性残基氧化。因而，其工艺评价除水解效率外，还应结合原料性质考察功率密度、处理时间、温度控制和能耗水平。

除超声外，挤压、高压、脉冲电场和微波等物理辅助方式也可通过改变蛋白质聚集状态和水合特性影响后续酶解。其共同特点是能够提高底物可及性，但作用机制和放大难点并不相同[48]。挤压处理适合鱼骨粉、鱼架等固体底物，可通过剪切和膨化降低粒径；高压和脉冲电场更适合液态或半液态蛋白体系，可诱导非共价作用重排；微波处理则应重点控制热效应[49–50]。未来比较不同物理辅助方式时，应同时报告能耗、处理通量、蛋白回收率和目标肽段产率，以便判断其真实产业适用性(表 2)。

2.4 分离纯化与序列鉴定

鱼蛋白酶解物通常是由肽段、未完全水解蛋白、游离氨基酸、盐分和少量脂质共同组成的复杂体系。若不进行分离纯化，很难判断抗氧化作用来自特定肽序列，还是来自混合物中的其他还原性成分。因此，超滤、凝胶过滤、离子交换色谱法和反相高效液相色谱法常被组合使用，以实现从混合组分到目标序列的逐级富集[51–52]。

表 2　主要抗氧化肽制备技术对比

Table 2　Comparison of main preparation technologies for antioxidant peptides

技术	作用机制	关键控制点	优势	主要局限
酶解	蛋白酶切断肽键，释放低分子活性肽	酶种、pH、温度、酶/底物比、水解度	条件温和、可控性较强、适合规模化	酶成本较高；过度水解可能降低活性或产生苦味
微生物发酵	微生物复合酶系协同降解蛋白质	菌株安全性、盐度、温度、时间、污染控制	成本较低，可改善风味并释放多样化肽段	批次差异大；生物胺和异常风味风险需控制
超声辅助酶解	空化效应促使组织破碎和蛋白构象展开	功率、频率、时间、温度和能耗	可缩短酶解时间，提高酶切位点暴露	放大生产均一性和能耗经济性需验证

超滤可按分子量范围初步富集小于 1 kDa、1~3 kDa 或 3~5 kDa 等组分，适合作为低分子肽筛选的起始步骤。凝胶过滤可进一步按分子尺寸分离；离子交换色谱法利用电荷差异富集酸性、碱性或中性肽段；反相高效液相色谱法则依据疏水性差异识别高活性峰。草鱼、鲟鱼和鲑鱼等来源肽的研究显示，连续色谱纯化有助于获得结构明确的抗氧化序列[53–55]。

序列鉴定方面，液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry，LC-MS/MS)已成为抗氧化肽解析的核心技术。与传统 Edman 降解相比，质谱可在复杂肽段中实现高通量测序，并可结合数据库检索或 de novo 测序推断序列[56]。十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis，SDS-PAGE)等电泳方法仍可用于蛋白水解程度和样品纯度的初步判断，但不能替代质谱序列确认[57]。在构效研究中，分离组分活性测定、质谱序列鉴定、合成肽验证和机制模型分析应相互印证，才能较准确地判断特定序列的功能贡献。

在序列确认后，为避免混淆组分活性与单肽活性的概念，需要进行合成肽的验证。许多水解物中高活性峰可能同时含有多条肽段，单一序列的贡献需要通过化学合成、纯度确认和等浓度活性比较来验证。进一步地，可结合分子对接、分子动力学和定点氨基酸替换，判断关键残基、末端位置和构象变化对活性的贡献。对于拟用于食品的肽段，还应在盐、糖、pH、热处理和消化模拟条件下评价稳定性，避免只在理想缓冲体系中证明活性。

3　抗氧化肽的常见氨基酸序列特征与构效关系

抗氧化肽活性由分子量、氨基酸组成、序列位置、二级结构、疏水性、电荷分布及与食品界面的相互作用共同决定。现有研究已形成“低分子量、芳香族/疏水性/含硫残基富集、适度构象柔性有利于活性”的基本认识[58–59]。这些结构特征的作用并非停留在经验相关层面，而是与电子转移、氢原子供给、金属配位、空间位阻和界面可达性等分子过程密切相关(图 2)。

3.1　分子量与空间可及性

分子量是抗氧化肽筛选中最常用的指标。多数研究认为，小于 3 kDa 的肽段，尤其是 400~1000 Da 范围内的寡肽，通常具有较好的自由基清除能力和生物利用度[59–60]。其原因主要包括 3 方面：(1)小分子肽扩散速度快，更容易接近自由基、金属离子或脂质氧化界面；(2)短肽空间位阻较小，侧链活性基团不易被肽链内部包埋；(3)部分短肽更易通过肠道转运或细胞膜屏障，在细胞模型中表现出较强保护作用。

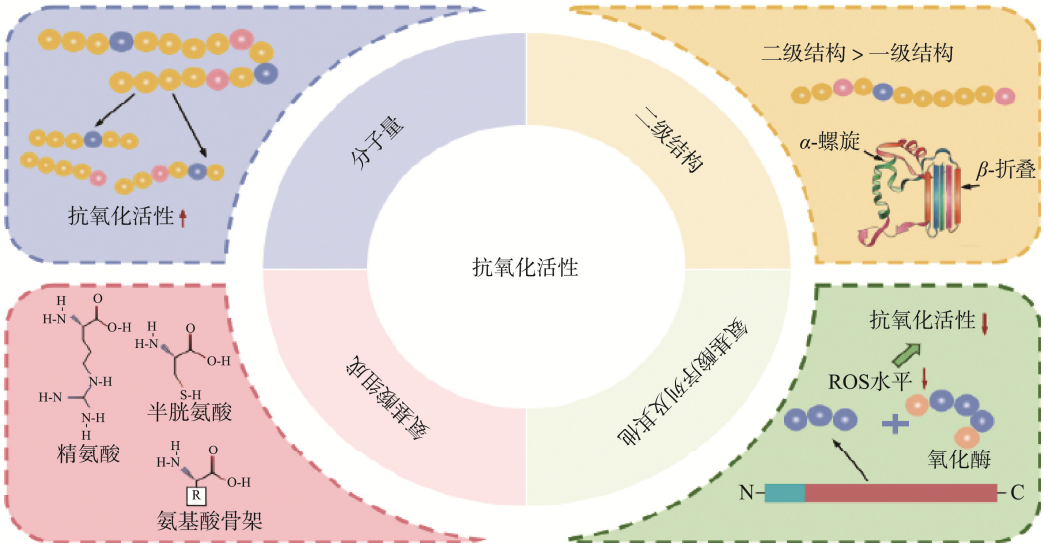


图 2　抗氧化肽的常见氨基酸序列特征与构效关系

Fig.2　Common amino acid sequence characteristics and structure-activity relationship of antioxidant peptides

但是, 低分子量并不等同于高活性。若水解过度导致活性序列被切割, 或生成以疏水苦味残基为主的短肽, 其食品适用性和实际抗氧化效果可能下降。因此, 分子量应被视为初筛指标, 而非唯一判据。较为合理的做法是先通过分子量分级缩小筛选范围, 再结合序列、氨基酸组成和模型体系评价确定主要活性肽。

3.2 氨基酸组成、序列位置与电子转移

抗氧化肽的直接化学作用主要包括氢原子转移(hydrogen atom transfer, HAT)、单电子转移(single electron transfer, SET)和金属离子螯合。芳香族氨基酸酪氨酸(tyrosine, Tyr)、色氨酸(tryptophan, Trp)和苯丙氨酸(phenylalanine, Phe)的侧链具有 π 共轭结构, 可稳定反应后形成的自由基中间体; 组氨酸(histidine, His)的咪唑环既可参与质子/电子转移, 也可与金属离子形成配位; 半胱氨酸(cysteine, Cys)和甲硫氨酸(methionine, Met)中的含硫基团具有较强还原能力; 谷氨酸(glutamic acid, Glu)和天冬氨酸(aspartic acid, Asp)的羧基则有助于络合 Fe^{2+}、Cu^{2+}等促氧化金属离子[60–62]。

疏水性氨基酸亮氨酸(leucine, Leu)、异亮氨酸(isoleucine, Ile)、缬氨酸(valine, Val)、丙氨酸(alanine, Ala)和脯氨酸(proline, Pro)的作用具有体系依赖性。在脂质氧化体系中, 适度疏水性可促进肽段进入油水界面或脂质相邻区域, 提高其与脂质自由基或过氧化物的接触概率; 但过强疏水性可能降低水相分散性, 导致肽段聚集或产生苦味。因此, 疏水性残基的功能贡献取决于其在序列中的位置以及应用体系的极性环境。

序列位置同样影响反应效率。位于 N 端或 C 端的活性残基通常空间可及性更高, 供氢、供电子或配位作用更容易发生。PALAMUTOĞLU 等[63]通过特定序列设计证明, 邻位残基的电子效应和空间排布可显著改变抗氧化效率。分子对接研究进一步提示, 某些鱼源肽可通过氢键、疏水和静电作用与氧化相关酶或受体结合, 从而减少 ROS 生成或增强细胞抗氧化防御[64]。这说明抗氧化肽并非只进行化学清除, 还可能通过生物靶点调控发挥作用。

此外, 金属螯合作用在鱼源抗氧化肽中具有特殊意义。水产品和肉制品体系中常存在 Fe^{2+}、Cu^{2+}等促氧化金属离子, 可通过 Fenton 反应促进羟自由基生成并加速脂质过氧化[65]。含 His、Glu、Asp、Cys 等残基的肽段可通过咪唑基、羧基或巯基与金属离子配位, 从而降低金属催化氧化能力[66]。与单纯自由基清除相比, 金属螯合更接近实际食品氧化过程中的关键控制环节[67], 因此在食品保鲜方向上应与 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基等化学清除实验并列评价。

3.3 二级结构、构象柔性与作用环境

对于较长肽段, 二级结构可能成为影响抗氧化能力的重要因素。*α*-螺旋可通过稳定的氢键网络使疏水面和亲水面形成相对有序排列, 有利于肽段在界面处定位。*β*-折叠结构可能形成较稳定的作用界面, 但过度聚集也会遮蔽活性残基; 无规卷曲具有较高柔性, 利于活性基团暴露, 但过度无序可能降低与靶标或界面的稳定结合[68]。

从食品体系角度看, 二级结构的意义不仅在于影响 DPPH 自由基或 ABTS 阳离子自由基清除率, 还在于决定肽段能否定位于油水界面、肉制品肌纤维网络或包装膜基质中。抗氧化反应通常发生在氧气、脂质、水相和金属离子共存的微环境中, 肽段若无法到达关键界面, 即使在体外自由基实验中活性较高, 也未必能在食品贮藏中有效延缓氧化[69]。因此, 后续构效研究应将“化学抗氧化活性”和“界面可达性”结合评价。

构效关系还受到消化稳定性和基质相互作用影响。部分短肽在体外清除实验中活性较高, 但在模拟胃肠消化或加热处理后可能进一步裂解, 导致活性下降或作用方式改变; 也有部分胶原肽经消化后释放新的短序列, 反而增强自由基清除或金属螯合能力[70]。因此, 对拟用于食品配料的鱼源抗氧化肽, 应同时比较消化前后分子量分布、主要序列和活性变化, 以判断其在摄入或加工条件下的功能保持能力(表 3)。

表 3 影响抗氧化肽活性的关键结构特征与机制

Table 3 Key structural characteristics and mechanisms affecting the activity of antioxidant peptides

构效因素	有利结构特征	可能机制	建议评价指标
分子量	小于 3 kDa, 尤其 400~1000 Da 短肽	扩散快、空间位阻小、活性基团易暴露	分子量分布、DPPH/ABTS、细胞摄取
芳香族/含硫残基	Tyr、Trp、Phe、Cys、Met	π 共轭稳定自由基; 含硫基团提供还原能力	HAT/SET 相关指标、自由基清除率
金属螯合残基	His、Glu、Asp 等	络合 Fe^{2+}、Cu^{2+}, 抑制金属催化氧化	Fe^{2+}/Cu^{2+}螯合能力、羟自由基清除
疏水性与序列位置	Leu、Ile、Val、Pro 及 N 端/C 端活性残基	促进脂质界面定位, 提高官能团可及性	界面张力、乳化稳定性、脂质氧化模型
二级结构	适度 *α*-螺旋、*β*-转角和构象柔性	调控活性残基暴露、靶标结合和界面行为	圆二色谱、分子模拟、食品贮藏试验

细胞抗氧化模型为构效关系提供了另一层证据。部分鱼源肽能够提高 SOD、CAT、GSH-Px 等内源性酶活性, 并降低 MDA 或细胞内 ROS 水平。这类结果提示其可能通过 Keap1/Nrf2、AMPK/Nrf2 等通路调节抗氧化防御, 而不仅是直接清除自由基[20,40]。需要注意的是, 细胞模型中的有效浓度、细胞毒性、肽段摄取方式和消化稳定性应同时报告, 否则难以判断其在食品摄入条件下是否具有实际意义。

4　食品体系应用与评价

鱼源抗氧化肽的应用研究应重视实际食品基质中的效果评价。与化学自由基体系相比, 食品体系含有蛋白质、脂质、盐分、水分、金属离子和微生物等多种影响因素, 抗氧化效果受 pH、加热、离子强度、储藏温度和基质相容性共同调控。脂质氧化抑制、货架期延长、感官影响和安全性评价, 是判断其食品应用潜力的主要依据。

4.1　食品保鲜与抗脂质氧化

脂质氧化是肉制品、水产品、调理食品和乳化食品品质下降的重要原因, 可导致酸败味、色泽劣变、营养损失和潜在有害氧化产物积累。鱼胶原肽添加至肉丸等食品模型中可降低脂质氧化水平, 提示其在肉制品保鲜中具有一定应用价值[63]。但该类研究仍需从添加量、加工耐受性、储藏周期、感官接受度和与现有防腐保鲜体系的兼容性等方面进一步验证。

在实际食品体系中, 抗氧化肽的有效性难以仅由硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)完全表征。较完整的评价体系应同时包括过氧化值、硫代巴比妥酸反应物、羰基含量、游离脂肪酸、色差、质构、微生物指标和感官特征, 并与常用天然抗氧化剂进行对照[71]。当上述指标在相同添加水平下表现出稳定、可重复的改善效果时, 鱼源抗氧化肽作为食品抗氧化配料的应用价值才更具说服力。

此外, 鱼源抗氧化肽具有一定两亲性, 可能同时影响乳化稳定性和氧化稳定性。在乳化食品中, 肽段若能够吸附于油水界面并形成具有一定强度的界面膜, 可阻碍氧气、金属离子和脂质自由基接触, 从而发挥界面屏障与抗氧化的双重作用。然而, 分子量过小的肽段界面膜强度有限, 分子量过大的组分又可能扩散缓慢[72−74]。因此, 乳化体系中需要平衡肽段分子量、疏水性和界面膜形成能力, 而不能直接套用水相自由基实验结论。

在评价体系上, 还应区分其抗氧化能力和保鲜贡献。前者多由 DPPH、ABTS、抗氧化能力指数、还原力或金属螯合能力表征, 反映肽段在简化化学体系中的反应潜力; 后者则受食品基质、氧气扩散、金属离子分布、脂质类型、蛋白网络和微生物状态共同影响[75]。若某一肽段在化学体系中活性较高, 但在肉制品或水产品贮藏中不能降低过氧化值、TBARS 或感官劣变, 则其应用价值仍需谨慎判断。因而, 活性评价需要由单一指标比较扩展为多指标一致性和场景适配性分析。

针对水产品和肉制品保鲜, 评价体系还应考虑肽段自身来源可能带来的风味影响。鱼源肽含有一定疏水性残基, 低浓度时可能改善鲜味或醇厚感, 但浓度过高时易产生苦味、腥味或金属味。若抗氧化肽虽能降低氧化指标, 却明显影响产品感官品质, 其应用价值仍会受到限制。因此, 剂量优化需兼顾抗氧化效率、感官阈值和成本, 体外活性最高的添加量未必对应最佳食品应用效果。

4.2　活性包装、涂膜与界面体系

将抗氧化肽与明胶、壳聚糖、海藻酸盐、淀粉或蛋白膜基质复合, 是近年来食品活性包装研究的热点。天然抗氧化剂型活性包装可通过持续释放或界面固定方式抑制食品表面氧化; 壳聚糖等多糖基膜材料还可与肽段形成氢键或静电相互作用, 提高膜的机械性能和阻隔性能[76]。

抗氧化肽用于包装材料时, 其应用效果主要受三方面因素制约: (1)肽段在成膜、干燥和贮藏过程中的活性保持率; (2)肽段从膜基质向食品表面的迁移行为及其合规性; (3)包装膜对食品风味、色泽和微生物安全的综合影响。与直接添加相比, 活性包装更适合用于表面氧化明显的水产品、肉制品和高脂食品, 但仍需建立释放动力学、迁移安全和货架期之间的对应关系。

4.3　食品应用中的安全性与质量控制

鱼源抗氧化肽的食品应用还需关注安全性和标准化问题。副产物来源复杂, 可能存在重金属、组胺、生物胺、过敏原和微生物污染风险; 酶解或发酵过程还可能引入酶制剂残留、发酵副产物或异常风味[77−78]。因此, 天然来源并不等同于安全性充分, 原料验收、前处理、酶解或发酵、分离纯化、干燥和成品贮藏等环节均需纳入质量控制。

质量控制指标可包括蛋白质含量、水解度、分子量分布、特征肽序列、灰分、脂质氧化指标、微生物限量、重金属、组胺或生物胺、过敏原风险和关键抗氧化活性指标。对于作为食品配料使用的肽产品, 还应进行体外消化稳定性、细胞安全性和必要的动物实验验证。形成“结构明确、工艺稳定、活性可复现、安全性可评价”的技术体系, 是支撑其在食品工业中推广的重要基础。

标准化方面, 可将特征肽段作为质量一致性标志物。对于混合型水解物, 可选择 1~3 条与活性密切相关且稳定存在的特征肽, 通过 LC-MS/MS 或高效液相色谱建立定量方法; 对于复合发酵产物, 还应监测生物胺、组胺和微生物安全指标[79]。上述质量控制方法能够把抗氧化活性从单次实验结果转化为可检测、可追溯和可比较的产品指标。

在食品应用中, 鱼源抗氧化肽的功能定位应聚焦于

与食品安全和质量控制关系密切的场景，尤其是食品脂质氧化抑制、品质保持和活性包装等方面。围绕这些场景开展系统评价，有利于明确适宜添加量、作用条件和质量评价指标。

5 结束语

鱼类加工副产物来源抗氧化肽兼具资源利用和食品抗氧化应用价值。鱼皮、鱼鳞和鱼骨等胶原基组织可释放以甘氨酸、脯氨酸、羟脯氨酸等氨基酸为特征的低分子胶原肽；内脏、鱼头、鱼尾和鱼鳔等复杂组织则可提供更加多样的肽段序列。酶解、发酵及超声辅助酶解等技术通过影响蛋白构象、水解度和分子量分布，进而调节肽段的抗氧化活性。总体来看，小分子量、适度疏水性、芳香族残基、含硫残基、金属螯合残基和适宜空间构象，是鱼源抗氧化肽发挥自由基清除、金属螯合和脂质氧化抑制作用的重要结构基础。

目前研究结果表明，鱼类加工副产物抗氧化肽的功能表现并非由单一因素决定，而是受原料蛋白组成、前处理方式、水解方式、肽段序列和应用基质等多因素共同影响。因此，相关研究不应局限于具体活性数值比较，还应进一步分析不同原料可提供的潜在序列、不同制备技术对肽段结构的影响，以及这些结构特征能否在食品氧化体系中产生稳定的保鲜效果。

制备环节中，不同鱼种、组织部位和加工批次会影响底物蛋白组成及酶切可及性，进而改变水解产物的分子量分布和序列组成。酶解、发酵和物理辅助处理虽已被广泛用于鱼源抗氧化肽制备，但现有研究中仍有较多工作侧重工艺参数优化，对特征肽形成规律及其批次稳定性的分析相对不足。将水解度、分子量分布、特征肽丰度和抗氧化活性共同纳入评价，有助于提高制备结果的稳定性和可重复性。

构效关系方面，鱼源抗氧化肽的活性与分子量、氨基酸组成、序列位置和二级结构密切相关。低分子量肽段通常具有较高扩散性和较低空间位阻，芳香族残基、含硫残基及 His、Glu、Asp 等金属螯合相关残基则有利于供氢、供电子或抑制金属催化氧化。结合 LC-MS/MS、合成肽验证、分子模拟和细胞模型，可进一步明确主要活性肽段及其结构基础。

食品应用方面，体外自由基清除结果不能完全代表其在实际食品基质中的保鲜效果。鱼源抗氧化肽进入肉制品、水产品、乳化食品或活性包装材料后，会受到 pH、盐度、热处理、脂质类型、蛋白网络和贮藏条件等因素影响。因此，应在具体食品体系中同步评价过氧化值、TBARS、羰基含量、色泽、质构、微生物指标和感官品质，使抗氧化活性与食品品质保持效果相互印证。

对于食品安全与质量检测领域，鱼源抗氧化肽的应用还需重视安全性和质量一致性。副产物来源、酶解或发酵条件、干燥方式和贮藏条件均可能影响产物组成。以分子量分布、特征肽含量、抗氧化活性、组胺或生物胺、重金属、微生物限量和过敏原风险等作为评价指标，有助于建立较为完善的质量控制体系。随着制备技术、结构鉴定方法和食品基质评价手段不断完善，鱼源抗氧化肽有望在食品脂质氧化控制、活性包装和天然功能配料开发中发挥更大作用，并为水产加工副产物的高值化利用提供技术支撑。

参考文献

[1] SIES H. Oxidative stress: Concept and some practical aspects [J]. Antioxidants, 2020, 9(9): 852.

[2] PAN M, LIU K, YANG J, *et al*. Advances on food-derived peptidic antioxidants: A review [J]. Antioxidants, 2020, 9(9): 799.

[3] HONRADO A, MIGUEL M, ARDILA P, *et al*. From waste to value: Fish protein hydrolysates as a technological and functional ingredient in human nutrition [J]. Foods, 2024, 13(19): 3120.

[4] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2024: Blue transformation in action [R]. Rome: FAO, 2024.

[5] NIKOO M, REGENSTEIN JM, YASEMI M. rocessing by-products: Production, characteristics, food applications, and challenges [J]. Foods, 2023, 12(24): 4470.

[6] WANG S, ZHANG L, WANG H, *et al*. Review the antioxidant and angiotensin converting enzyme inhibitory peptides derived from fish: preparation, structure-relationship, bioavailability and ameliorating strategies [J]. Food Bioscience, 2024, 62: 104955.

[7] LIU X, HU Q, SHEN Y, *et al*. Research progress on antioxidant peptides from fish by-products: Purification, identification, and structure-activity relationship [J]. Metabolites, 2024, 14(10): 561.

[8] GHALAMARA S, BRAZINHA C, SILVA S, *et al*. Valorization of fish processing by-products: Biological and functional properties of bioactive peptides [J]. Current Food Science and Technology Reports, 2024, 2(4): 393–409.

[9] NG WJ, WONG FC, ABD MANANF, *et al*. Antioxidant peptides and protein hydrolysates from tilapia: Cellular and *in vivo* evidences for human health benefits [J]. Foods, 2024, 13(18): 2945.

[10] YUAN Z, YE X, HOU Z, *et al*. Sustainable utilization of proteins from fish processing by-products: Extraction, biological activities and applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 143: 104276.

[11] CADAR E, PESTERAU AM, PRASACU I, *et al*. Marine antioxidants from marine collagen and collagen peptides with nutraceuticals applications: A review [J]. Antioxidants, 2024, 13(8): 919.

[12] GUI M, GAO L, RAO L, *et al*. Bioactive peptides identified from enzymatic hydrolysates of sturgeon skin [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(5): 1948–1957.

[13] HWANG JW, LEE SG, KANG H. Antioxidant, antibacterial properties of novel peptide CP by enzymatic hydrolysis of *Chromis notata* by-products and its efficacy on atopic dermatitis [J]. Marine Drugs, 2024, 22(1): 44.

[14] GHALAMARA S, BRAZINHA C, SILVA S, *et al*. Exploring fish processing by-products as an alternative source of bioactive peptides: A review on extraction and food applications [J]. Current Food Science and Technology Reports, 2024, 2(4): 377–391.

[15] SANTOS FM, ANDRÉ R, FERREIRA M, *et al*. Valorizing sardine scales: A circular approach to sustainable collagen for cosmetics and nutrition applications [J]. Frontiers in Pharmacology, 2024, 15: 1390752.

[16] ZU XY, LI MJ, XIONG GQ, *et al*. Silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) scales collagen peptides (SCPs): Preparation, whitening activity screening and characterization [J]. Foods, 2023, 12(7): 1552.

[17] HU YM, LU SZ, LI YS, *et al*. Protective effect of antioxidant peptides from grass carp scale gelatin on the H_2O_2-mediated oxidative injured HepG2 cells [J]. Food Chemistry, 2022, 373(Pt B): 131539.

[18] ZHANG Y, GUI M, FAN W, *et al*. Response surface methodology optimization on extraction and antioxidant activity evaluation of antioxidant peptide from enzymatic hydrolysates of sturgeon bone [J]. LWT, 2024, 198: 116042.

[19] YANG M, LIU H, WANG M, *et al*. Preparation, isolation and identification of novel antioxidant peptides from extruded-expanded tuna bone meal [J]. LWT, 2025, 228: 118038.

[20] WU MF, XI QH, SHENG Y, *et al*. Antioxidant peptides from monkfish swim bladders: Ameliorating NAFLD *in vitro* by suppressing lipid accumulation and oxidative stress via regulating AMPK/Nrf2 pathway [J]. Marine Drugs, 2023, 21(6): 360.

[21] KHASMAKHI EN, RAHIMABADI EZ, SANGATASH MM. Purification and characterization of antioxidant peptide fractions from protein hydrolysate of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) viscera [J]. Food Research International, 2025, 206: 116027.

[22] 刘小芳, 李向阳, 付晓艳, 等. 太平洋褶柔鱼内脏蛋白肽的抗氧化活性及稳定性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 302–308.
LIU XF, LI XY, FU XY, *et al*. Antioxidant activity and stability of visceral protein peptides from *Todarodes pacificus* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 302–308.

[23] SISA A, MARTÍNEZ-ÁLVAREZ O, GÓMEZ-ESTACA J, *et al*. Valorization of yellowfin tuna tails: From proteolytic enzyme production to gelatin and antioxidant hydrolysate extraction [J]. Foods, 2024, 13(13): 2034.

[24] CHAN PT, MATANJUN P, BUDIMAN C, *et al*. Novel peptide sequences with ACE-inhibitory and antioxidant activities derived from the heads and bones of hybrid groupers (*Epinephelus lanceolatus*×*Epinephelus fuscoguttatus*) [J]. Foods, 2022, 11(24): 3991.

[25] PÉREZ-GÁLVEZ R, ESPEJO-CARPIO FJ, GARCÍA-MORENO PJ, *et al*. Processing of tuna head by-products into antioxidant peptide ingredients for aquaculture feeds [J]. Antioxidants, 2025, 14(7): 770.

[26] TOLDRÁ F, GALLEGO M, REIG M, *et al*. Recent progress in enzymatic release of peptides in foods of animal origin and assessment of bioactivity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(46): 12842–12855.

[27] CROPOTOVA J, KVANGARSNES K, STANGELAND J, *et al*. Effect of ultrasound pre-treatment prior to enzymatic hydrolysis on physicochemical parameters of fish protein hydrolysates extracted from side streams of *Atlantic mackerel* (*Scomber scombrus*) [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024, 8: 1388318.

[28] ISLAM J, SOLVAL KE. Recent advancements in marine collagen: Exploring new sources, processing approaches, and nutritional applications [J]. Marine Drugs, 2025, 23(5): 190.

[29] JAFARI H, LISTA A, SIEKAPEN MM, *et al*. Fish collagen: Extraction, characterization, and applications for biomaterials engineering [J]. Polymers, 2020, 12(10): 2230.

[30] MONIRUZZAMAN SM, TAKAHASHI K, NESA NU, *et al*. Characterization of acid and pepsin-soluble collagens extracted from scales of carp and lizardfish caught in Japan, Bangladesh and Vietnam with a focus on thermostability [J]. Food Science and Technology Research, 2019, 25(2): 331–340.

[31] LINO-SÁNCHEZ A, GONZÁLEZ-VÉLEZ V, VÉLEZ M, *et al*. Extraction and characterization of type I collagen from scales of *Mexican biajaiba* fish [J]. Open Chemistry, 2023, 21(1): 20230134.

[32] VÁZQUEZ JA, PEDREIRA A, DURÁN S, *et al*. Biorefinery for tuna head wastes: Production of protein hydrolysates, high-quality oils, minerals and bacterial peptones [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 357: 131909.

[33] RODRIGUES DP, CALADO R, AMEIXA OMCC, *et al*. Valorisation of *Atlantic codfish* (*Gadus morhua*) frames from the cure-salting industry as fish protein hydrolysates with *in vitro* bioactive properties [J]. LWT, 2021, 149: 111840.

[34] ASHAOLU TJ, LEE CC, ASHAOLU JO, *et al*. Pepsin: An excellent proteolytic enzyme for the production of bioactive peptides [J]. Food Reviews International, 2024. https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2238814

[35] NIKOO M, REGENSTEIN JM, HAGHI-VAYGHAN A, *et al*. Formation of oxidative compounds during enzymatic hydrolysis of byproducts of the seafood industry [J]. Processes, 2023, 11(2): 543.

[36] SINTHUSAMRAN S, IDOWU AT, BENJAKUL S, *et al*. Effect of proteases and alcohols used for debittering on characteristics and antioxidative activity of protein hydrolysate from salmon frames [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(2): 473–483.

[37] ABD-EL-RADY TK, TAHOUN AAM, ABDIN M, *et al*. Effect of different hydrolysis methods on composition and functional properties of fish protein hydrolysate obtained from bigeye tuna waste [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2023, 58(12): 6552–6562.

[38] CHEN HJ, DAI FJ, CHEN CY, *et al*. Effects of molecular weight fraction on antioxidation capacity of rice protein hydrolysates [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 3464.

[39] NWACHUKWU ID, ALUKO RE. Structural and functional properties of food protein-derived antioxidant peptides [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(1): e12761.

[40] ZHU Y, LAO F, PAN X, *et al*. Food protein-derived antioxidant peptides: Molecular mechanism, stability and bioavailability [J]. Biomolecules, 2022, 12(11): 1622.

[41] TANAKA M, ITO K, MATSUURA T, *et al*. Identification and distinct regulation of three di/tripeptide transporters in *Aspergillus oryzae* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2021, 85(2): 452–463.

[42] LI W, WANG T. Effect of solid-state fermentation with *Bacillus subtilis* LWO on the proteolysis and the antioxidative properties of chickpeas [J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 338: 108988.

[43] JEMIL I, JRIDI M, NASRI R, *et al*. Functional, antioxidant and antibacterial properties of protein hydrolysates prepared from fish meat fermented by *Bacillus subtilis* A26 [J]. Process Biochemistry, 2014, 49(6): 963–972.

[44] CHAIJAN M, RODSAMAI T, CHAROENLAPPANIT S, *et al*. Characterization of antioxidant peptides from Thai traditional semi-dried fermented catfish [J]. Fermentation, 2021, 7(4): 251.

[45] CHOKSAWANGKARN W, PHIPHATTANANUKOON S, JARESITTHIKUNCHAI J, *et al*. Antioxidative peptides from fish sauce by-product: Isolation and characterization [J]. Agriculture and Natural Resources, 2018, 52(5): 460–466.

[46] ANAL AK, PERPETUINI G, PETCHKONGKAEW A, *et al*. Food safety risks in traditional fermented food from South-East Asia [J]. Food Control, 2020, 109: 106922.

[47] CHOURASIA R, CHIRING PL, ABEDIN MM, *et al*. Bioactive peptides in fermented foods and their application: A critical review [J]. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 2023, 3(1): 88–109.

[48] KOTSONI E, DAUKŠAS E, AAS GH, *et al*. Impact of high-pressure pretreatment on the structure and quality of fish protein hydrolysates extracted from a mixture of atlantic salmon (*Salmo salar*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) rest raw material [J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(12): 10605–10619.

[49] MARÍN-SÁNCHEZ J, BERZOSA A, ÁLVAREZ I, *et al*. Pulsed electric fields effects on proteins: Extraction, structural modification, and enhancing enzymatic activity [J]. Bioelectricity, 2024, 6(3): 154–166.

[50] HABINSHUTI I, NSENGUMUREMYI D, MUHOZA B, *et al*. Recent and novel processing technologies coupled with enzymatic hydrolysis to enhance the production of antioxidant peptides from food proteins: A review [J]. Food Chemistry, 2023, 423: 136313.

[51] NOMAN A, WANG Y, ZHANG C, *et al*. Fractionation and purification of antioxidant peptides from Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) protein hydrolysates prepared using papain and alcalase 2.4 L [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2021, 14(4): 103114.

[52] LI S, GU J, LIU Y, *et al*. Physicochemical properties and stability of antioxidant peptides from swim bladder of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Foods, 2025, 14(7): 1154.

[53] REN J, ZHAO M, SHI J, *et al*. Purification and identification of antioxidant peptides from grass carp muscle hydrolysates by consecutive chromatography and electrospray ionization-mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2008, 108(2): 727–736.

[54] ZHU Y, ZHU L, GUO Z, *et al*. Antioxidant peptides from the sturgeon gill protein: Purification, identification, molecular docking analysis and antioxidative mechanisms evaluation [J]. LWT, 2023, 173: 114354.

[55] WU R, WU C, LIU D, *et al*. Antioxidant and anti-freezing peptides from salmon collagen hydrolysate prepared by bacterial extracellular protease [J]. Food Chemistry, 2018, 248: 346–352.

[56] JIANG Y, REX DAB, SCHUSTER D, *et al*. Comprehensive overview of bottom-up proteomics using mass spectrometry [J]. ACS Measurement Science Au, 2024, 4(4): 338–417.

[57] RABILLOUD T, VAEZZADEH AR, POTIER N, *et al*. Power and limitations of electrophoretic separations in proteomics strategies [J]. Mass Spectrometry Reviews, 2009, 28(5): 816–843.

[58] XU B, DONG Q, YU C, *et al*. Advances in research on the activity evaluation, mechanism and structure-activity relationships of natural antioxidant peptides [J]. Antioxidants, 2024, 13(9): 1067.

[59] LÓPEZ-GARCÍA G, DUBLAN-GARCÍA O, ARIZMENDI-COTERO D, *et al*. Antioxidant and antimicrobial peptides derived from food proteins [J]. Molecules, 2022, 27(4): 1343.

[60] BAMDAD F, AHMED S, CHEN L. Specifically designed peptide structures effectively suppressed oxidative reactions in chemical and cellular systems [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 18: 35–46.

[61] GUO X, LIU J, WANG C, *et al*. The antioxidant mechanism of peptides extracted from tuna protein revealed using a molecular docking simulation [J]. Antioxidants, 2024, 13(2): 166.

[62] XIANG Z, XUE Q, GAO P, *et al*. Antioxidant peptides from edible aquatic animals: Preparation method, mechanism of action, and structure-activity relationships [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134701.

[63] PALAMUTOĞLU R, KASNAK C. Antioxidant effect of fish collagen hydrolysate addition to meatballs [J]. Mugla Journal of Science and Technology, 2019, 5(2): 56–61.

[64] RANGARAJ V, RAMBABU K, BANAT F, *et al*. Natural antioxidants-based edible active food packaging: An overview of current advancements [J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101251.

[65] MUSSIO C, GARCIA-PEREZ P, MORET E, *et al*. The role, mechanisms and evaluation of natural chelating agents in food stability: A review [J]. Food Chemistry, 2025, 496: 146682.

[66] ZHAO C, WANG Y, ASHAOLU TJ. Antioxidative and mineral-binding food-derived peptides: Production, functions, metal complexation conditions, and digestive fate [J]. Food Research International, 2025, 200: 115471.

[67] YU X, LIU X, ZHOU D. A critical review of a typical research system for food-derived metal-chelating peptides: Production, characterization, identification, digestion, and absorption [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(1): e13277.

[68] FLÓREZ M, GUERRA-RODRÍGUEZ E, CAZÓN P, *et al*. Chitosan for food packaging: Recent advances in active and intelligent films [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107328.

[69] ZHANG W, AZIZI-LALABADI M, ROY S, *et al.* Maillard-reaction (glycation) of biopolymeric packaging films; principles, mechanisms, food applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 138: 523–538.

[70] ALMEIDA EMF, DE SD. Current electroanalytical approaches in the carbamates and dithiocarbamates determination [J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135900.

[71] MARDANI M, BADAKNÉ K, FARMANI J, *et al.* Antioxidant peptides: Overview of production, properties, and applications in food systems [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(1): 46–106.

[72] GONZÁLEZ-SERRANO DJ, HADIDI M, VARCHEH M, *et al*. Bioactive peptide fractions from collagen hydrolysate of common carp fish byproduct: Antioxidant and functional properties [J]. Antioxidants, 2022, 11(3): 509.

[73] BJØRLIE M, YESILTAS B, GARCÍA-MORENO PJ, *et al*. Bioinformatically predicted emulsifying peptides and potato protein hydrolysate improves the oxidative stability of microencapsulated fish oil [J]. Food Chemistry Advances, 2023, 3: 100441.

[74] VARONA E, GARCÍA-MORENO PJ, GREGERSEN ES, *et al.* Antioxidant peptides from alternative sources reduce lipid oxidation in 5% fish oil-in-water emulsions (pH 4) and fish oil-enriched mayonnaise [J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136498.

[75] YESILTAS B, GARCÍA-MORENO PJ, GREGERSEN S, *et al.* Antioxidant peptides derived from potato, seaweed, microbial and spinach proteins: Oxidative stability of 5% fish oil-in-water emulsions [J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132699.

[76] ROY S, RAMAKRISHNAN R, AFZIA N, *et al.* Recent progress in the antimicrobial and antioxidant peptide activated film/coatings for food packaging applications: A review [J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105288.

[77] FERNANDO IPS, JAYAWARDENA TU, WU J, *et al.* Marine proteins and peptides: Production, biological activities, and potential applications [J]. Food Innovation and Advances, 2023, 2(2): 69–84.

[78] EL-GHAREEB WR, ELHELALY AE, ABDALLAH KME, *et al*. Formation of biogenic amines in fish: Dietary intakes and health risk assessment [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(6): 3123–3129.

[79] HUANG X, QING R, SUN Y, *et al*. Absolute quantification of gelatin peptides using LC-MS/MS based on simulated gelatinous matrix screening and application [J]. Results in Chemistry, 2026, 27: 103438.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)