班玉洁, 董诺, 马堃, 等. 糖基化鳕鱼鱼皮肽—锌螯合物的制备、表征及其抑菌活性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 103−113. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070258

BAN Yujie, DONG Nuo, MA Kun, et al. Preparation, Characterization, and Antibacterial Activity Analysis of Glycosylated Cod Fish Skin Peptide-Zinc Chelate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 103−113. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070258

· 研究与探讨 ·

糖基化鳕鱼鱼皮肽—锌螯合物的制备、表征及其抑菌活性分析

班玉洁, 董　诺, 马　堃, 赵　爽, 唐士博, 韩玲钰*, 李婷婷*

（大连民族大学生命科学学院, 生物技术与资源利用教育部重点实验室, 辽宁大连 116600）

摘　要: 为探究糖基化修饰对鳕鱼鱼皮肽螯合锌能力及抑制大肠杆菌活性的影响，明确麦芽糖及麦芽糊精糖基化鳕鱼鱼皮肽锌螯合物的结构与性质差异，本研究将麦芽糖、麦芽糊精分别与鳕鱼鱼皮肽经 4~7 h 美拉德反应制得产物后与锌离子螯合，通过液相色谱、傅里叶红外光谱等对产物进行表征，采用牛津杯扩散试验、最小抑菌浓度测定等评估抗菌活性。结果显示，麦芽糖体系 4 h 糖基化产物锌螯合能力最强，抑菌圈直径为 17.35±0.54 mm，最小抑菌浓度为 1.10 mg/mL。而麦芽糊精体系 6 h 糖基化产物锌螯合能力达峰值，抑菌能力增强，抑菌圈直径为 18.87±0.56 mm，最小抑菌浓度为 0.94 mg/mL。扫描电镜图与细胞膜完整性数据显示，两种体系都能使大肠杆菌细胞膜裂解，细胞内成分渗漏。综上，两种鳕鱼鱼皮肽锌螯合物均能通过损伤大肠杆菌细胞膜的形式致其死亡，而麦芽糊精体系产物抑菌效果更优，可为新型锌补充剂与抗菌剂开发提供依据。

关键词: 锌离子, 鳕鱼鱼皮肽, 麦芽糖, 麦芽糊精, 糖基化, 大肠杆菌, 抑菌活性

中图分类号: TS254.9　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0103−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070258

本文网刊:

Preparation, Characterization, and Antibacterial Activity Analysis of Glycosylated Cod Fish Skin Peptide-Zinc Chelate

BAN Yujie, **DONG Nuo**, **MA Kun**, **ZHAO Shuang**, **TANG Shibo**, **HAN Lingyu***, **LI Tingting***

（Key Laboratory of Biotechnology and Resource Utilization of Ministry of Education, College of Life Sciences, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China）

Abstract: This study investigated the effects of glycosylation modifications on the zinc chelation capacity and *Escherichia coli* inhibitory activity of cod skin peptides, while elucidating the structural and property differences between maltose- and maltodextrin-derived glycosylated cod skin peptide zinc complexes. This study prepared products through Maillard reactions between maltose and maltodextrin with cod skin peptides, which were conducted over a period of 4~7 hours, followed by chelation with zinc ions. The resulting products were characterized by means of liquid chromatography and Fourier-transform infrared spectroscopy, while their antimicrobial activity was evaluated through Oxford cup diffusion assays and minimum inhibitory concentration (MIC) determinations. The results showed that the glycosylation products of the maltose system at 4 h exhibited the strongest zinc chelating ability, with an inhibition zone diameter of 17.35±0.54 mm and a minimum inhibitory concentration (MIC) of 1.10 mg/mL. For the maltodextrin system, the zinc chelating ability of glycosylation products reached the peak at 6 h, accompanied by enhanced antibacterial activity, with an inhibition zone diameter of 18.87±0.56 mm and an MIC of 0.94 mg/mL. Scanning electron microscopy images and cell membrane integrity data indicated that both systems could lyse the cell membrane of *Escherichia coli* and cause the leakage of intracellular

收稿日期: 2025−07−21

基金项目: 大连金石湾实验室科技创新关键技术项目之课题。

作者简介: 班玉洁（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品贮藏加工及质量安全, E-mail: 2292287168@qq.com。

*** 通信作者:** 韩玲钰（1986−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 天然高分子与胶体化学, E-mail: 20191398@dlnu.edu.com。

李婷婷（1978−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品贮藏加工及质量安全, E-mail: jwltt@dlnu.edu.cn。

components. In conclusion, both cod skin peptide zinc chelates exert antimicrobial effects by compromising the cell membranes of *Escherichia coli*. Notably, the maltodextrin-based formulation exhibits enhanced antimicrobial activity, thereby offering a promising foundation for the development of innovative zinc supplements and antimicrobial agents.

Key words: zinc ion; cod skin peptide; maltose; maltodextrin; glycosylation; *Escherichia coli*; antibacterial activity

鳕鱼鱼皮肽作为一种新兴的生物活性肽，近年来在食品、医药及化妆品领域的研究与应用备受关注。鳕鱼皮经酶解制得的胶原蛋白肽，具有分子量小、易吸收等特点，这为其发挥多种生物活性奠定了基础[1]。研究发现鱼胶原蛋白肽具有多种健康益处，包括抗氧化活性[2]、调节血脂[3]、伤口愈合[4] 以及对骨骼关节和皮肤的健康有益[5]。在抗氧化方面，不同分子段的鳕鱼皮胶原蛋白肽对 DPPH 自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基均有较强的清除能力，且清除率与多肽浓度呈剂量依赖关系[6]，印证了其在抗氧化领域的应用价值。在抗高血压功能研究中，从阿拉斯加鳕鱼皮中鉴定出的 GP1 和 GP2 两种肽段，能显著降低高血压模型大鼠收缩压，其血管紧张素转化酶半抑制浓度分别达 0.166 mmol/L 与 0.177 mmol/L[7]，为心血管健康相关产品开发提供了新思路。在护肤领域，鳕鱼皮胶原肽可修复皮肤结构功能损伤、抑制黑色素产生[8]。总体而言，鳕鱼皮肽凭借独特优势与多重活性特性，在功能食品、医药、化妆品等领域具有广阔应用前景，未来需进一步深化研究以挖掘其潜在价值。

锌是人体健康必需的矿物质之一。它是许多金属酶必不可少的辅助因子，调节 DNA 代谢和修复、细胞增殖和免疫系统的抵抗力[9]。此外，锌离子在适当的浓度下也具有很强的抗菌能力。研究发现，含有氧化锌纳米颗粒的复合材料薄膜具有抗菌性，尤其对于喷砂处理的多层薄膜，其抗菌性能可达 99.99%[10]。因此，锌离子与生物活性肽的结合改善肠道稳定性和生理效应的研究备受研究者关注[11]。而肽锌复合物是一种由锌离子修饰的生物活性肽复合物。根据以往的报道，大多数肽锌螯合物均用于人体的锌补充制剂。锌离子与有机配体形成的有机螯合物进入体内，避免了胃肠道中植酸和膳食纤维摄入而形成不溶性复合物，从而提高锌的生物利用度[12]。例如，Matsukura 等[13] 研究 1-肌肽的锌配合物可对幽门螺杆菌产生抑制作用，出现胃溃疡病变时，可释放锌治愈溃疡。本文通过鳕鱼皮肽与锌螯合形成肽锌螯合物，有效提升锌的生物利用度，并实现“营养强化”与“抗菌作用”的协同效应，进一步拓展了肽类物质的应用领域，同时深化了其在抗菌活性方面的研究价值。

在提升蛋白螯合物性能方面，传统化学修饰需用三氯氧磷、五氧化二磷等试剂改性蛋白，反应后需多次透析、离心纯化，以防残留试剂或副产物附着于螯合物表面或包裹其中。相较而言，糖基化修饰优势显著，一方面，所用试剂多为葡萄糖、寡糖等天然、生物相容性高的糖类物质，无需复杂纯化即可降低残留隐患；另一方面，糖基化修饰能通过改变蛋白的构象和表面电荷分布，显著提升蛋白对金属离子的亲和力与选择性，这一过程不仅提高了蛋白质的稳定性，还能增强其在体内的生物相容性和抗降解能力[14]。近年来，糖基化修饰在调节蛋白功能、开发新型生物活性分子，如具有抗氧化、免疫调节活性的糖蛋白[15] 等领域进展突出，为蛋白类产品研发开辟新路径。美拉德反应是羰基化合物与氨基化合物间的复杂反应，近年来研究证实其在食品、医药领域应用潜力巨大，能提升肽与金属离子的螯合能力。例如，Seifert 等[16] 研究肽结合的美拉德反应产物 Nε-果糖基赖氨酸和 Nε-羧甲基赖氨酸与铜、锌的络合作用，结果表明蛋白质的糖基化修饰会导致蛋白质链内形成新的金属离子配位中心，而新配位中心可为金属离子提供更多结合位点，增强蛋白质与金属离子的结合力，使金属离子更稳定地存在于蛋白质结构内。有研究指出，美拉德反应分多个阶段，产物丰富，能改变反应物结构[17]。其提升螯合能力的机制主要有三：一是产物中的类黑精、还原酮等提供丰富螯合位点，如类黑精通过氮、氧原子与金属离子配位[18]；二是电子云重新分布，共轭结构提高电子离域化程度，增强静电吸引；三是形成大分子复合物，稳定包裹金属离子，减少解离。应用上，食品领域可用其制备高利用率的铁、锌螯合物作为营养强化剂，或作为抗氧化保鲜剂延缓食品变质[19−20]。

因此本研究制备了具有抗菌性能的麦芽糖-鳕鱼鱼皮肽锌螯合物和麦芽糊精-鳕鱼鱼皮肽锌螯合物，探究糖基化鳕鱼鱼皮肽锌螯合物对抑制大肠杆菌生长的影响，这一研究为水产加工副产物鱼皮加工领域提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鳕鱼鱼皮胶原低聚肽粉　滨州万嘉生物科技有限公司；麦芽糊精、麦芽糖　天津市科密欧化学试剂有限公司；细胞色素 C、赖氨酸、抑肽酶　Sigma-Aldrich Corporation；八肽　杭州专肽生物技术有限公司；四肽 GGYR　北京纵横科学公司；硫酸锌　分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；其他化学品和试剂均为分析级。

1200 型液相色谱仪　美国 Agilent Technologies 公司；SYNERGYH1 多功能酶标仪　American Bio Tek 公司；IRPrestige2 傅里叶变换红外光谱仪　Shimadzu Japan 公司；2KBTES-55 型真空冷冻干燥机　美国 Virtis 公司；UV-1600 紫外可见分光光度计　上海美普达仪器有限公司；pHS-3 精密 pH 计

上海雷磁仪器厂；H1750R 高速台式冷冻离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；4710KL-04W-B10 圆二色光谱仪　英国应用光物理公司；S-4800 扫描电子显微镜　日本 Hitachi Ltd 公司；锌离子检测试剂盒　南京建成生物工程研究所。

1.2　实验方法

1.2.1　糖基化鳕鱼鱼皮肽的制备　根据李瑶瑶等[21]的方法进行并做适当修改。将麦芽糖(3 g)和麦芽糊精(3 g)分别与鳕鱼鱼皮肽(1 g)溶于超纯水(12 mL)中，搅拌至完全溶解后调节溶液 pH 至 7.4，置于 90 ℃ 水浴锅中反应 7 h，并在第 4、5、6、7 h 时取样，再通过冷冻干燥后得到不同糖基化时间的麦芽糖-鳕鱼鱼皮肽美拉德产物(CSCP-Mal-4 h MRPs、CSCP-Mal-5 h、CSCP-Mal-6 h、CSCP-Mal-7 h)和麦芽糊精-鳕鱼鱼皮肽美拉德产物(CSCP-MD-4 h、CSCP-MD-5 h、CSCP-MD-6 h、CSCP-MD-7 h)，密封保存于−20 ℃ 冰箱中备用。

1.2.2　不同糖基化时间对糖基化鳕鱼皮肽结构的影响

1.2.2.1　分子量分析　分子量测定根据 Siewe 等[22]的方法做适当修改后进行。使用液相色谱仪进行检测，流动相为乙腈/水(40/60，v/v)，流速为 0.5 mL/min，柱温为 30 ℃，进样量 20 μL，在 214 nm 波长下进行检测。从以下标准品获得分子量校准曲线：细胞色素 C、抑肽酶，八肽和四肽 GGYR 以及赖氨酸。

1.2.2.2　接枝度的测定　接枝度测定参照廖彦超等[23]的方法并稍作修改，实验采用邻苯二甲醛法，通过监测体系中游离氨基酸含量的降低幅度来反映糖与鱼皮肽的结合程度。

OPA 试剂配制：准确称取 40 mg 邻苯二甲醛，溶于 1 mL 体积分数为 95% 的乙醇中；随后依次加入 25 mL 0.1 mol/L 四硼酸钠缓冲溶液、2.5 mL 20% 十二烷基硫酸钠溶液及 0.1 mL β-巯基乙醇，充分搅拌至完全溶解后，定容至 50 mL，混匀备用。

游离氨基定量检测与接枝度计算：取 0.05 mL 浓度为 5 mg/mL 的待测试样，与 1.35 mL 上述 OPA 试剂充分混合，室温下水浴反应 1 min 后，立即采用紫外分光光度计在 340 nm 波长下测定溶液的吸光度。以 L-亮氨酸为标准物质，配制浓度为 1~5 mmol/L 的系列标准溶液，绘制标准曲线，用于游离氨基的定量计算。接枝度计算公式如下：

$$\text{接枝度}(\%)=\left(1-\frac{\text{结合后的氨基含量 (mmol/L)}}{\text{结合前的氨基含量 (mmol/L)}}\right)\times 100 \quad \text{式（1）}$$

1.2.2.3　褐变颜色测定　通过紫外-分光光度计在 420 nm 波长下，对不同糖基化时间的美拉德反应产物的吸光度进行测定。

1.2.2.4　不同糖基化鳕鱼鱼皮肽的圆二色光谱测定　根据 Zhu 等[24]的方法稍作修改，采用圆二色光谱仪对产物的二级结构进行测定。在满足测试电压的前提下，将待测样品的质量浓度配制为 2 mg/mL。光谱扫描范围设置为 190~260 nm，扫描速度 100 nm/min，响应时间 0.25 s。使用 CDNN 软件进行样品的二级结构分析。每个样品进行 3 次平行实验。

1.2.2.5　不同糖基化鳕鱼鱼皮肽的红外光谱分析　采用溴化钾压片法，分别准确称取 3 mg 糖基化产物粉末与 300 mg 的溴化钾与产物粉末混合置于研钵中，经烘干处理后充分研磨混匀。使用傅里叶变换红外光谱仪先进行背景扫描，随后对样品进行检测，仪器参数设置为：扫描波长范围 4000~500 cm^{-1}，信号累加扫描 30 次，扫描速率控制在 0.2 cm/s。

1.2.3　糖基化鳕鱼鱼皮肽锌螯合物的制备　根据孙如男[25]的方法稍作修改，取 pH 为 4 的糖基化鳕鱼鱼皮肽溶液，按 1∶1 的质量比例与 5 mmol/L 的硫酸锌溶液混合均匀，随后置于恒温水浴摇床中，在 40 ℃ 条件下恒温反应 30 min。反应结束后，在 5000×g 下离心 5 min，取上清液并测其游离锌含，接着将体积比为 1∶3 的乙醇溶液添加到反应液中，以沉淀出糖基化鱼皮肽锌螯合物，之后在 5000×g 下离心 5 min，弃去上清液，收集沉淀物，冻干后标记为不同糖基化时间的麦芽糖-鱼皮肽锌螯合物(CSCP-Mal-4 h-Zn、CSCP-Mal-5 h-Zn、CSCP-Mal-6 h-Zn、CSCP-Mal-7 h-Zn)和不同糖基化时间的麦芽糊精-鱼皮肽锌螯合物(CSCP-MD-4 h-Zn、CSCP-MD-5 h-Zn、CSCP-MD-6 h-Zn、CSCP-MD-7 h-Zn)。

1.2.4　锌离子浓度与锌螯合能力的测定　锌螯合能力采用试剂盒测定。取 12 μL 样品加入比色试剂。在 37 ℃ 下孵育 10 min 后，测定 570 nm 处的吸光度。根据公式(2)计算游离锌离子浓度。

$$\text{锌离子含量 (μmol/L)}=C_{\text{标准}}\times\frac{A_{\text{测定}}}{A_{\text{标准}}} \quad \text{式（2）}$$

式中：$C_{\text{标准}}$为 27 μmol/L；A 测定为样品的吸光度值；A 标准为标准品的吸光度值。

锌螯合率根据 Yu 等[26]和 Han 等[27]的方法计算，结果根据计算公式(3)得出。

$$\text{锌螯合率}(\%)=\frac{\text{锌离子总浓度(mmol/L)}-\text{游离锌离子浓度(mmol/L)}}{\text{锌离子总浓度(mmol/L)}} \quad \text{式（3）}$$

式中：锌离子总浓度为 5 mmol/L。

1.2.5　抗菌活性及机理分析

1.2.5.1　牛津杯扩散试验　采用牛津杯扩散法测定螯合物对大肠杆菌的抗菌活性。将过夜培养的细菌接种在 LB 培养基中，5 min 后，将 100 μL 的 CSCP-Mal-4 h-Zn(100 mg/mL)和 100 μL 的 CSCP-MD-6 h-Zn(100 mg/mL)分别与 100 μL 相同锌含量的葡萄糖酸锌以及 100 μL 相同糖基化时间的糖基化鳕鱼

鱼皮肽加入牛津杯中，以 100 μL 75% 乙醇作为阳性对照，100 μL 无菌水作为阴性对照。置于 37 ℃ 的恒温培养箱中孵育 12 h 后，用数字卡尺测量抑制区直径，评估糖基化鳕鱼鱼皮肽-锌螯合物的抑菌活性。数值以三次重复的平均值±SD表示。

1.2.5.2 最小抑菌浓度 MIC 根据先前报道的方法确定并稍作修改，使用 96 孔微滴细胞培养板进行，每孔加入 50 μL Luria-Bertani 溶液制得的菌悬液，再分别加入 50 μL 的 CSCP-Mal-4 h-Zn 溶液和 CSCP-MD-6 h-Zn 溶液，37 ℃ 下孵育。未接种大肠杆菌的 LB 溶液作为对照，以 35、17.5、8.75、4.38、2.19、1.10、0.55 和 0.28 mg/mL 的 CSCP-Mal-4 h-Zn 终浓度评价其抑菌活性。同样重复以上操作以 30、15、7.5、3.75、1.88、0.94、0.47 和 0.24 mg/mL 的 CSCP-MD-6 h-Zn 终浓度评价其抑菌活性。利用酶标仪测定 600 nm 处的吸光度。

1.2.5.3 扫描电子显微镜 采用扫描电子显微镜观察大肠杆菌菌株的形态变化，根据 Bajpai 等[28] 的实验方法进行。无菌试管中加入 3 mL 磷酸盐缓冲盐水得到大肠杆菌菌悬液（10^7 CFU/mL），再分别加 3 mL CSCP-Mal-4 h-Zn 和 CSCP-MD-6 h-Zn 的溶液在 37 ℃ 孵育 8 h，并用 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲盐水洗涤 2~3 次，用扫描电子显微镜进行观察。采用 Diao 等[29] 的方法进行扫描电镜分析。

1.2.5.4 细胞膜的完整性 根据 Lü等[30] 的方法并略作修改，检测细胞成分释放到上清液中的情况。在 LB 溶液中培养的细菌以 4000×g 离心 15 min，洗涤并在 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲盐水溶液中重悬。细胞悬液中加入 CSCP-Mal-4 h-Zn（1.0 MIC）和 CSCP-MD-6 h-Zn（1.0 MIC）的溶液。每 2 h取 20 mL 样品，在 7000×g 离心 5 min 的条件下收集上清，260 nm 紫外-可见分光光度计监测随时间释放的核酸。同时，根据 Xu 等[31] 的方法，收集悬浮液以测定蛋白质的浓度。用相同浓度 CSCP-Mal-4 h-Zn 和 CSCP-MD-6 h-Zn 的磷酸盐缓冲盐水悬浮液进行吸收校正。

1.3 数据处理

实验至少进行 3 次重复，数值以三次重复的平均值±SD 表示。采用 Origin 2024 软件作图，IBM SPSS Statistics 27 软件进行多重比较，显著性水平为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 不同糖基化时间对糖基化鳕鱼鱼皮肽的表征

2.1.1 分子量分析 液相色谱法可通过分子尺寸差异实现鳕鱼鱼皮肽的分离，是分析鱼皮肽分子量分布的有效方法。图 1A 和图 1B 为鳕鱼鱼皮胶原蛋白肽

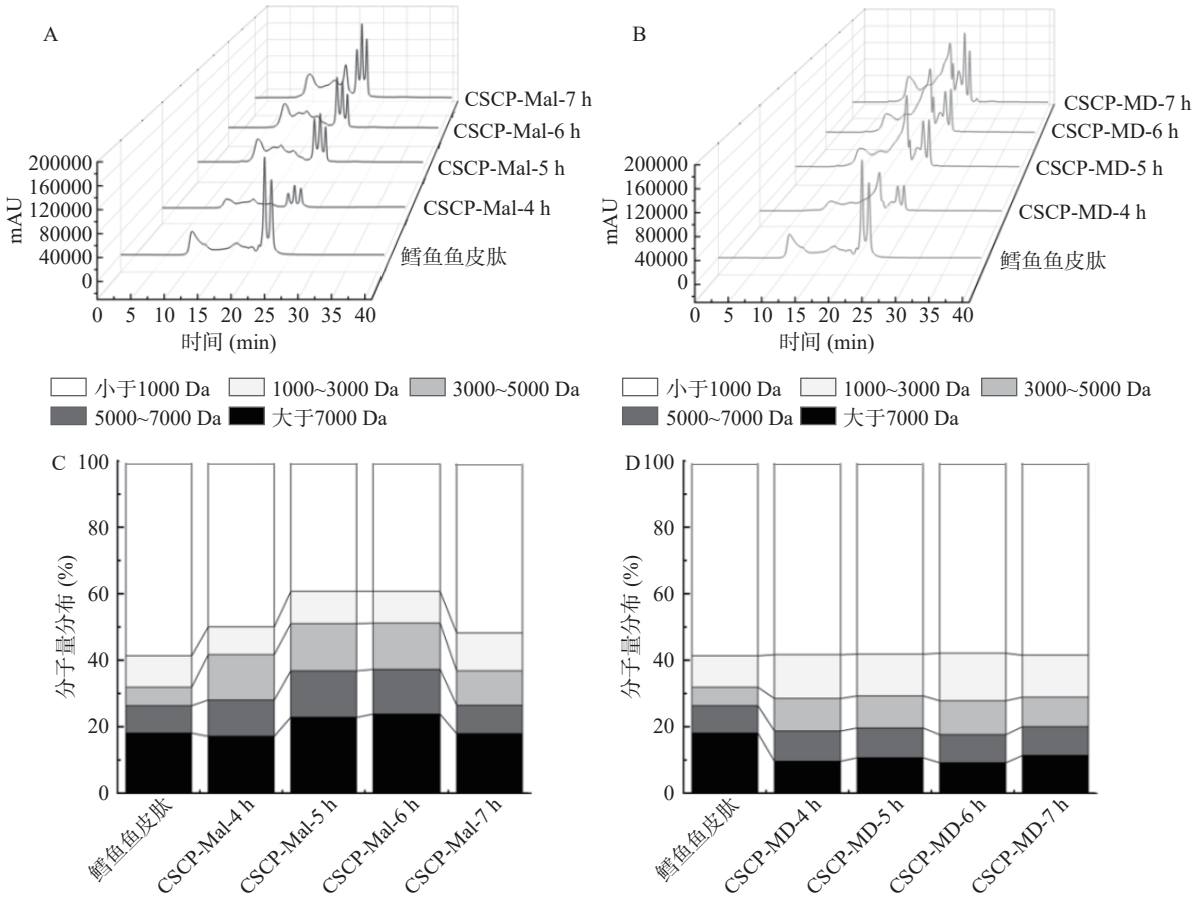


图 1 不同糖基化时间的美拉德产物的液相色谱图及分子量分布图

Fig.1 Liquid chromatography and molecular weight distribution of Maillard reaction products at different glycation times

注：A、C 为麦芽糖-鱼皮肽美拉德产物；B、D 为麦芽糊精-鱼皮肽美拉德产物。

进行液相色谱分析所得的图谱。从图 1C 的分子量分布图中可知，在麦芽糖与鱼皮肽发生美拉德反应时间为 4~5 h 时，会先生成大分子量的糖肽聚合物，产物的平均分子量明显增大。这可能是由于麦芽糖是二糖，反应活性高，其还原端能快速与鱼皮肽上的氨基发生缩合反应，同时还会发生糖分子间、肽链间的交联聚合[32]。而当反应时间为 6~7 h 时，大分子量的糖肽则会逐步降解为小分子化合物以及短肽，平均分子量明显减小。这可能是由于前期生成的糖肽聚合物结构不稳定，易分解[33]。从图 1D 的分子量分布图中可知，在麦芽糊精与鱼皮肽发生美拉德反应 4~5 h 时，大于 7000 Da 的成分占比也相对较低，随着美拉德反应时间的增加，不同分子量占比变化不大。以上结果说明不同结构的糖类与鳕鱼鱼皮肽发生美拉德反应时，在不同反应阶段其分子量变化趋势不同，麦芽糖作为二糖，在美拉德反应过程中，分子量变化较为明显。

2.1.2　接枝度及褐变颜色分析　评价美拉德反应程度的重要指标是游离氨基酸的含量，随着游离氨基酸消耗量的增多，反应越完全，接枝度也越高。接枝度结果如图 2 所示，在反应时间为 4 h 到 7 h 之间，麦芽糖与鳕鱼鱼皮肽的美拉德反应接枝度从 72.08% 增加至 73.46%，褐变程度即在 420 nm 处的吸光度从 0.04 增加至 0.061；麦芽糊精与鳕鱼鱼皮肽的美拉德反应接枝度从 68.86% 增加至 69.94%，褐变程度从 0.033 增加至 0.046。两种美拉德产物的接枝度在 4 h 之后均增长缓慢；在褐变方面，麦芽糊精的褐变程度增加幅度不如麦芽糖，这一实验结果也与 Liu 等[32] 的实验结果一致。实验结果表明，糖的种类对与鳕鱼鱼皮肽交联后的反应活性有很大影响，双糖活性大于多糖这可能是由于多糖的位阻限制了美拉德反应的范围，限制了过度的颜色变化和蛋白质聚合[34]。

2.1.3　圆二色光谱分析　不同的糖类与鳕鱼鱼皮肽发生美拉德反应的时间不同，多肽的二级结构也会发生不同的变化。圆二色光谱通常被用于研究蛋白质或多肽的二级结构变化。如图 3A 和图 3B 所示，麦芽糖-鱼皮肽的美拉德产物在糖基化时间为 4 h 时有

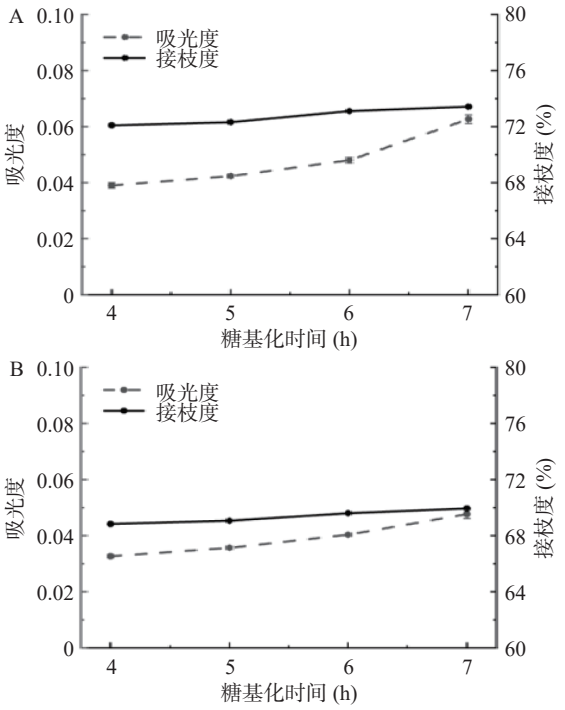


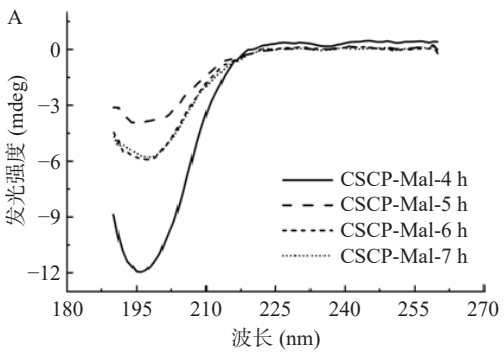
图 2　不同糖基化时间的美拉德产物的接枝度和褐变程度

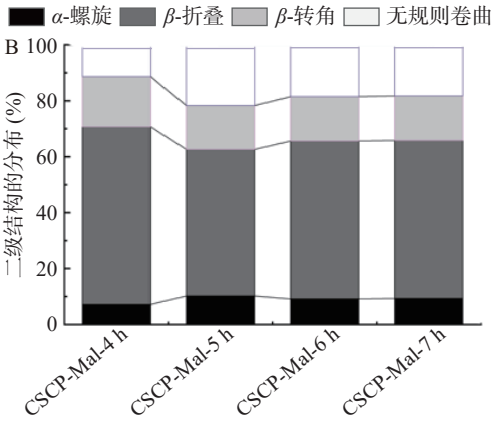
Fig.2　Grafting degree and browning intensity of Maillard products at different glycation times

注：A 为麦芽糖-鱼皮肽美拉德产物；B 为麦芽糊精-鱼皮肽美拉德产物。

较大的负峰，且随着糖基化时间的增加，美拉德产物的无规则卷曲增加，β-折叠和 β-转角减少；如图 3C 和图 3D 所示，麦芽糊精-鱼皮肽的美拉德产物在糖基化时间为 7 h 时出现较大的负峰，且随着糖基化时间的增加，其美拉德产物的无规则卷曲减少，β-折叠和 β-转角增加。上述结果表明，鱼皮肽与麦芽糖的美拉德反应产物比与麦芽糊精的反应产物更倾向于无序结构，二级结构变化更明显，这可能由于麦芽糖的还原性更强。

2.1.4　傅里叶红外光谱分析　傅里叶变换红外光谱是研究蛋白质-碳水化合物相互作用的重要技术，已被用于研究美拉德反应共轭物的性质[35]。由图 4 可知，3300~3700 cm^{-1} 处的宽峰为 O-H 伸缩振动产生[36]；1650~1690 cm^{-1} 是由 C=O 伸缩振动产生[36]，随着反应时间的增加，该基团的吸收峰强度逐渐降





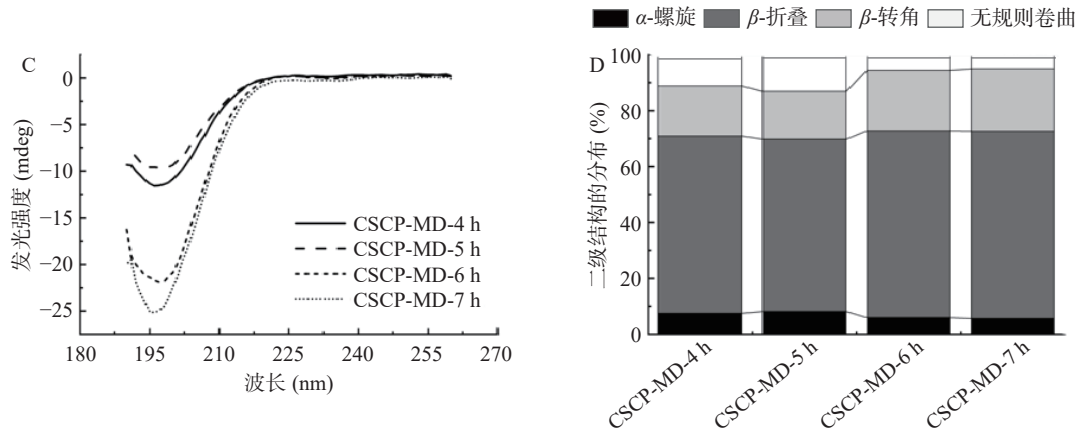


图 3 不同糖基化产物的圆二色光谱图及二级结构分布图

Fig.3 Circular dichroism spectra and secondary structure distribution maps of different glycosylation products.

注: A、C 为麦芽糖-鱼皮肽美拉德产物; B、D 为麦芽糊精-鱼皮肽美拉德产物。

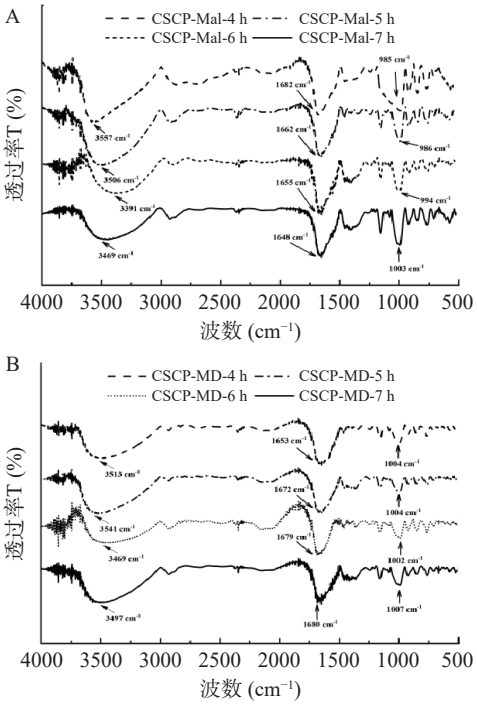


图 4 不同糖基化时间的美拉德产物的傅里叶红外光谱图

Fig.4 Fourier transform infrared spectra of Maillard reaction products at different glycosylation time

注: A 为麦芽糖-鱼皮肽美拉德产物; B 为麦芽糊精-鱼皮肽美拉德产物。

低, 麦芽糖与鱼皮肽的美拉德产物在此处的峰随着糖基化时间的增加逐渐向低波数段偏移, 而麦芽糊精与鱼皮肽的美拉德产物在此处的峰随着糖基化时间的增加逐渐向高波数段偏移, 说明了峰位置的变化与糖基化程度相关; 麦芽糖-鱼皮肽和麦芽糊精-鱼皮肽的美拉德反应共轭物在 985~1003 cm^{-1} 和 1002~1007 cm^{-1} 处显示出特征吸收带, 分别归因于 C-C 和 C-O 的拉伸和 C-H 的弯曲。随着反应时间的延长, 能带强度显著增加, 说明美拉德反应形成了 C-N 共价带[36]。

2.2 不同糖基化鳕鱼鱼皮肽锌螯合物的表征

2.2.1 锌螯合能力分析 通过同时测定锌离子浓度和锌螯合能力, 能更全面地评估糖基化时间对产物与锌相互作用的影响。锌离子浓度反映了产物中锌的总保有量, 而锌螯合能力则体现了锌与产物结合的有效性。由图 5 可知, 糖基化时间不仅会影响产物中锌的绝对含量, 还会影响锌与产物的结合效率。在 CSCP-Mal-Zn 中, 糖基化 4 h 游离锌离子含量为 403.371 μmol/L, 此时的锌螯合能力最高为 91.93%。而在 CSCP-MD-Zn 中, 其锌含量呈现先升高后降低

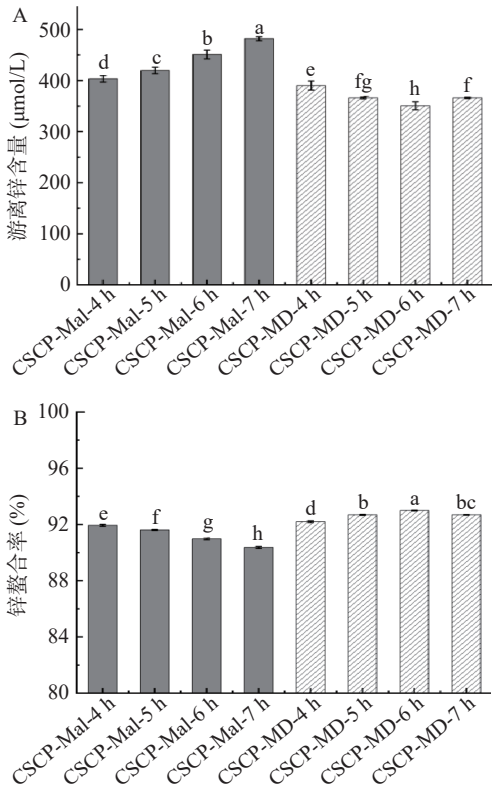


图 5 不同糖基化时间处理麦芽糖-鱼皮肽美拉德产物和麦芽糊精-鱼皮肽美拉德产物的游离锌离子含量(A)和锌螯合率(B)

Fig.5 Free zinc ion content (A) and zinc chelation rate (B) of CSCP-Mal and CSCP-MD treated with varying glycosylation durations

注: 不同小写字母表示组间存在显著性差异(P<0.05)。

的趋势，糖基化 6 h 的锌含量为 350.559 μmol/L，此时螯合能力最高为 92.99%。与 Yu 等[26] 的研究结果相比，锌螯合能力明显提高。由于麦芽糖是二糖，糖基化 4 h 时反应较快，易生成含大量活泼官能团的小分子美拉德产物。这些官能团可通过配位键快速结合锌离子，所以 4 h 锌含量高；麦芽糊精是多糖，糖基化反应慢，需要更长的糖基化时间让糖链充分断裂、降解，暴露出足够多可配位官能团，因此在 6 h 时才达到最高螯合能力。而 7 h 时则因过度交联可能导致部分配位位点被遮蔽，锌螯合能力下降。这一结果与 Mondaca 等[37] 研究结果相似，金属离子与美拉德产物的螯合能力在一定加热时间内会出现峰值。

2.2.2　圆二色光谱分析　不同的糖类与鳕鱼鱼皮肽的美拉德产物与锌离子螯合后，其二级结构也会发生不同的变化。如图 6A 和图 6C 所示，不同糖基化时间的 CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn均在 197 nm 处出现较大的负峰，而 CSCP-Mal-Zn的负峰强度更大，这说明不同的糖与鳕鱼鱼皮肽形成肽锌螯合物后，对复合物的影响不同。如图 6B 和图 6D 所示，与未螯合锌的美拉德产物相比，CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 的二级结构变化不大，表明美拉德产物与锌离子螯合后对其二级结构的影响较小。

2.2.3　傅里叶红外光谱分析　不同的糖类与鳕鱼皮肽的美拉德产物与锌离子螯合后，傅里叶变换红外光谱会发生不同的变化。如图 7A 和图 7B 为不同糖基化鳕鱼鱼皮肽-锌螯合物的傅里叶红外光谱，2970~3700 cm^{-1} 处的宽峰为 O-H 伸缩振动产生，与未螯合前相比，峰型出现宽化且强度降低[38]；1620~1660 cm^{-1} 是由 C=O 伸缩振动产生[36]，与未螯合前的产物相比，均向低波数段偏移[39]，这是由于 Zn^{2+}与羧基螯合，形成-COO-Zn 配位键，使得 C=O 键的电子云密度降低。以上变化均证明锌离子与美拉德产物成功螯合。

2.3　抗菌活性测定

2.3.1　牛津杯扩散试验　通过牛津杯扩散试验检验糖基化肽锌螯合物对大肠杆菌的抗菌活性。在图 8 中，CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 的抑制直径分别为 17.35±0.54 mm 和 18.87±0.56 mm；75% 乙醇作为阳性对照的抑制直径分别为 20.948±0.44 mm 和 21.911±0.25 mm；葡萄糖酸锌的抑制直径分别为 15.59±0.64 mm 和 16.25±0.22 mm。以上结果表明，阳性对照的抑菌效果强于糖基化肽锌螯合物和葡萄糖酸锌，CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 对大肠杆菌具有一定的抑菌活性，均显著优于葡萄糖酸锌，这与 Fang 等[38] 用章鱼肽锌螯合物抑制细菌的研究结论一致。

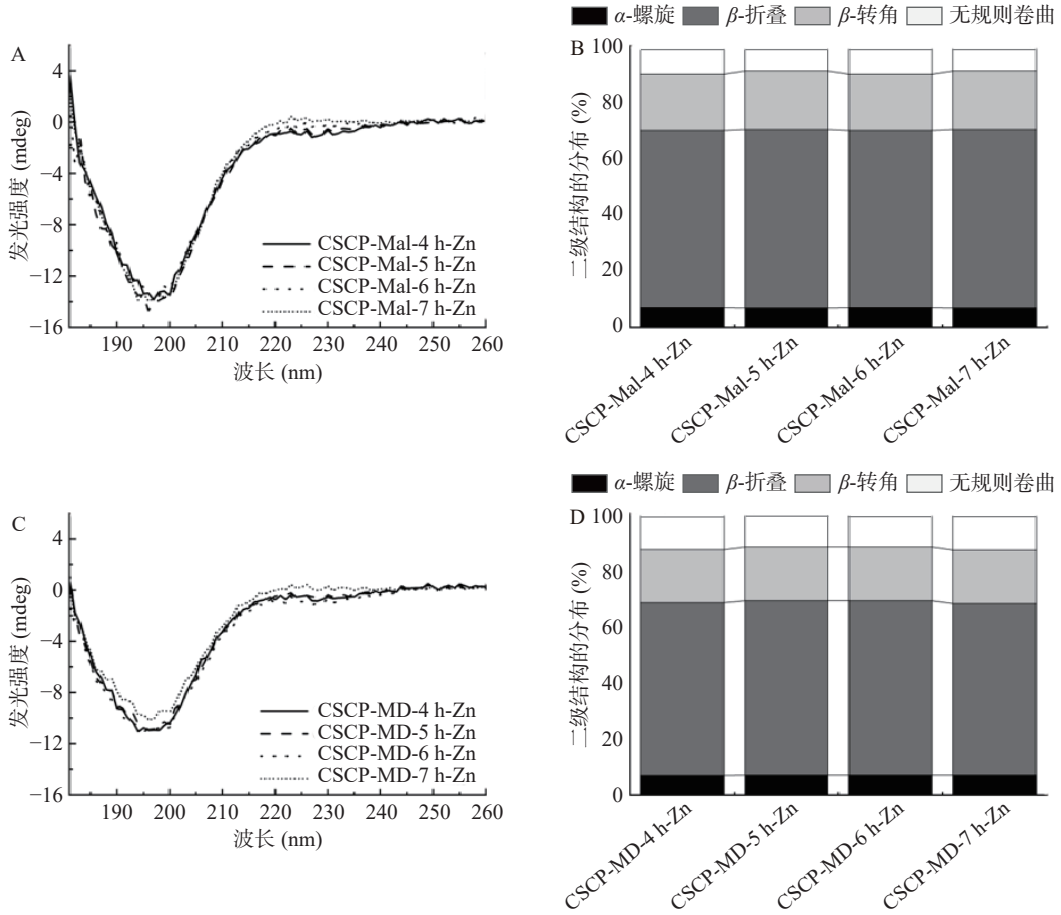


图 6　不同糖基化鳕鱼鱼皮肽-锌螯合物的圆二色光谱图及二级结构分布图

Fig.6　Circular dichroism spectra and secondary structure distribution diagrams of different glycosylated cod skin peptide-zinc chelates

注：A、C 为麦芽糖-鱼皮肽锌螯合物；B、D 为麦芽糊精-鱼皮肽锌螯合物。

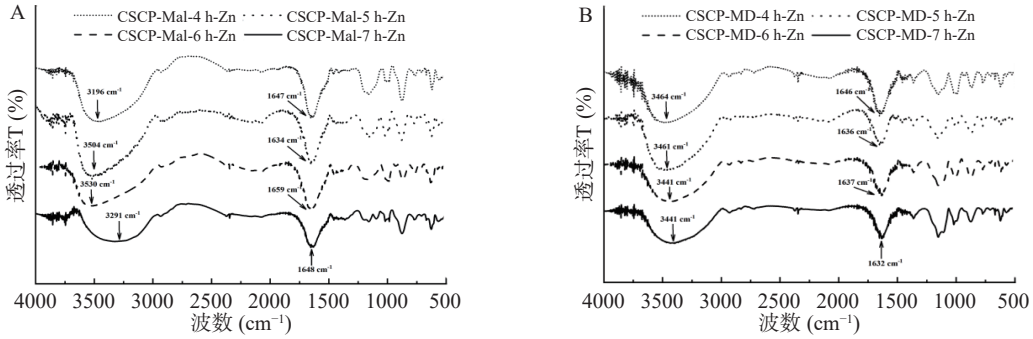


图 7　不同糖基化时间的美拉德产物螯合锌后的傅里叶红外光谱图

Fig.7　Fourier transform infrared spectra of Maillard reaction products after zinc chelation at different glycosylation times

注: A 为麦芽糖-鱼皮肽锌螯合物; B 为麦芽糊精-鱼皮肽锌螯合物。

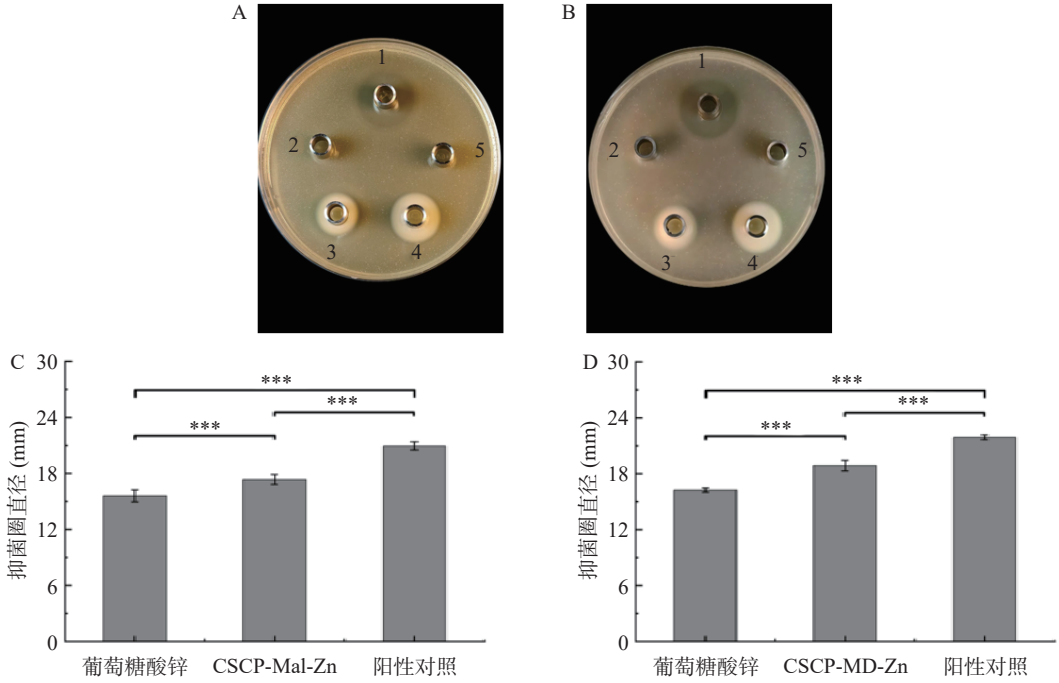


图 8　糖基化鳕鱼鱼皮肽锌-螯合物的抗菌活性

Fig.8　Antibacterial activity of glycosylated cod skin peptide zinc chelates

注: A: CSCP-Mal-Zn 的牛津杯扩散试验; 1: 75% 乙醇, 2: 麦芽糖-鱼皮肽的美拉德产物, 3: 葡萄糖酸锌(100 mg/mL), 4: CSCP-Mal-Zn(100 mg/mL), 5: 无菌水; B: CSCP-MD-Zn 的牛津杯扩散试验; 1: 75% 乙醇, 2: 麦芽糊精-鱼皮肽的美拉德产物, 3: 葡萄糖酸锌(100 mg/mL), 4: CSCP-MD-Zn(100 mg/mL), 5: 无菌水; C 和 D 分别为 CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 的抑菌圈直径(*** 表示 $P<0.001$)。

2.3.2　最小抑菌浓度　CSCP-Mal-Zn 与 CSCP-MD-Zn 对大肠杆菌的最小抑菌浓度即为在特定实验条件下, 能够完全抑制大肠杆菌生长繁殖所需的两种物质各自的最低浓度。如图 9A 和图 9B 所示, 在细菌浓度相同的环境下, CSCP-Mal-Zn 浓度为 1.1 mg/mL 和 CSCP-MD-Zn浓度为 0.94 mg/mL 是抑制被试细菌生长的最低浓度。以上结果说明, 两种美拉德反应产物 CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 均能抑制大肠杆菌生长, 且在相同实验条件下, 麦芽糊精体系形成的肽锌螯合物美拉德产物对大肠杆菌的抑制能力略优于麦芽糖体系产物。这可能是由于麦芽糊精与大肠杆菌的外膜蛋白 LamB 结合的亲和力更高并且麦芽糊精穿过外膜进入细菌细胞内部的转运效率高于麦芽糖, 从而增强对大肠杆菌的破坏作用[40]。

2.3.3　扫描电子显微镜　本研究采用了扫描电子显微镜技术了解不同糖基化鳕鱼鱼皮肽-锌螯合物对大肠杆菌形态和物理变化的直接影响。图 10A 为未经处理的大肠杆菌呈现出具有代表性的杆菌状形态学的独特特征, 大小分布均匀, 细胞完整。如图 10B 和图 10C 所示, 分别用 CSCP-Mal-4 h-Zn 和 CSCP-MD-6 h-Zn 处理后的大肠杆菌形状变得不规则且外表面粗糙凹陷, 起皱, 甚至产生了自分解。Diao 等[29]的研究也均证实, 抗菌物质损伤细胞膜后, 细菌会因渗透压失衡出现此类形态变化。

2.3.4　细胞膜的完整性　细胞膜的完整性对于细菌的发育至关重要[41]。如图 11A~图 11D 所示, 用 MIC(CSCP-Mal-Zn) MIC(CSCP-MD-Zn) 处理大肠杆菌细胞后, 测定其释放的上清蛋白和核酸,

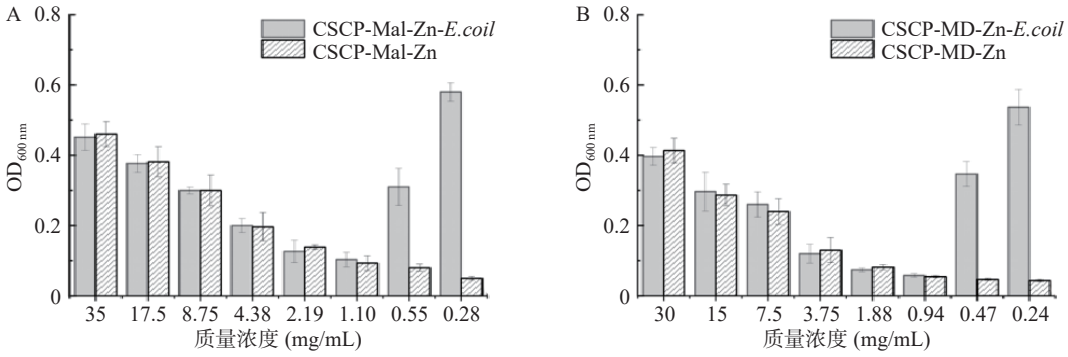


图 9　不同糖基化鳕鱼鱼皮肽锌-螯合物的最小抑菌浓度

Fig.9　Minimum inhibitory concentrations of zinc-chelating compounds derived from glycosylated cod skin peptides

注：A 为 CSCP-Mal-Zn 的最小抑菌浓度；B 为 CSCP-MD-Zn 的最小抑菌浓度。

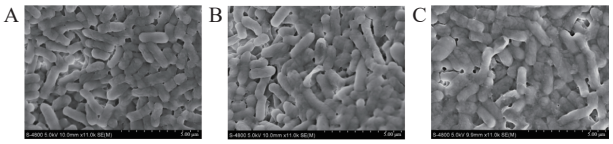


图 10　大肠杆菌的扫描电镜图像

Fig.10　Scanning electron micrographs of *Escherichia coli*

注：A 为未处理细胞；B 为 CSCP-Mal-Zn 处理细胞；C 为 CSCP-MD-Zn 处理细胞。

以评价细胞膜的完整性。结果表明，核酸（图 11A、图 11B）和蛋白质（图 11C、图 11D）释放到细菌悬浮液中，显示出 CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 处理后，均呈时间依赖性增加。添加了 CSCP-Mal-Zn 的大肠杆菌的样品核酸吸光度值由对照组的 0.09 增加到 0.63，而添加了 CSCP-MD-Zn 的大肠杆菌的样品核酸吸光度值由对照组的 0.092 增加到 0.69。此外，细胞外蛋白质浓度也随着孵育时间的延长而增加，添加了 CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 的大肠杆菌样品分别从开始的 9.77 μg/mL 和 9.9 μg/mL 增加到 53.45 μg/mL和 55.32 μg/mL。结果表明，CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 均能对细胞膜造成不可修复的损伤，导致细胞内成分渗漏，最终导致细胞死亡[38]。这与扫描电子显微镜实验的分析结果一致。

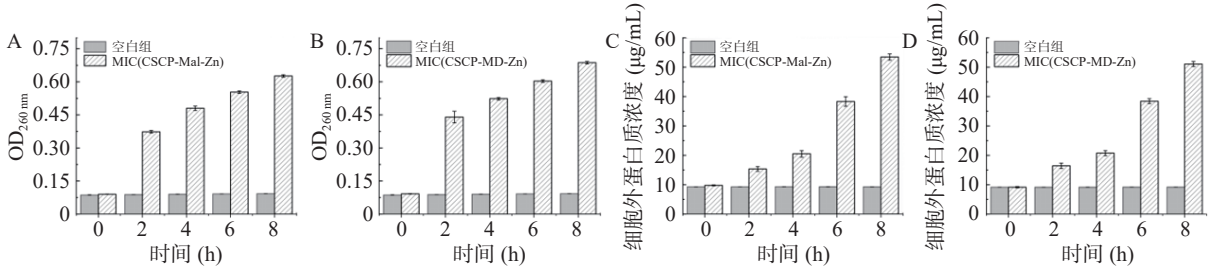


图 11　糖基化鳕鱼鱼皮肽锌-螯合物对大肠杆菌细胞膜完整性的影响

Fig.11　Effect of glycosylated cod skin peptide-zinc chelates on the membrane integrity of *Escherichia coli*

注：A 和 B 分别为 CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 对大肠杆菌核酸渗漏的影响；C 和 D 分别为 CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 对大肠杆菌蛋白质渗漏的影响。

3　结论

本研究成功制备出麦芽糖和麦芽糊精两种糖基化鳕鱼鱼皮肽锌螯合物，CSCP-Mal-Zn 和 CSCP-MD-Zn 复合物均能抑制大肠杆菌生长，其中麦芽糖因还原性强，与鱼皮肽孵育 4 h 后的肽锌螯合物的锌螯合率达 91.93%，麦芽糊精与鱼皮肽糖基化 6 h 时锌螯合率最高为 92.99%；傅里叶红外光谱和圆二色光谱证实锌离子成功螯合鳕鱼鱼皮且肽二级结构发生变化，抗菌实验显示两种螯合物均可破坏大肠杆菌细胞膜，CSCP-Mal-4 h-Zn 和 CSCP-MD-6 h-Zn 抑菌圈直径分别为 17.35±0.54 和 18.87±0.56 mm。研究明确了两种螯合物的最佳制备条件及抑菌效果差异，证实其通过破坏大肠杆菌细胞膜的完整性从而抑制大肠杆菌生长。该研究探究了多糖对美拉德产物结构、锌螯合率和肽锌螯合物抗菌活性的影响，为水产品加工废料中生物活性肽高值化利用及新型抗菌剂开发提供理论依据与思路，但存在机制研究、稳定性、工艺优化等局限，未来可从深化机制、优化工艺等方面推进研究。

© The Author(s) 2026. 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] 沈楚仪，杨最素. 鳕鱼皮胶原蛋白肽的制备与活性研究进展[J]. 安徽农业科学，2018，46(1)：16−17,51. [SHEN Chuyi, YANG Zuisu. Research progress on preparation and activity of collagen peptide from cod skin[J]. Journal of Anhui Agricultural Sci-

ences, 2018, 46(1): 16−17,51.]
[2] 李晓雅, 郭明珠, 刘书源, 等. 红鳍东方鲀鱼皮胶原蛋白制备抗酪氨酸酶活性肽及其活性表征[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 115−124. [LI Xiaoya, GUO Mingzhu, LIU Shuyuan, et al. Preparation and activity evaluation of anti-tyrosinase peptides from *Takifugu rubripes* skin collagen[J]. Food Science, 2024, 45(13): 115−124.]
[3] 刘佳欣, 郭晓俊, 缪文华, 等. 罗非鱼皮胶原蛋白肽对高脂饮食小鼠肝脏氧化应激及肠道屏障的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 55−61,86. [LIU Jiaxin, GUO Xiaojun, MIAO Wenhua, et al. Effects of tilapia skin collagen peptides on hepatic oxidative stress and intestinal barrier in mice fed with high-fat diet[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 55−61,86.]
[4] 历丽, 曹树明, 杨仲平, 等. 鱼胶原低聚肽对急诊复杂手外伤手术患者预后的影响[J]. 天津医药, 2024, 52(8): 868−871. [LI Li, CAO Shuming, YANG Zhongping, et al. Effects of fish collagen oligopeptide on operative prognosis of patients with emergency complex hand trauma[J]. Tianjin Medical Journal, 2024, 52(8): 868−871.]
[5] 尹翠元, 郭新苗, 陈德经, 等. 胶原蛋白肽功能及其作用机制研究进展[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 61−69. [YIN Cuiyuan, GUO Xinmiao, CHEN Dejing, et al. Research progress on collagen peptide function and working mechanism[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 40(3): 61−69.]
[6] 刘淇, 李慧, 赵玲, 等. 鳕鱼皮胶原蛋白肽的功能特性及抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2012, 33(1): 135−137,140. [LIU Qi, LI Hui, ZHAO Ling, et al. Study on functional properties and antioxidation activity of collagen polypeptide from codfish skin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(1): 135−137, 140.]
[7] LI Jing, ZHAI Yongnian, LIU Chenglin, et al. Two antihypertensive and antioxidant peptides derived from Alaska pollack (*Theragra chalcograma*) skin: *In silico*, *in vitro*, and *in vivo* investigation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(16): 9932−9945.
[8] HOU Hu, ZHAO Xue, LI Bafang, et al. Inhibition of melanogenic activity by gelatin and polypeptides from Pacific cod skin in b16 melanoma cells: Pacific cod skin in b16 melanoma cells[J]. Journal of Food Biochemistry, 2011, 35(4): 1099−1116.
[9] JOSHI A, MANDAL R. Review article on molecular basis of zinc and copper interactions in cancer physiology[J]. Biological Trace Element Research, 2025, 203(5): 2458−2470.
[10] DARVISH M, AJJI A. Effect of polyethylene film thickness on the antimicrobial activity of embedded zinc oxide nanoparticles [J]. ACS Omega, 2021, 6(40): 26201−26209.
[11] ZHANG Jiangning, YE Zheng. Pentapeptide-zinc chelate from sweet almond expeller amandin hydrolysates: Structural and physicochemical characteristics, stability and zinc transport ability *in vitro*[J]. Molecules, 2022, 27(22): 7936.
[12] WANG Bo, XIAO Shan, CHEN Xiangyu, et al. Structural characterisation, gastrointestinal digestion stability and transepithelial transport study of casein peptide-zinc chelate[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(5): 2770−2778.
[13] MATSUKURA T, TANAKA H. Applicability of zinc complex of L-carnosine for medical use[J]. Biochemistry Biokhimiia, 2000, 65(07): 817−823.
[14] LIU J, LU J, ZHANG C, et al. Tandem intermolecular [4 + 2] cycloadditions are catalysed by glycosylated enzymes for natural product biosynthesis[J]. Nature Chemistry, 2023, 15: 1083−1090.
[15] LIU Z Y, YUAN J T, DIN M A, et al. HucMSC-Ex alleviates inflammatory bowel disease by regulating O-GlcNAcylation modification of RACK1 in intestinal epithelial cells[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2025, 251: 114606.
[16] SEIFERT S T, KRAUSE R, GLOE K, et al. Metal complexation by the peptide-bound maillard reaction products N(epsilon)-fructoselysine and N(epsilon)-carboxymethyllysine[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(08): 2347−2350.
[17] 张翼鹏, 段焰青, 刘自单, 等. 美拉德反应在食品和生物医药产业中的应用研究进展[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 203−212. [ZHANG Yipeng, DUAN Yanqing, LIU Zidan, et al. Application of Maillard reaction in food and biomedical industries: A review[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2022, 44(1): 203−212.]
[18] VERZELLONI E, TAGLIAZUCCHI D, CONTE A. From balsamic to healthy: Traditional balsamic vinegar melanoidins inhibit lipid peroxidation during simulated gastric digestion of meat[J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(8−9): 2097−2102.
[19] YANG Yuzhang, LI Minji, LI Xingliang, et al. Preparation of soluble ferrous complex with high alkaline stability by reducing iron nanoparticle in Maillard reaction[J]. Chemical Papers, 2021, 75(7): 3227−3239.
[20] HAFSA J, ALI S M, BEN M R, et al. Functional properties of chitosan derivatives obtained through Maillard reaction: A novel promising food preservative[J]. Food Chemistry, 2021, 349: 129072.
[21] 李瑶瑶, 金圣涵, 翟瑞意, 等. 不同海参糖肽的制备及其对鲅鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(5): 115−124. [LI Yaoyao, JIN Shenghan, ZHAI Ruiyi, et al. Preparation of different sea cucumber glycopeptides and their effects on quality of Spanish mackerel surimi gel[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(5): 115−124.]
[22] SIEWE F B, KUDRE T G, BETTADAIAH B K, et al. Effects of ultrasound-assisted heating on aroma profile, peptide structure, peptide molecular weight, antioxidant activities and sensory characteristics of natural fish flavouring[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 65: 105055.
[23] 廖彦超, 刘妍, 张钧橙, 等. 糖基化改性对核桃肽结构及功能特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(2): 219−229. [LIAO Yanchao, LIU Yan, ZHANG Juncheng, et al. Effect of glycosylation modification on structure and functional properties of walnut peptides[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2025, 42(2): 219−229.]
[24] ZHU Suyin, ZHENG Yingmin, HE Shan, et al. Novel Zn-binding peptide isolated from soy protein hydrolysates: Purification, structure, and digestion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(1): 483−490.
[25] 孙如男. 南极磷虾肽-锌螯合物的制备、结构表征与生物利用度研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2021. [SUN Runan. Preparation, structural characterization and bioavailability of Antarctic krill peptide-zinc chelate[D]. Qingdao: Qingdao University, 2021.]
[26] YU Xuening, DOU Shijie, LIU Xiaoyang, et al. Role of the Maillard reaction products of oyster peptides and chitosan oligosaccharide in chelation with zinc: Restoring testicular injury and the testosterone synthesis pathway[J]. Food Function, 2025, 16: 8217−8232.
[27] HAN Lingyu, DONG Nuo, HU Bing,et al. Phosphorylated Salmon bone polypeptides: Enhancing stability and antimicrobial activity through zinc chelation[J]. Food Chemistry: X, 2025, 32:

103350.
［28］ BAJPAI V K, SHARMA A, BAEK K H. Antibacterial mode of action of *Cudrania tricuspidata* fruit essential oil, affecting membrane permeability and surface characteristics of food-borne pathogens[J]. Food Control, 2013, 32(2): 582−590.
［29］ DIAO Wenrui, HU Qingping, ZHANG Hong, et al. Chemical composition, antibacterial activity and mechanism of action of essential oil from seeds of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.)[J]. Food Control, 2014, 35(1): 109−116.
［30］ LÜ Fei, LIANG Hao, YUAN Qipeng, et al. *In vitro* antimicrobial effects and mechanism of action of selected plant essential oil combinations against four food-related microorganisms[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 3057−3064.
［31］ XU Jianguo, HU Qingping, WANG Xiangdong, et al. Changes in the main nutrients, phytochemicals, and antioxidant activity in yellow corn grain during maturation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(9): 5751−5756.
［32］ LIU Kangjing, ZHANG Xiumin, LIU Ronggang, et al. Preparation of lutein nanoparticles by glycosylation of saccharides and casein for protecting retinal pigment epithelial cells[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(12): 6347−6359.
［33］ FU Baifeng, XU Xianbing, ZHANG Xin, et al. Identification and characterisation of taste-enhancing peptides from oysters (*Crassostrea gigas*) via the Maillard reaction[J]. Food Chemistry, 2023, 424: 136412.
［34］ de OLIVEIRA F C, dos REIS C J S, de OLIVEIRA E B, et al. Food protein-polysaccharide conjugates obtained via the Maillard reaction: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(7): 1108−1125.
［35］ OLIVER C M, KHER A, McNAUGHTON D, et al. Use of FTIR and mass spectrometry for characterization of glycated caseins[J]. Journal of Dairy Research, 2009, 76(1): 105−110.
［36］ LU Fei, CHI Yujie, CHI Yuan. High-temperature glycosylation of saccharides to modify molecular conformation of egg white protein and its effect on the stability of high internal phase emulsions[J]. Food Research International, 2024, 176: 113825.
［37］ MONDACA-NAVARRO B A, ÁVILA-VILLA L A, GONZÁLEZ-CÓRDOVA A F, et al. Antioxidant and chelating capacity of Maillard reaction products in amino acid-sugar model systems: Applications for food processing[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(11): 3522−3529.
［38］ FANG Zheng, XU Liangzong, LIN Yanlan, et al. The preservative potential of *Octopus* scraps peptides−Zinc chelate against *Staphylococcus aureus*: Its fabrication, antibacterial activity and action mode[J]. Food Control, 2019, 98: 24−33.
［39］ 周燕芳, 郑泽玲, 许丽丽. 复合氨基酸与锌的螯合研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(4): 7−10. ［ZHOU Yanfang, ZHENG Zeling, XU Lili. Study on chelating compound amino acid and zinc ion[J]. Food Research and Development, 2015, 36(4): 7−10.］
［40］ FERENCI T, BOOS W. The role of the *Escherichia coli λ* receptor in the transport of maltose and maltodextrins[J]. Journal of Supramolecular Structure, 1980, 13(1): 101−116.
［41］ XIANG Qisen, KANG Chaodi, NIU Liyuan, et al. Antibacterial activity and a membrane damage mechanism of plasma-activated water against *Pseudomonas deceptionensis* CM2[J]. LWT, 2018, 96: 395−401.