

海参胶原蛋白肽的提取及抗氧化性能分析

邱亚星¹, 黄蓉¹, 伍娟², 蔡运笑¹, 古晓东¹, 许锋^{1*}

¹佛山大学环境与化工学院, 广东 佛山

²广东环境保护工程职业学院环境监测学院, 广东 佛山

收稿日期: 2025年9月30日; 录用日期: 2025年10月29日; 发布日期: 2025年11月10日

摘要

本研究以海参为原料, 对比了木瓜蛋白酶和碱性蛋白酶两种酶解工艺在制备海参胶原蛋白肽方面的效果。研究通过测定产率以及一系列体外抗氧化活性指标(DPPH自由基、羟自由基、超氧阴离子自由基、ABTS阳离子自由基清除能力和总抗氧化能力T-AOC), 对两种酶解产物的性能进行了系统评价。研究发现, 碱性蛋白酶酶解工艺在产率(26.24%)和各项抗氧化活性指标上均表现出显著优势, 其产物在清除多种自由基方面能力更强, 且总抗氧化能力更高、更稳定。研究最终得出结论, 碱性蛋白酶是制备高活性海参胶原蛋白肽的更优选择。

关键词

木瓜蛋白酶, 碱性蛋白酶, 海参, 胶原蛋白肽, 酶解法

Extraction and Antioxidant Properties of Sea Cucumber Collagen Peptides

Yaxing Di¹, Rong Huang¹, Juan Wu², Yunxiao Cai¹, Xiaodong Gu¹, Feng Xu^{1*}

¹School of Environmental and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan Guangdong

²School of Environmental Monitoring, Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Foshan Guangdong

Received: September 30, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

In this study, sea cucumber was used as the raw material to compare the effects of two enzymatic hydrolysis processes—using papain and alkaline protease—on the preparation of sea cucumber

*通讯作者。

文章引用: 邱亚星, 黄蓉, 伍娟, 蔡运笑, 古晓东, 许锋. 海参胶原蛋白肽的提取及抗氧化性能分析[J]. 化学工程与技术, 2025, 15(6): 361-369. DOI: 10.12677/hjct.2025.156033

collagen peptides. The performance of the two hydrolysates was systematically evaluated by measuring yield and a series of in vitro antioxidant activity indicators, including DPPH radical, hydroxyl radical, superoxide anion radical, ABTS cation radical scavenging abilities, and total antioxidant capacity (T-AOC). The results showed that the alkaline protease hydrolysis process exhibited significant advantages in both yield (26.24%) and all antioxidant activity parameters. Its hydrolysate demonstrated stronger scavenging abilities against various radicals and showed higher and more stable total antioxidant capacity. The study concluded that alkaline protease is a superior choice for the preparation of highly active sea cucumber collagen peptides.

Keywords

Papain, Alcalase, Sea Cucumber, Collagen Peptides, Enzymatic Hydrolysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海参(Sea Cucumber, Holothurians)属于棘皮动物门(Echinodermata), 海参纲(Holothuroidea), 是兼具营养与经济价值的重要海洋无脊椎动物。目前全球已知海参种类超过 1700 种, 根据《2024 年中国渔业统计年鉴》数据显示, 2023 年全国海参养殖总量为 292,045 t [1]; 我国海域已记录约 140 种, 其中 20 余种为常见食用品种。营养学分析表明, 海参冻干粉的蛋白质含量高达 $55.06\% \pm 0.58\%$ [2], 其中肽类蛋白占比超过 70%。此外, 海参富含皂苷[3]、酸性黏多糖和多肽等活性物质, 具有抗癌[4]、降血压和改善高尿酸血症[5]等多种生理功能, 因而在营养学和药理学研究中受到广泛关注。

在海参的活性成分中, 胶原蛋白是最主要的结构蛋白。经酶解处理可获得分子量较小的胶原蛋白肽, 其生物利用度和组织渗透性明显优于完整蛋白, 并展现出抗疲劳、抗衰老[6]和抗氧化等多种活性[7]。史亚萍等[8]报道, 酶解海参肽对羟基自由基、DPPH 自由基、ABTS 自由基和超氧阴离子均具有显著清除作用; 研究同时表明, 海参肽的活性与其分子量密切相关。然而, 目前关于海参胶原蛋白肽的系统研究仍较有限, 现有酶解工艺普遍存在步骤复杂、周期较长及得率偏低等问题[9], 这在一定程度上制约了其产业化进程。自由基过量积累会诱发氧化应激, 破坏细胞大分子结构, 进而导致炎症、心血管疾病和癌症等多种病理状态[10][11]。补充外源性抗氧化剂是维持机体稳态、减轻氧化损伤的重要手段。相较于化学合成抗氧化剂, 天然来源的活性肽因其安全性高、易吸收和多靶点作用而具有显著优势, 目前已广泛应用于食品和化妆品领域。已有研究报道了多种天然抗氧化肽, 如骆驼骨肽、南极磷虾肽[12]、罗非鱼肽[13]和猪肝肽[14], 其作用机制包括自由基清除、金属离子螯合及脂质过氧化抑制等[15][16]。活性评价常通过 DPPH、羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)及 ABTS 等清除实验实现。例如, 王志等[17]发现大菱鲆鱼皮酶解肽在($\cdot\text{OH}$)清除、金属螯合和还原力方面均表现出较高活性; 党慧敏等[18]利用复合酶酶解与超滤技术制备的南极磷虾肽具有较强的 DPPH 和($\cdot\text{OH}$)清除能力; 洪燕婷[19]通过优化工艺显著提升了海鲈鱼鳞酶解肽的抗氧化效果。

综上所述, 海参胶原蛋白肽兼具优异的营养价值与抗氧化活性, 具备广阔的研究与应用前景。本研究在借鉴李爽等[20]利用酶解法制备鱼类胶原肽经验的基础上, 分别采用木瓜蛋白酶和碱性蛋白酶对海参胶原蛋白进行酶解, 比较两种工艺所得产物的得率与抗氧化性能, 旨在筛选适宜的高效制备条件, 并为其在功能食品和保健品中的应用提供理论依据。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

2.1.1. 仪器

高速台式离心机(TG16-WS 型, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司), 真空冷冻干燥机(LGT-10 型), 四环福瑞科仪科技发展(北京)有限公司), 可见分光光度计(V-1100D 型, 上海美谱达仪器有限公司), 集热式恒温加热磁力搅拌器(DF-101S 型, 杭州旌斐仪器科技有限公司), 多头磁力搅拌器(HJ-6A 型, 常州天瑞仪器有限公司), 数显恒温水浴锅(HH-6 型, 江苏天瑞仪器(中国)有限公司), 笔式 pH 计(PHB-3 型, 上海三信仪表厂)。

2.1.2. 试剂

三(羟甲基)氨基甲烷(AR, 上海麦克林生化科技股份有限公司), 乙二胺四乙酸(EDTA)(AR, 99.5%, 麦克林生化科技股份有限公司), 氯化钠(AR, 西陇化工股份有限公司), 乙酸(冰醋酸)(AR, 99.5%, 天津市富宇精细化工有限公司), 氢氧化钠(AR, 96%, 颗粒状, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司), 木瓜蛋白酶(20 万 u/g, 南宁庞博生物工程有限公司), 碱性蛋白酶(20 万 u/g, 庞博生物工程有限公司), 大连冷冻海参(固体物 80%, 辽参经营管理(大连)集团有限公司), DPPH 自由基清除能力试剂盒, 羟自由基($\cdot\text{OH}$)测定试剂盒, 抑制与产生超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)测定试剂盒, 总抗氧化能力(T-AOC)测试盒(南京建成生物工程研究所)。

2.2. 实验方法

2.2.1. 原料前处理与粗胶原纤维(CCF)的提取

参考文献[20][21]方法制备海参胶原蛋白肽, 将冷冻干海参解冻后称取 100 g, 切割成小块, 加入 100 mL 去离子水进行匀浆。所得匀浆以 9000 r/min 离心 15 min, 弃去上清液并收集沉淀。向沉淀中加入 1 L 去离子水, 搅拌 30 min 后重复离心(9000 r/min, 15 min), 弃去上清。再加入等体积去离子水, 搅拌 1 h 后以相同条件离心, 去除上清液。随后, 将沉淀溶解于 1 L 0.1 mol/L 三羟甲基氨基甲烷盐酸盐缓冲液中, 缓慢搅拌 72 h 以去除非胶原性杂质。离心后弃去上清, 再向沉淀中加入 1.5 L 去离子水, 搅拌 48 h 后离心(9000 r/min, 10 min), 弃去上清。随后重复提取一次(加入 500 mL 去离子水)。最终所得沉淀经真空冷冻干燥, 得到粗胶原纤维(Crude Collagen Fibers, CCF), 作为后续酶解底物。

2.2.2. 以木瓜蛋白酶为分解酶的海参胶原蛋白肽制备工艺

取一定量 CCF 加入去离子水, 配制成底物浓度为 5.5% 的溶液。调节 pH 至 6.7, 加入木瓜蛋白酶(添加量为 2500 U/g 底物), 于 67.8℃ 下酶解 4 h。反应结束后, 于 95℃ 加热 20 min 以灭活酶。酶解液冷却至室温后, 加入适量氯化钠搅拌进行盐析, 以 9000 r/min 离心 25 min 收集沉淀。将所得沉淀溶解于 0.5 mol/L 乙酸溶液中, 再次离心(9000 r/min, 25 min), 取沉淀经真空冷冻干燥, 得到纯度较高的海参胶原蛋白肽 - 木瓜。根据公式(1-1)计算产率:

$$\text{胶原蛋白肽产率}\% = \frac{\text{胶原蛋白肽总量g}}{\text{原料总干重g}} \times 100\% \quad (1-1)$$

2.2.3. 以碱性蛋白酶为分解酶的海参胶原蛋白肽制备工艺

取相同前处理的 CCF 样品, 按料液比 1:3 (g:mL) 加入去离子水, 调节 pH 至 7.5, 加入底物质量 2.0% 的碱性蛋白酶, 于 55℃ 下酶解 2 h。酶解完成后, 于 95℃ 保温 20 min 进行热灭酶。酶解液冷却至室温后, 按照与木瓜蛋白酶组相同的盐析和纯化流程进行处理: 加入氯化钠搅拌进行盐析, 以 9000 r/min 离心 25 min 收集沉淀; 将沉淀溶解 0.5 mol/L 乙酸溶液中, 再次离心并经真空冷冻干燥, 获得纯度较高的海参胶原

蛋白肽 - 碱性。并根据公式(1-1)计算得到产率。

2.3. 性能测定方法

2.3.1. DPPH 自由基清除率测定

使用 DPPH 自由基清除能力试剂盒进行测定。对组织样本进行样品前处理,称取约 0.1 g 组织,剪碎,加入 1 mL 的 80%甲醇溶液(或按样本重量 g: 80%甲醇溶液体积 mL 为 1:10 或 1:5 的比例加),常温匀浆,静止 10 min,取上清液待测,在避光条件下,将混合物在室温 25℃静置 30 min 使其充分混合,然后在波长 517 nm 下取出 800 μ L 的样品置入比色皿中,用无水乙醇作为基线校准,随后测量每个样品的吸光度值。

DPPH 自由基清除率的计算如公式(1-2)所示:

$$\text{DPPH 自由基清除率}\% = \left[1 - \frac{(A_{\text{样品}} - A_{\text{空白}})}{A_{\text{对照}}} \right] \times 100 \quad (1-2)$$

2.3.2. 羟自由基清除率测定

采用羟自由基测定试剂盒对羟自由基的清除效率测试。Fenton 反应是产生羟自由基的经典化学过程,其中, H_2O_2 的含量与生成的羟自由基量呈正相关。取组织样本,经生理盐水梯度稀释为 10%、5%、1%、0.5% 和 0.1% 的匀浆液。准确量取 0.2 mL 各浓度匀浆液,按试剂盒说明进行操作。所有试剂及样本于 37℃水浴预热 3 min,加入试剂三后立即混匀并准确反应 1 min,随后加入 2 mL 显色剂终止反应。充分混匀后室温静置 20 min,于 550 nm 波长下测定吸光度值,以双蒸水调零。羟自由基清除率的计算如公式(1-3)所示:

$$\text{羟自由基清除率}\% = \left[1 - \frac{(B_{\text{样品}} - B_{\text{空白}})}{B_{\text{对照}}} \right] \times 100 \quad (1-3)$$

2.3.3. 超氧阴离子自由基清除率测定

通过使用一种专门针对超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)测定的比色试剂盒,可对超氧阴离子自由基的清除效率进行评估。以维生素 C 作为标准物质,可以定量计算出待检物质对超氧阴离子自由基的作用效力。精确称取组织样本,按 1:9 (g/mL)比例加入生理盐水,冰浴条件下匀浆,制备 10%、5%、1%、0.5% 及 0.1% 的梯度浓度匀浆液,取上清液用于测定。严格依照试剂盒操作说明,依次加入相应试剂,混匀后于 37℃水浴反应 40 min,加入 2 mL 显色剂,室温静置 10 min 后,在 550 nm 波长下测定吸光度值,以双蒸水调零。

超氧阴离子自由基清除率的计算如公式(1-4)所示:

$$\text{超氧阴离子自由基清除率}\% = \left[1 - \frac{(C_{\text{样品}} - C_{\text{空白}})}{C_{\text{对照}}} \right] \times 100 \quad (1-4)$$

2.3.4. ABTS 阳离子自由基清除率测定

使用总抗氧化能力测试盒(T-AOC, 采用 ABTS 法)来评估 ABTS 阳离子自由基的清除效率。精确称取组织样本,按质量:生理盐水 = 1:9 (g/mL)的比例冰浴匀浆,制备 10%、5%、1%、0.5%、0.1% 等梯度浓度匀浆液,经离心后取上清液待测。严格按试剂盒说明依次加样,反应体系于室温避光放置 6 min 后,在 405 nm 波长下测定吸光度值,以双蒸水调零,并以 Trolox 为标准品制作,总抗氧化能力以每毫克蛋白中 Trolox 当量(U mol TE/mgprot)表示。

ABTS 阳离子自由基清除率的计算如公式(1-5)所示:

$$\text{ABTS 阳离子自由基清除率}\% = \left[1 - \frac{(D_{\text{样品}} - D_{\text{空白}})}{D_{\text{对照}}} \right] \times 100 \quad (1-5)$$

2.3.5. 总抗氧化能力(T-AOC)测定

通过采用总抗氧化能力测试盒(T-AOC, 基于比色法), 可以进行总抗氧化能力的评估。在对组织样本进行预处理时, 首先精确测量待检组织的质量, 并根据质量(g)与体积(mL)的比例 1:9, 向其中添加相应九倍体积的生理盐水。然后, 在室温条件下进行均质处理, 制备出 10%、5%、1%、0.5%、0.1%等不同浓度的组织匀浆系列。后取这些不同浓度的组织匀浆上清进行检测, 添加完试剂后, 将混合物均匀搅拌, 然后在 25℃至 37℃的环境中放置 10 min, 设置仪器的波长为 520 nm, 光路长度为 1 cm。使用双蒸水进行零点校准后, 接着测量每个样本管的吸光度值。

总抗氧化能力(T-AOC)的计算如公式(1-6)所示:

$$\text{总抗氧化能力(U/mgprot)} = \frac{E_{\text{测定}} - E_{\text{对照}}}{0.01} \div T \times \frac{V_{\text{反总}}}{V_{\text{样}}} \div \text{Cpr} \quad (1-6)$$

T : 反应时间, 30 min;

$V_{\text{反总}}$: 反应体系总体积, mL;

$V_{\text{样}}$: 取样量, mL;

Cpr : 组织匀浆蛋白浓度, mgprot/mL (prot 指蛋白)。

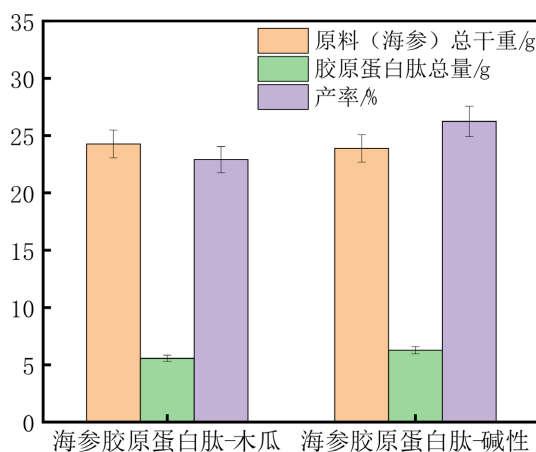
2.4. 数据处理

每组实验重复 3 次, 数据以平均值±标准偏差表示。用 SPSS 19.0 软件进行数据分析, ($P < 0.05$)表示差异显著。使用 Origin 2021 软件画图。

3. 结果与讨论

3.1. 海参胶原蛋白肽产品产率

按酶解法制备出海参胶原蛋白肽样品如图 1 海参胶原蛋白肽产率所示, 海参胶原蛋白肽-木瓜对于海参胶原蛋白肽的产率为 22.90%, 海参胶原蛋白肽-碱性的产率为 26.24%。说明碱性蛋白酶对海参胶原蛋白的特异性水解效果更好, 类似于草鱼鱼鳞胶原肽[22]、南美白对虾虾壳水解物[23]和罗非鱼鱼皮酶解物[24]。这可能归因于碱性蛋白酶是一种深度核酸内切酶, 在蛋白质肽链中具有更多的切割位点来切割肽键。不同蛋白酶作用的特性不同, 即使相同的作用底物, 这两种酶也会展现出不同的产率。



注: 不同小写字母表示实验组之间有显著性差异($P < 0.05$) (下同)。

Figure 1. Yield of collagen peptides from sea cucumber

图 1. 海参胶原蛋白肽产率

3.2. 海参胶原蛋白肽产品抗氧化活性研究

3.2.1. DPPH 自由基清除能力测定结果

根据图 2 DPPH 自由基清除能力可以看出, 2 种胶原蛋白肽对 DPPH 自由基均具有一定的清除作用, 且在所实验浓度范围内呈现良好的量效应关系, 随着浓度的增加, 其清除能力均逐渐增强。当胶原蛋白肽的浓度高于 0.5 mg/mL 时, 2 种胶原蛋白酶对 DPPH 自由的基清除能力都急剧上升。整体上, 海参胶原蛋白肽-碱性对 DPPH 自由基的清除能力最强, 其半抑制浓度(Half Maximal Inhibitory Concentration, IC_{50})为 1.1102 mg/mL, 而海参胶原蛋白肽-木瓜的 IC_{50} 为 1.1803 mg/mL 当其浓度增加到 10 mg/mL 时, 对 DPPH 自由基的清除率迅速增加到 85.39%, 比海参胶原蛋白肽-木瓜清除率高 25.41%, 表明海参胶原蛋白肽-碱性具有更高的整体抗氧化效率。

3.2.2. 羟自由基清除能力测定结果

如图 3 羟自由基清除率表明, 在 0.1%~10% 的质量浓度范围内, 海参胶原蛋白肽均表现出一定的羟自由基清除活性, 对比发现, 海参胶原蛋白肽-木瓜的 IC_{50} 为 1.1056 mg/mL, 而海参胶原蛋白肽-碱性

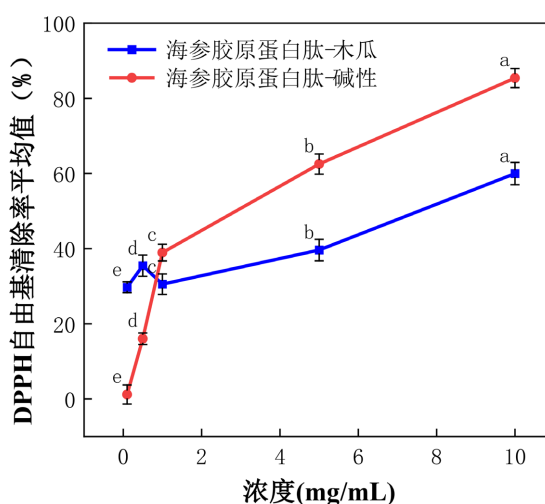


Figure 2. Determination of the DPPH radical scavenging activity of sea cucumber collagen peptide solution

图 2. 测定海参胶原蛋白肽溶液 DPPH 自由基清除率

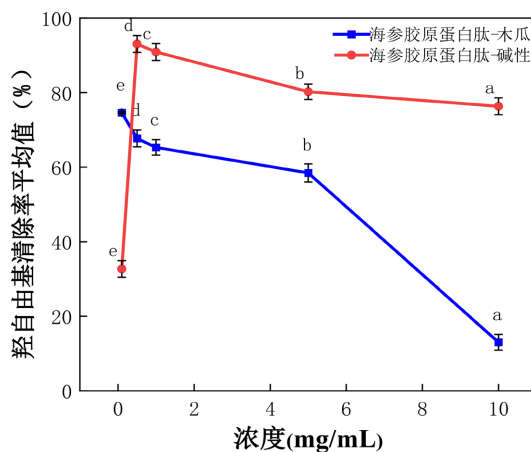


Figure 3. Hydroxyl radical scavenging activity of sea cucumber collagen peptide solution

图 3. 海参胶原蛋白肽溶液羟自由基清除率

的 IC_{50} 为 0.5863 mg/mL, 随着溶液浓度的增加, 碱性蛋白肽对羟自由基清除能力可高达 93.05%, 并在高浓度区间表现出比木瓜蛋白肽更强的清除能力, 与已报道的大西洋鳕鱼骨胶原蛋白肽相比[20], 也具有更强的羟自由基清除能力。

3.2.3. 超氧阴离子自由基清除能力测定结果

超氧阴离子自由基具有强氧化性, 可引发一系列氧化反应生成其他氧自由基, 进而导致细胞或组织损伤, 超氧阴离子自由基的清除对生物体具有重要意义, 如图 4 海参胶原蛋白肽 - 木瓜的抑制率为 $(14.38 \pm 1.18)\% \sim (37.31 \pm 2.54)\%$, 随浓度升高呈持续增强趋势; 而海参胶原蛋白肽 - 碱性的抑制率为 $(5.08 \pm 0.51)\% \sim (85.03 \pm 0.76)\%$ 。经计算, 木瓜蛋白肽的 IC_{50} 为 1.5079 mg/mL, 而碱性蛋白肽为 1.0943 mg/mL, 与已有报道的鳕鱼骨蛋白肽[25]相比, 海参胶原蛋白肽具有更强的超氧阴离子自由基清除能力。

3.2.4. ABTS 阳离子自由基清除能力测定结果

如图 5 ABTS 阳离子自由基在 0.1%~10% 的质量浓度范围内, 海参胶原蛋白肽对 ABTS 阳离子自由基

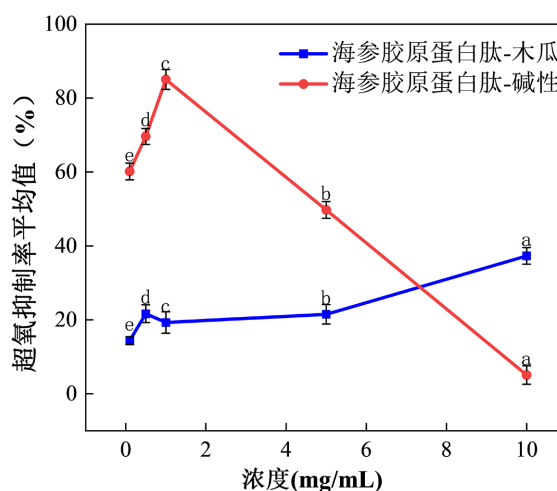


Figure 4. Superoxide anion radical scavenging activity of sea cucumber collagen peptide solution

图 4. 测定海参胶原蛋白肽溶液超氧阴离子自由基清除率

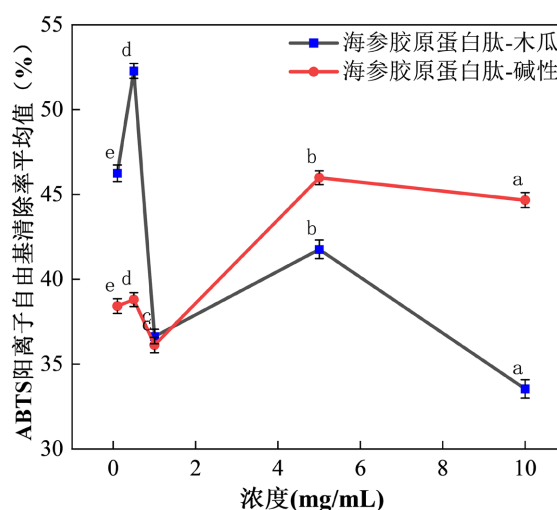


Figure 5. ABTS cation radical scavenging activity of sea cucumber collagen peptide solution

图 5. 测定海参胶原蛋白肽溶液 ABTS 阳离子自由基清除率

均表现出一定的清除活性。当胶原蛋白肽的浓度高于 0.5 mg/mL 时, 海参胶原蛋白肽 - 碱性对 ABTS 阳离子自由基清除能力随浓度增加而逐步增强可达 45.99%, 且碱性胶原蛋白肽的 IC_{50} 为 1.3958 mg/mL。综合来看, 海参胶原蛋白肽 - 木瓜在 ABTS 阳离子自由基清除活性上具有低浓度优势, 而海参胶原蛋白肽 - 碱性则在高浓度条件下表现出相对稳定的增强趋势。

3.2.5. 总抗氧化能力(T-AOC)测定结果

综合结果表明, 当浓度超过 0.5%后, 海参胶原蛋白肽 - 木瓜的活性迅速下降, 并低于海参胶原蛋白肽 - 碱性。相比之下, 海参胶原蛋白肽 - 碱性的 T-AOC 最高可达 488.89 U/mgprot, 并且随浓度变化幅度相对较小, 呈现较为平稳的趋势。海参胶原蛋白肽 - 木瓜在低浓度下具有更强的抗氧化优势, 但其高浓度活性下降的趋势限制了应用潜力; 碱性酶解产物则在整体浓度范围内表现出较为稳定的抗氧化特征。

4. 结论

本研究通过分别采用木瓜蛋白酶和碱性蛋白酶在优化酶解条件下对海参胶原蛋白进行水解, 成功制备了两类具有较好稳定性的胶原蛋白肽, 并对其产率及体外抗氧化性能进行了系统比较, 筛选碱性蛋白酶作为制备胶原蛋白肽的最佳蛋白酶。实验结果表明, 碱性蛋白酶酶解工艺的产率达到 26.24%, 显示出更优的制备效率。在浓度大于 0.5%时, 海参胶原蛋白肽 - 碱性呈良好的量效关系, 且 DPPH 自由基、羟自由基、超氧阴离子自由基和 ABTS 阳离子的清除作用的 IC_{50} 分别为 1.1102 mg/mL、0.5863 mg/mL、1.0943 mg/mL、1.3958 mg/mL。其中羟自由基的清除能力最强。当然, 本研究也存在一定局限性, 一方面, 所有实验均为体外实验; 另一方面, 尚未分离纯化出活性最高的肽段并鉴定其序列, 也未开展细胞或动物水平的体内抗氧化活性验证, 后续将针对这些问题进一步深入研究。总体来看, 碱性蛋白酶酶解工艺不仅在制备效率上具有显著优势, 同时在多项体外抗氧化指标中表现更为突出, 因而在功能食品或生物活性肽制品的开发中具有更高的应用潜力与推广价值。本研究结果为海参胶原蛋白肽的高值化利用及其功能特性的深入研究提供了科学依据。

基金项目

广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目: 高效能护肤海洋生物糖、肽及特色化妆品的研发与示范(GDNRC〔2024〕49)。

参考文献

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2024 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.
- [2] 陈蝶, 张哲, 董禹, 等. 海参冻干粉和肽粉营养成分、体外抗氧化活性研究[J]. 渔业研究, 2024: 46(5): 501-508.
- [3] 张灏, 徐慧静, 高旖旎, 等. 海参皂苷及多糖对小鼠高尿酸血症的影响[J]. 食品科学, 2013: 34(15): 219-222.
- [4] Netty, S., Fahrul, N., Ben, W.G., *et al.* (2022) Anticancer and Anticholesterol Attributes of Sea Cucumbers: An Opinion in Terms of Functional Food Applications. *Frontiers in Nutrition*, **9**, Article 986986.
- [5] Wan, H., Han, J., Tang, S., Bao, W., Lu, C., Zhou, J., *et al.* (2020) Comparisons of Protective Effects between Two Sea Cucumber Hydrolysates against Diet Induced Hyperuricemia and Renal Inflammation in Mice. *Food & Function*, **11**, 1074-1086. <https://doi.org/10.1039/c9fo02425e>
- [6] 程璐, 谢翔, 刘中原, 等. 海参水煮液皂苷的美白抗衰老功效[J]. 精细化工, 2018, 35(2): 267-271, 290.
- [7] 李龙, 傅志宇, 姜鹏飞, 等. 海参肽的生物活性及作用机制[J]. 中国食品学报, 2023, 23(12): 407-420.
- [8] 史亚萍, 张玉, 张绵松, 等. 海参肽的提取分离及其体外抗氧化活性[J]. 食品工业, 2019, 40(7): 44-48.
- [9] 任婷婷, 董秀萍, 朱蓓薇, 等. 响应面法优化海参胶原蛋白肽的制备条件[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 120-123.
- [10] Wang, L., Ma, M., Yu, Z. and Du, S. (2021) Preparation and Identification of Antioxidant Peptides from Cottonseed

- Proteins. *Food Chemistry*, **352**, Article ID: 129399. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129399>
- [11] Lv, R., Dong, Y., Bao, Z., Zhang, S., Lin, S. and Sun, N. (2022) Advances in the Activity Evaluation and Cellular Regulation Pathways of Food-Derived Antioxidant Peptides. *Trends in Food Science & Technology*, **122**, 171-186. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.026>
- [12] Ding, J., Zhu, C., Jiang, P., Qi, L., Sun, N. and Lin, S. (2023) Antarctic Krill Antioxidant Peptides Show Inferior Ige-Binding Ability and RBL-2H3 Cell Degranulation. *Food Science and Human Wellness*, **12**, 1772-1778. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2023.02.028>
- [13] Arias, L., Sánchez-Henao, C.P. and Zapata, J.E. (2023) Optimization of the Separation Conditions of Antioxidant Peptides from Red Tilapia (*Oreochromis spp.*) Viscera on Cross-Flow Filtration Ceramic Membranes. *South African Journal of Chemical Engineering*, **45**, 100-110
- [14] López-Pedrouso, M., Lorenzo, J.M., Bou, R., Vazquez, J.A., Valcarcel, J., Toldrà, M., *et al.* (2023) Valorisation of Pork By-Products to Obtain Antioxidant and Antihypertensive Peptides. *Food Chemistry*, **423**, Article ID: 136351. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136351>
- [15] Moaveni, S., Salami, M., Khodadadi, M., McDougall, M. and Emam-Djomeh, Z. (2022) Investigation of *S. limacinum* Microalgae Digestibility and Production of Antioxidant Bioactive Peptides. *LWT*, **154**, Article ID: 112468. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112468>
- [16] Zhao, M., Li, B., He, H. and Hou, T. (2023) Preparation, Identification, Computational Analysis of Antioxidative Peptides Derived from Lumbricus Protein and Prevention of UV-B Radiation-Induced Skin Damaged. *Food Bioscience*, **52**, Article ID: 102492. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102492>
- [17] 王志, 赵峰, 王珊珊, 等. 大菱鲆鱼皮抗氧化胶原肽的制备及特性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8267-8275.
- [18] 党慧敏, 郑平安, 赵文浩, 等. 南极磷虾蛋白水解产物超滤组分的抗氧化活性评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(14): 5751-5757.
- [19] 洪燕婷. 酶解海鲈鱼鳞制备抗氧化肽的工艺研究和性质鉴定[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(10): 29-37.
- [20] 李爽, 刘小芳, 冷凯良, 等. 大西洋鳕鱼骨胶原蛋白肽的抗氧化活性及稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 50-56.
- [21] 叶加兰, 吕道飞, 周坪骏, 许锋, 颜健, 袁文兵, 陈忻. 海参胶原蛋白的提取及其活性研究[J]. 生物化工, 2021, 7(6): 161-163.
- [22] 赵钰, 余小月, 熊喆, 等. 超声辅助酶解制备草鱼鳞胶原肽及其理化特性评价[J]. 现代食品科技, 2022, 38(9): 159-170.
- [23] 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]. 应用海洋学学报, 2023, 42(3): 495-506.
- [24] 曾丽琴, 陈雅茹, 刘淑集, 等. 沙丁鱼鱼鳞胶原蛋白肽的制备及其抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 214-224.
- [25] 梁鹏, 张阳, 窦媛. 鲢鱼骨酶解物抗氧化活性及其稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(11): 49-52.