



渔业科学进展
Progress in Fishery Sciences
ISSN 2095-9869, CN 37-1466/S

《渔业科学进展》网络首发论文

题目: 鱼皮明胶功能特性和改性方式研究进展
作者: 朱婧, 潘传燕, 马华威, 庞基堃, 吕敏, 蒋光正, 罗旭, 牙诗雅, 覃琦云, 魏威豪, 韦云伊, 何娇, 张智鑫
收稿日期: 2025-06-08
网络首发日期: 2025-09-09
引用格式: 朱婧, 潘传燕, 马华威, 庞基堃, 吕敏, 蒋光正, 罗旭, 牙诗雅, 覃琦云, 魏威豪, 韦云伊, 何娇, 张智鑫. 鱼皮明胶功能特性和改性方式研究进展 [J/OL]. 渔业科学进展. <https://link.cnki.net/urlid/37.1466.S.20250908.1709.001>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-9869.20250608001

http://www.yykxjz.cn/

朱婧, 潘传燕, 马华威, 庞基堃, 吕敏, 蒋光正, 罗旭, 牙诗雅, 覃琦云, 魏威豪, 韦云伊, 何娇, 张智鑫. 鱼皮明胶功能特性和改性方式研究进展. 渔业科学进展, 2026, 47(*): 00–00

ZHU J, PAN C Y, MA H W, PANG J K, LYU M, JIANG G Z, LUO X, YA S Y, QIN Q Y, WEI W H, WEI Y Y, HE J, ZHANG Z X. Recent advances in the functional properties and modification strategies of fish skin gelatin. Progress in Fishery Sciences, 2026, 47(*): 00–00

鱼皮明胶功能特性和改性方式研究进展*

朱 婧¹ 潘传燕² 马华威² 庞基堃² 吕 敏² 蒋光正² 罗 旭²
牙诗雅² 覃琦云² 魏威豪² 韦云伊^{1①} 何 娇¹ 张智鑫¹

(1. 食品与质量工程学院 南宁学院 广西 南宁 530020; 2. 广西优势特色水产品加工与贮藏工程研究中心
广西壮族自治区水产科学研究院 广西 南宁 530021)

摘要 鱼皮明胶是一种来源广泛、绿色可持续的天然胶原蛋白,具有良好的生物相容性、生物活性以及加工适应性,在食品、医药和功能材料等领域展现出广阔的应用前景。与哺乳动物明胶相比,鱼皮明胶在热稳定性、凝胶强度及界面功能等方面仍存在一定程度的性能不足,成为制约其产业化推广的主要瓶颈。本文系统梳理了鱼皮明胶的结构组成与功能特性,重点阐述其在乳化体系中的界面吸附机制及影响因素,提出从“结构-功能”耦合调控的视角,探讨其分子构象对界面行为与应用性能的影响机制。文章归纳总结了当前提升鱼皮明胶热稳定性、凝胶性能及乳化活性的主要改性策略,包括物理处理、化学交联、酶法修饰及多糖复配等方法,并对不同技术的作用机制与应用成效进行了系统比较与评估。在此基础上,进一步提出通过多种改性手段的协同优化,构建绿色、高效的功能增强体系。此外,文章还探讨了鱼皮明胶在功能食品、药物递送及生物活性材料等领域的潜在应用前景。本综述为鱼皮明胶的高值化利用提供了理论支撑与技术路径,也为水产副产物资源化和可持续产业发展提供了新的思路。

关键词 鱼皮明胶; 功能特性; 改性方法; 热稳定性; 乳化性能

中图分类号 P76 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2026)00-0000-15

* 广西自然科学基金(2025GXNFB069520)和广西重点研发项目(AB23026134; AB23026063; AB23026032)共同资助。

朱 婧, Email: jingzhu134@gmail.com

① 通信作者: 韦云伊, 副教授, Email: weiyunyi@unn.edu.cn

收稿日期: 2025-06-08, 收修改稿日期: 2025-06-26

鱼皮明胶是一种通过对鱼皮中胶原蛋白部分水解获得的天然功能性蛋白,具有良好的黏附性、乳化性及生物相容性,在食品、医药和生物材料等领域展现出广泛应用前景(Joy *et al*, 2024; Yu *et al*, 2024)。相较于传统哺乳动物明胶,鱼皮明胶来源丰富、制备过程更具可持续性,符合绿色发展理念(Derkach *et al*, 2024)。此外,其富含多种生物活性肽,具备抗氧化、抗菌等功能性特征,为功能性食品和药物开发提供了新的技术基础(张婷等, 2022)。在食品工业中,鱼皮明胶可改善质构与贮藏稳定性,例如在焙烤制品中可降低硬度、延缓老化(Chen *et al*, 2023);在生物医学领域,则常用于制备水凝胶,广泛应用于伤口愈合、药物递送及组织工程等方面,得益于其良好的生物相

容性和低免疫原性(Darmanto *et al*, 2024)。然而,尽管鱼皮明胶具有诸多优点,其在实际应用中仍存在热稳定性差、力学性能弱、界面功能不佳及不同鱼种来源差异大等问题(Deutsch Lukatsky *et al*, 2024),这在一定程度上限制了其在高性能功能食品及医药材料中的广泛推广(图 1)。因此,围绕其结构优化与功能增强的分子改性研究成为提升其应用价值的关键方向(程宽等, 2024)。

本综述旨在探讨鱼皮明胶的功能特性及其改性方法,综述了鱼皮明胶形成机制、改性方法及其研究前沿,重点探讨了物理、化学和酶法改性技术在提升其功能特性和应用潜力中的作用。通过对这些内容的总结,将为鱼皮明胶的研究与工业应用提供理论支持与实践指导。

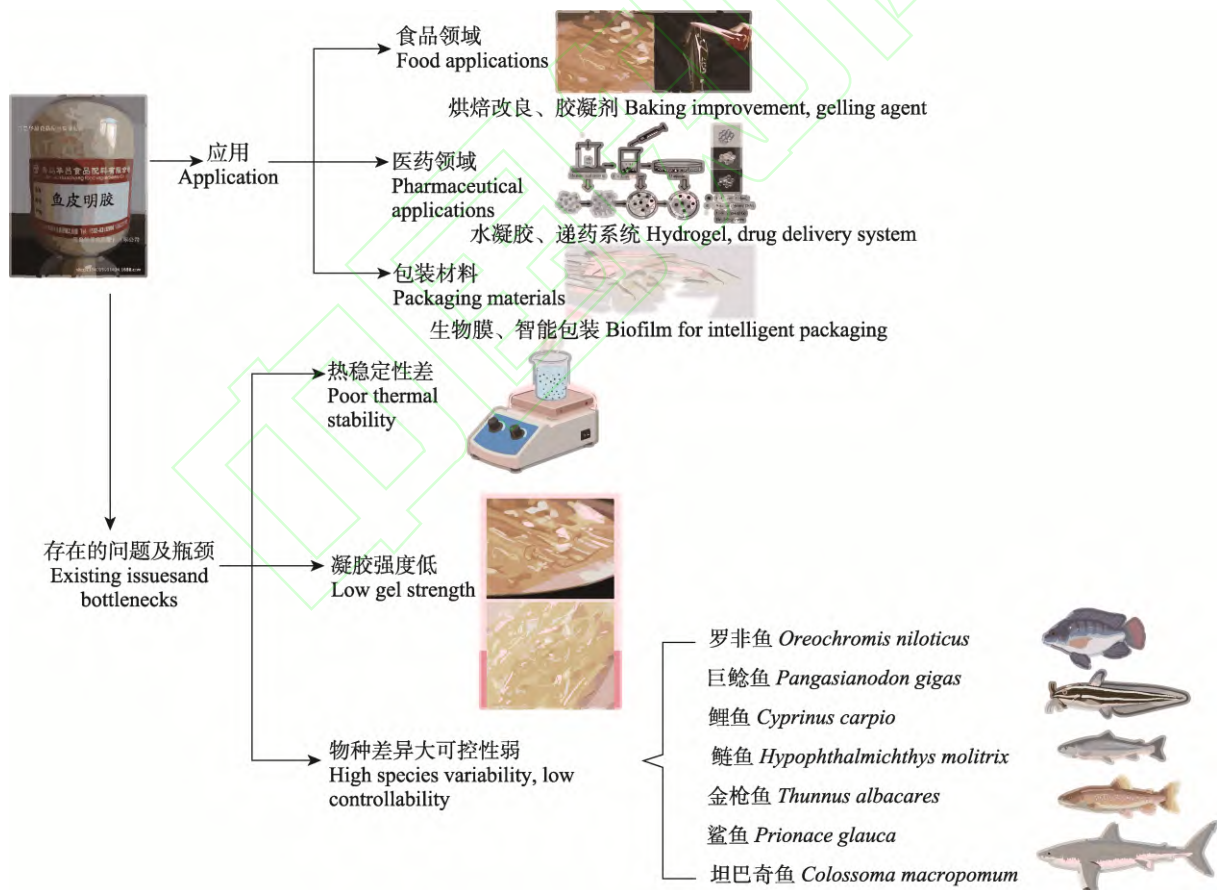


图 1 鱼皮明胶的主要功能与瓶颈

Fig.1 Key functional properties and current limitations of fish skin gelatin

1 鱼皮明胶结构特点与来源差异分析

1.1 氨基酸组成与结构特征

鱼皮明胶是由鱼皮中胶原蛋白经部分水解得到的一种天然高分子蛋白,其氨基酸组成及结构特征在很大程度上决定了其功能性能,尤其对凝胶强度、热稳定性及乳化性能具有显著影响(Derkach *et al.*, 2020; Simon *et al.*, 2003)。其中,脯氨酸(Pro)和羟脯氨酸(Hyp)是维持胶原蛋白三螺旋结构稳定性的关键氨基酸。鱼皮明胶中这两类氨基酸含量普遍偏低,致使其分子链结构松散、稳定性不足,难以形成致密有序的凝胶网络(Derkach *et al.*, 2020)。已有研究显示,大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)鱼皮胶原蛋白含量高达224.69 mg/g,显著高于其他部位,具备良好的胶原资源利用潜力(邹朝阳等, 2019)。

此外,鱼皮明胶还存在分子量分布较小、链长偏短、 β -折叠与 β -转角等二级结构比例较低等特点(Simon *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2020),使得其在凝胶过程中缔合能力弱,网络结构疏松,表现出贮藏模量低、抗剪切能力差等力学性能不足的问题。同时,甘氨酸与精氨酸等氨基酸比例的差异也会导致分子链柔性变化,影响其热响应行为与溶解性能(Sugihartono, 2016)。

1.2 凝胶性能的结构基础分析

从分子机制角度看,鱼皮明胶凝胶性能不足的核心原因可归结为三方面:一是三螺旋结构稳定性差,二是分子链结构缺陷,三是二级结构单元比例不足(Derkach *et al.*, 2020; Simon *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2020)。其脯氨酸与羟脯氨酸含量不足使三螺旋结构在热诱导条件下易解链,难以维持稳定的网络形态(Derkach *et al.*, 2020);分子链较短、分子量分布窄、缺乏足够的 β 链缔合,导致其缔合能力低,网络不易致密(Simon *et al.*, 2003); β -折叠与 β -转角等结构比例较低,进一步削弱了其凝胶结构的稳定性与弹性(Zhang *et al.*, 2020)。此外,鱼类生长环境温度普遍较低,其胶原蛋白天然适应低温生理条件,因此所提取明胶热响应性差,在常温下形成的凝胶表现为弱凝胶结构,热解性能不理想(Bekesheva *et al.*, 2018; Simon

et al., 2003)。甘氨酸与精氨酸的分布差异也会造成链段柔性变化,影响凝胶形成过程中的构象稳定性(Sugihartono, 2016)。已有研究表明,绿鳍马面鲈(*Thamnaconus septentrionalis*)鱼皮组织由表皮层、鳞片层、真皮层和皮下组织层构成,真皮层主要由胶原纤维组成,其结构特征为明胶性能提供了组织学基础(潘鲁莹等, 2024)。

尽管多种改性技术(如交联、多糖复配、酶解等)可有效提升明胶的凝胶强度,但已有研究表明,不同来源明胶对相同改性方法的响应存在显著差异(Zhang *et al.*, 2024a)。例如,某些天然多糖在提升猪、牛明胶凝胶性能方面效果显著,而在鱼皮明胶中增效作用相对有限(Ramvalho Procopio *et al.*, 2024)。这种差异提示,改性方法具有原料依赖性,受制于明胶的氨基酸组成、分子构象及其热响应机制等本质差异(Kolotova *et al.*, 2020)。因此,针对鱼皮明胶的结构缺陷,应在明确其分子结构基础上开展针对性改性策略研究,提升其凝胶性能以满足不同应用场景需求。

1.3 鱼皮明胶与其他鱼体来源明胶的对比

不同鱼体部位来源的明胶在结构组成、提取效率及功能特性方面存在显著差异。鱼皮作为鱼类胶原蛋白的重要富集部位,因其I型胶原蛋白含量较高、矿物质杂质含量较低,相较鱼骨、鱼鳞、鱼鳍等其他部位,更适合作为明胶原料(Yu *et al.*, 2024)。研究表明,鱼皮明胶通常具有较高的凝胶强度、良好的持水性和脂肪结合能力,且在乳化性和水脂稳定性方面表现优异。例如,巨鲶鱼(*Pangasianodon gigas*)与罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)皮明胶在水脂结合性、乳化活性和黏度等方面与商业牛皮明胶相近,显示出良好的应用前景(Nurilmala *et al.*, 2020; Rawdkuen *et al.*, 2013)。

相比之下,鱼骨、鱼鳞等部位的胶原蛋白由于结构更加致密、交联程度更高,虽可获得一定热稳定性优势,但其凝胶强度、乳化性能及功能活性普遍低于鱼皮明胶(Asmawati *et al.*, 2023)。此外,来源差异还导致明胶分子量分布、氨基酸组成及三螺旋结构稳定性存在本质区别,进而影响明胶的理化特性及加工适用性。值得注意的是,鱼皮明胶的提取通常伴随更

高的得率和更低的杂质含量，且通过优化酶法或化学预处理工艺，可进一步改善其功能特性(Yu *et al*, 2024)。

综上所述，鱼皮明胶凭借较高的提取效率与优异的综合性能，在食品、医药、化妆品等领域展现出广泛的应用潜力。而其他鱼体来源明胶可根据具体需求，作为低成本或特定功能的补充选择。针对不同部位明胶的系统性比较，有助于为水产资源的高值化利

用及功能性明胶产品的开发提供理论依据。

1.4 鱼皮明胶与哺乳动物明胶的对比

相较于猪皮明胶与牛骨明胶等哺乳动物明胶，鱼皮明胶在氨基酸组成、热性能和凝胶强度等方面均存在显著差异(Pranoto *et al*, 2016; Nitsuwat *et al*, 2021; Bekesheva *et al*, 2018) (表 1)。

表 1 鱼皮明胶与哺乳动物明胶的性能差异
Tab.1 Comparative analysis of functional properties between fish skin and mammalian gelatins

指标 Index	鱼皮明胶 Fish skin gelatins	哺乳动物明胶(猪/牛) Mammalian gelatin (pig/bull)	参考文献 Reference
氨基酸组成 Amino acid composition	脯氨酸与羟脯氨酸含量较低， 胶凝性较弱	脯氨酸和羟脯氨酸含量高，有利于提 高明胶的结构稳定性与凝胶强度。	Derkach <i>et al</i> , 2020; Pranoto <i>et al</i> , 2016
Bloom 值(胶强度) Bloom value (gel strength)	较低(如五线带 鲷鱼为 187)	显著更高，猪明胶通常高于牛明胶 (>200)	Pranoto <i>et al</i> , 2016; Nitsuwat <i>et al</i> , 2021, Nhari <i>et al</i> , 2011
熔点 Melting point	较低(约 31.67 °C，有时甚至 低至 7 °C)	较高(通常高于 34 °C)	Pranoto <i>et al</i> , 2016; Bekesheva <i>et al</i> , 2018; Derkach <i>et al</i> , 2024
凝固温度 Gelation temperature	较低(约 20~25 °C)	较高(约 28~30 °C)	Bekesheva <i>et al</i> , 2018
流变性能(结构与稳定性) Rheological properties (structure and stability)	弱凝胶、热稳定性差、贮藏模 量低	强凝胶、热稳定性好、贮藏模量高	Simon <i>et al</i> , 2003; Derkach <i>et al</i> , 2024

鱼皮明胶的脯氨酸与羟脯氨酸含量明显低于哺乳动物明胶，导致其三螺旋结构稳定性不足，凝胶能力显著下降(Pranoto *et al*, 2016)。其胶强性通常较低，例如五线带 鲷鱼(*Engraulis japonicus*)皮明胶的胶强度为 187，而猪、牛明胶一般可达 200 以上，其中猪明胶在不同 pH 条件下，胶强度普遍高于牛明胶(Pranoto *et al*, 2016; Nitsuwat *et al*, 2021; Nhari *et al*, 2011)。

在热性能方面，鱼皮明胶的熔点普遍低于哺乳动物明胶，一般约为 31.67 °C，部分商业化产品甚至低至 7 °C，而猪、牛明胶熔点通常超过 34 °C (Derkach *et al*, 2024; Pranoto *et al*, 2016; Bekesheva *et al*, 2018)。起凝温度方面，鱼皮明胶为 20~25 °C，而哺乳动物明胶可达 28~30 °C(Bekesheva *et al*, 2018)。这些理化性质的差异直接导致鱼皮明胶在高温加工或室温贮藏条件下的稳定性明显较弱。此外，哺乳动物明胶具有更强的分子缔合能力、更高的贮藏模量及更

稳定的流变特性，在形成强支撑凝胶网络方面优于鱼皮明胶(Simon *et al*, 2003)。因此，鱼皮明胶在热敏感体系中的应用存在一定局限性。

2 鱼皮明胶乳化性能及其影响因素

2.1 乳化机制与界面行为

鱼皮明胶作为天然蛋白质乳化剂，能够在油-水界面吸附并形成稳定的保护膜，是构建乳化体系的重要功能组分。其乳化行为主要源于明胶分子具备一定的两亲性，如图 2，鱼皮明胶能够在乳化过程中以疏水基团嵌入油相、亲水基团朝向水相，从而降低界面张力并阻止油滴聚集与合并，增强乳液稳定性(Kolotova *et al*, 2020; Feng *et al*, 2021)。

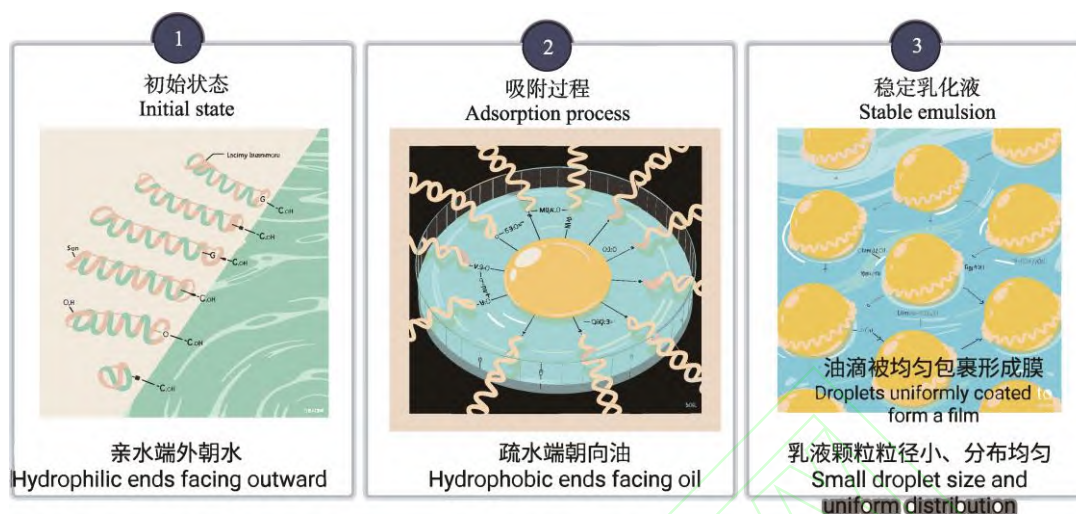


图2 鱼皮明胶在乳化液中界面吸附机制示意

Fig.2 Schematic illustration of the interfacial adsorption mechanism of fish skin gelatin in emulsions

鱼皮明胶由胶原蛋白经酸提取、热处理或酶解等方法加工而成,原始的三螺旋结构被破坏,更多的亲水和疏水基团得以暴露,增强了分子的两亲性和界面活性(Feng *et al*, 2021)。图3中乳化液的制备过程,明胶分子与油滴结合,在其表面形成保护层,减少油滴间接触和融合(Feng *et al*, 2021)。此外,明胶还能在连续相中形成一定的网络结构,从而提高体系的结构黏度与水分保持能力,有助于减小油滴粒径并进一步提升乳液的贮藏稳定性(Vall-Llosera *et al*, 2021)。

2.2 影响因素(pH、温度、乳化方式等)

鱼皮明胶乳化性能受多种环境因素、乳液组成及加工条件影响,其中 pH、温度、离子强度等物理化学条件对乳液稳定性具有显著调控作用(图4)(Liu *et al*, 2024; Huang *et al*, 2022)。体系 pH 会影响明胶分

子的电荷状态及在界面上的排列,当 pH 接近等电点时,电荷密度降低、分子间排斥作用减弱,乳液稳定性随之下降;而在偏酸或偏碱环境下,其界面吸附能力增强,更有利于形成稳定的乳滴结构(Liu *et al*, 2024)。温度是影响明胶乳化行为的另一关键因素。适当升温可促使疏水基团暴露,提高界面活性,但若温度过高则可能引起蛋白质降解,破坏结构完整性,降低其在油水界面的吸附稳定性(Huang *et al*, 2022)。

乳液组成如明胶浓度变化对乳化效果同样重要。较高的蛋白浓度有助于在油滴表面形成更致密的膜层,从而提高乳液的热稳定性与分散性(Liu *et al*, 2024)。加工条件方面,高剪切速率或高压均质等乳化方式可改善油滴粒径分布,但若均质条件控制不当,反而可能降低乳液的整体稳定性(Ho *et al*, 2024, Surh, 2007)。

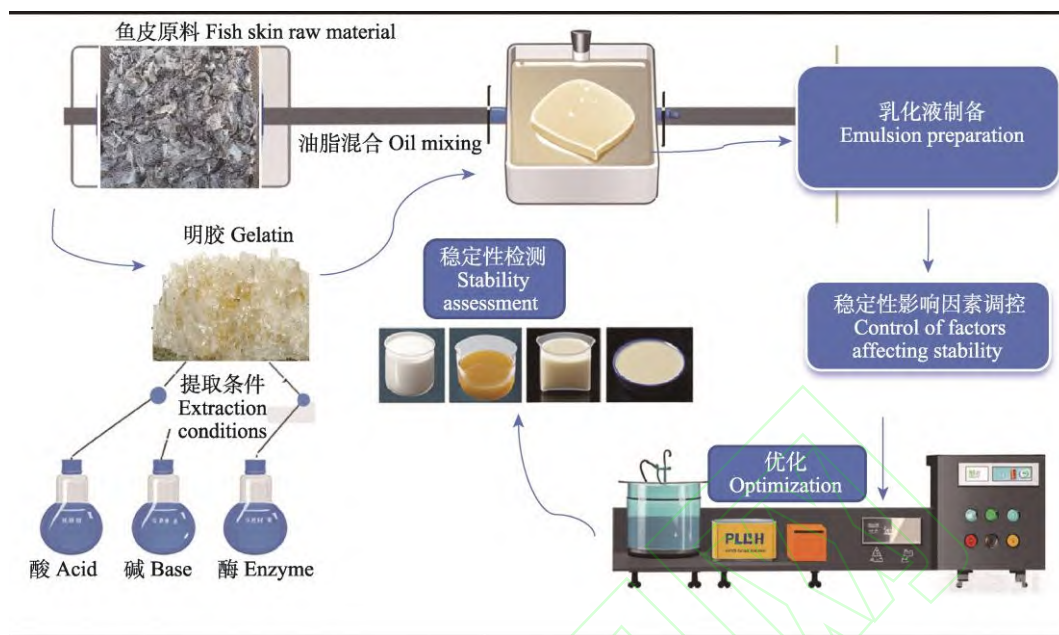


图 3 鱼皮明胶乳化液制备

Fig.3 Preparation of emulsions stabilized by fish skin gelatin

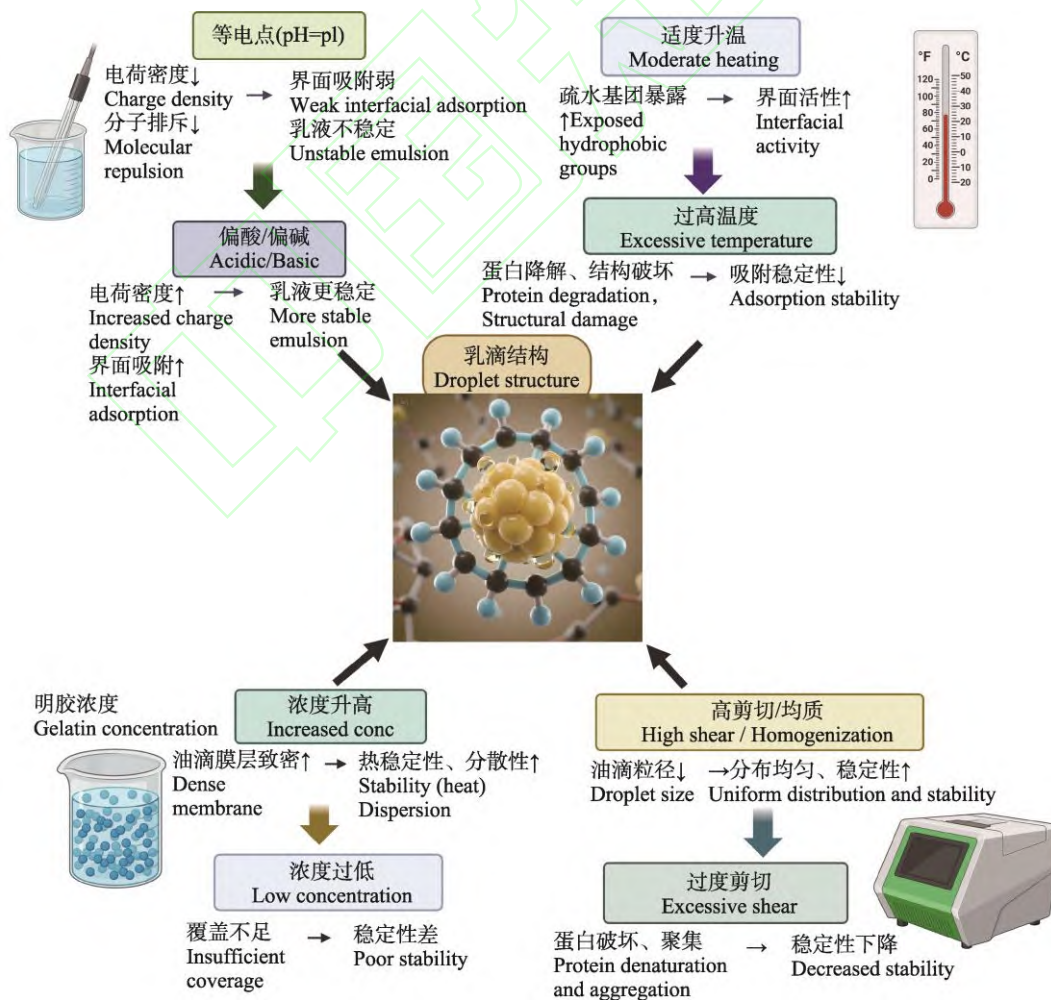


图 4 乳化性影响因素的作用机理

Fig.4 Mechanisms of factors influencing emulsification

3 鱼皮明胶改性方法

鱼皮明胶因其独特的分子结构和原料来源,在天然状态下普遍存在乳化性不稳定、热稳定性差、凝胶强度低及生物活性不稳定等关键性能短板,严重制约了其在食品、医药和功能性材料等领域的广泛应用。下文将从乳化改性、热稳定性、凝胶性能与生物活性四方面依次展开,当前主流改性方法的作用机制与应用成效,旨在为鱼皮明胶的功能提升与产业化利用提供理论依据与技术路径(图 5)。

3.1 乳化性能及其改性

鱼皮明胶乳液稳定性较低,易受 pH 值、离子强度及温度变化的影响。并且明胶的凝胶强度和热稳定性相对较弱,限制了其在高温加工食品及长期储存乳液中的应用。因此,提升鱼皮明胶的乳化性能对于其

功能性拓展及工业应用至关重要。

目前,针对鱼皮明胶乳化性能的改性研究主要集中在物理、化学及酶促改性等方面,常用方法包括亚临界水水解(subcritical water hydrolysis, SWH)、转谷氨酰胺酶(transglutaminase, TG)交联、微波提取、紫外线(ultraviolet, UV)照射及酶解共价修饰等(图 6)。这些方法通过优化分子结构、增强表面疏水性及提高分子间交联程度,以提升其稳定油-水乳液的能力。

其中,亚临界水水解可将鱼皮明胶降解为低分子量(low-molecular-weight, LMW)形式,提高乳液表面电荷密度,降低油滴尺寸,从而增强乳液的均匀性与稳定性,同时有效减少敏感活性成分(如虾青素)的降解(Ho *et al*, 2024)。转谷氨酰胺酶交联通过形成微凝胶结构,提升分子量及表面疏水性,使乳液更加均一,

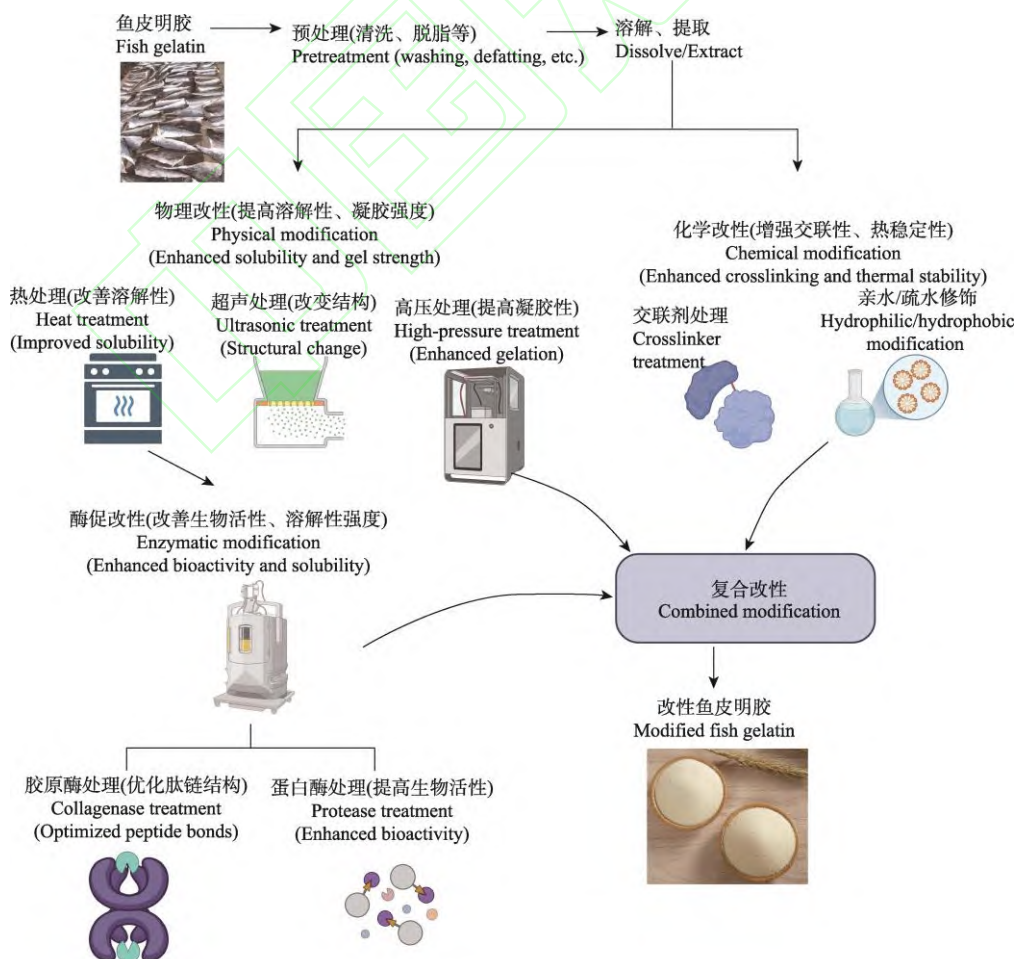


图 5 鱼皮明胶改性流程图

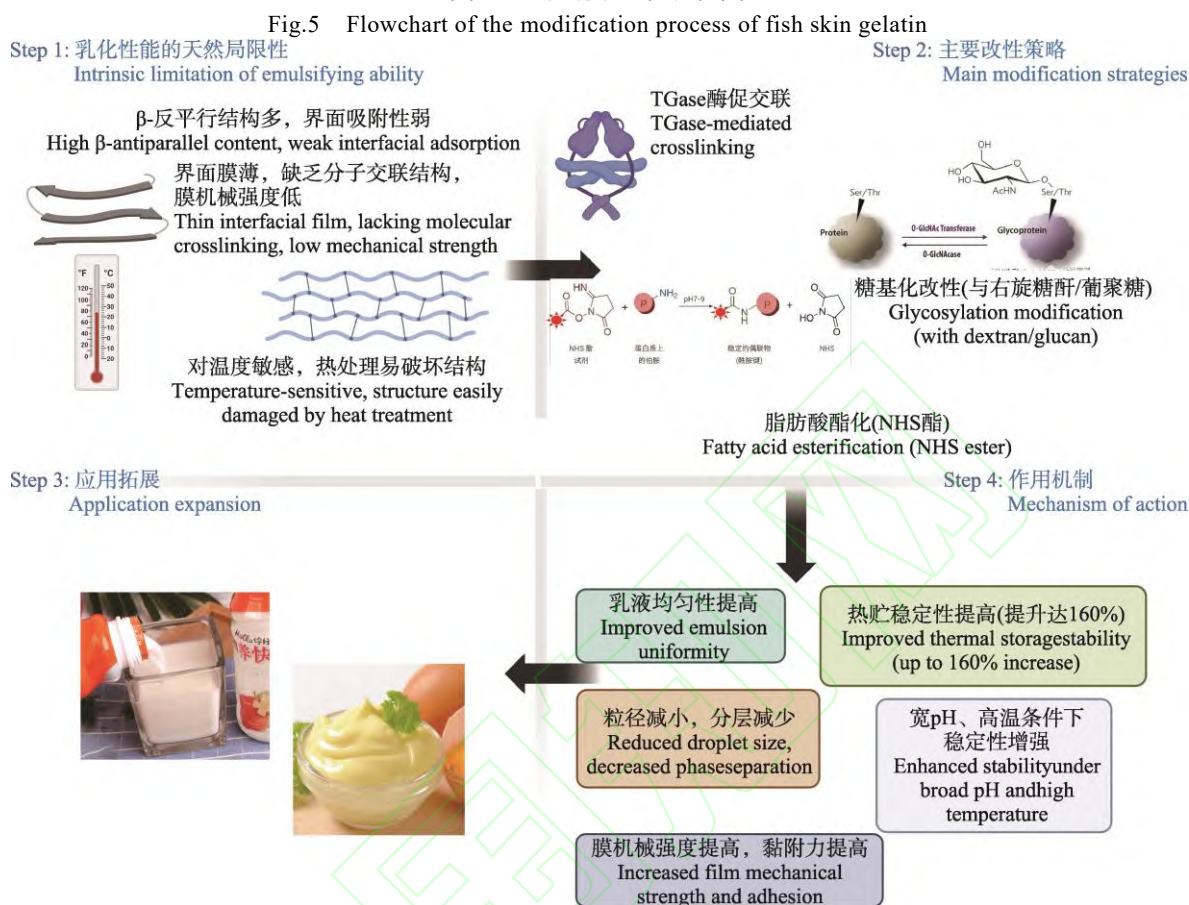


图 6 鱼皮明胶乳化性能的结构性缺陷与改性策略

Fig.6 Structural deficiencies and modification strategies for improving the emulsifying properties of fish skin gelatin

并在低温条件下表现出优异的物理稳定性(Lin *et al*, 2023)。微波提取技术则通过提高明胶的两亲性, 使其在乳化体系中表现出更高的黏度及持水能力, 从而改善乳液的稳定性(Feng *et al*, 2021)。此外, 紫外线照射可增强明胶的交联程度, 提高其乳化及起泡性能(Shakeri *et al*, 2023), 而酶解结合疏水基团修饰可提升乳化活性, 但可能对乳液的长期稳定性产生一定影响(Hidayati *et al*, 2020)。值得注意的是, 不同来源的鱼皮明胶在乳化性能方面存在显著差异。例如, 中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)、鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)、三文鱼(*Salmo salar*)及阿拉斯加鳕鱼(*Theragra chalcogramma*)明胶的乳化性能受其分子量、脯氨酸和羟脯氨酸含量及二级结构组成的影响(Yang *et al*, 2022)。研究表明, 青鳉(*Pollachius virens*)明胶在抗氧化性及乳液稳定性方面与商业化海洋明胶相当, 展现出良好的食品及化妆品

应用潜力(Yesiltas *et al*, 2022)。此外, 添加葡萄皮渣等农业副产物可优化鱼皮明胶的流变特性, 提高其作为乳化剂的适用性(Bedis Kaynarca *et al*, 2022)。

综合分析各类改性方法, 亚临界水水解和转谷氨酰胺酶交联在提升鱼皮明胶乳化性能方面最具潜力。亚临界水水解通过提高明胶表面电荷密度和降低油滴尺寸, 有效增强乳液的均匀性及稳定性; 而转谷氨酰胺酶交联则通过微凝胶结构的形成, 提高乳液在低温条件下的稳定性。这些方法不仅能够保持鱼皮明胶生物活性的同时显著提升其乳化能力, 还为其在食品、功能性材料及医药领域的进一步开发提供了重要的理论支持(Ho *et al*, 2024; Lin *et al*, 2023)。

3.2 热稳定性及其改性

鱼皮明胶在应用过程中普遍存在热稳定性差的关键问题, 严重制约了其在高温加工食品、热敏医药

制剂及功能性包装材料中的应用稳定性(Nitsuwat *et al*, 2021)。提升鱼皮明胶的热稳定性成为当前基础研究与应用开发面临的核心挑战之一。针对该问题,研究者围绕“稳定三螺旋结构、增强分子间交联、构建复合网络”三大路径,发展了包括化学改性、物理处理、共混复配及加工技术在内的多种改性方案,以有效提升其凝胶强度和熔融温度,增强其热适应能力与应用广度。

在化学和交联改性方面,添加共增强剂(如硫酸镁、蔗糖和微生物转谷氨酰胺酶 MTGase)可促进分子间的离子键或共价交联形成,从而提高网络致密性,使鱼皮明胶的凝胶强度由 170 g 显著提升至 240.89 g,熔点由 20.3 °C 提升至 22.7 °C,有效缓解其热敏感性(Koli *et al*, 2011)。紫外线(UV)照射作为一种绿色交联技术,能够激发羰基和胺基反应形成稳定交联点,在不引入化学污染的前提下提升明胶分子的热稳定性,且基本保持其原有生物功能活性(涂宗财等, 2014)。在共混改性方面,天然多糖类物质因其结构互补性而广泛应用于热稳定性调控。引入阿拉伯胶、黄原胶、拖咯豆胶等天然胶体,可增强鱼皮明胶体系的胶强度、凝胶硬度及抗离水能力,有效延缓熔融(Binsi *et al*, 2017);与角叉菜胶和海藻酸钠等多糖构建复合膜,不仅提升其热稳定性,同时增强紫外阻隔性与力学性能;其中,壳聚糖因具备正电荷及疏水性结构,可与明胶形成强相互作用,显著提高其膜材热稳定性与应用适应性(Chen *et al*, 2024)。在加工技术方面,微波辅助提取与干燥处理可缩短制备周期,提升明胶纯度与热稳定性,同时保持其活性成分完整性(涂宗财等, 2016)。;此外,超声处理联合紫外照射作为多能物理协同方式,可进一步强化明胶分子结构,显著提升其在热环境下的性能稳定性,适用于热加工场景下的食品包装等材料应用(王稳航等, 2016)。

总体而言,尽管鱼皮明胶在热稳定性方面较哺乳动物明胶略显不足,但其具备良好的水保持性与脂肪结合能力,结合上述改性策略,尤其是共增强剂添加与多糖共混,可在提升热稳定性的同时保留其生物活性和可加工性,从而显著拓展其在食品、医药及功能

性包装材料中的应用潜力(Rawdkuen *et al*, 2013)。

3.3 凝胶性能及其改性

鱼皮明胶凝胶强度较低是限制其工业应用的主要瓶颈之一,针对该结构基础所导致的凝胶强度不足,当前研究围绕改善分子结构、增强交联密度和提高聚集行为等方面开展了多种改性策略。常见方法包括亚临界水水解(SWH)、转谷氨酰胺酶(TG)交联、微波处理、紫外线照射以及酶解-共价修饰等(Xu *et al*, 2022; Feng *et al*, 2021; 涂宗财等, 2016)。这些方法可通过调控明胶分子量分布、表面疏水性及分子间相互作用,显著提升其三维网络结构的稳定性,从而增强凝胶强度和机械性能。

其中,亚临界水水解技术通过将鱼皮明胶降解为低分子量(LMW)片段,增强其在乳化界面形成能力,提高电荷密度并降低油滴粒径,从而间接改善其网络稳定性并提高凝胶强度(Ho *et al*, 2024)。转谷氨酰胺酶交联则可诱导明胶形成微凝胶结构,增加分子量和疏水性,提高分子间交联程度,使形成的凝胶在低温条件下表现出更强的稳定性(Lin *et al*, 2023)。此外,微波处理技术可改善明胶分子的亲水疏水平衡,提升其流变行为与结构致密度(Feng *et al*, 2021);紫外照射可促进分子间新型交联键的形成,提升其凝胶网络的韧性和热稳定性(Shakeri *et al*, 2023);而酶解结合疏水基团修饰可在保留生物活性的基础上增强其分子内聚力,但在乳液系统中仍需控制其稳定性变化(Hidayati *et al*, 2020)。值得注意的是,鱼皮明胶乳化性能与其凝胶强度具有高度相关性,不同鱼种来源的分子构象、氨基酸组成及二级结构特征对凝胶性能有显著影响(Binsi *et al*, 2017)。例如,青鳉明胶在抗氧化性和乳液稳定性方面已接近商业化海洋明胶水平,显示出较强的结构功能潜力(Yesiltas *et al*, 2022);此外,添加葡萄皮渣等天然多酚副产物可改善其流变特性并提升凝胶系统稳定性(Bedis Kaynarca *et al*, 2022)。

总体而言,亚临界水水解和转谷氨酰胺酶交联是目前提升鱼皮明胶凝胶强度最具前景的改性手段,前者通过改善分子结构和分散性,后者则通过增强分子

间交联作用, 共同实现凝胶结构的致密化与稳定化。这些方法不仅能显著增强鱼皮明胶的物理性能, 还具备较高的生物兼容性与工业可行性, 为其在食品胶凝剂、功能膜材料及医药载体等领域的应用拓展提供了可靠支撑(Ho *et al.*, 2024; Lin *et al.*, 2023)。

3.4 鱼皮明胶中的生物活性成分及其改性

鱼皮明胶不仅可作为功能性载体, 其自身也含有一定的生物活性成分, 主要包括源自其蛋白链的胶原多肽、功能性生物活性肽, 以及经特定加工富集的具有抗氧化、降血压、免疫调节等功能的小分子片段, 这些成分为鱼皮明胶在食品、保健品及医药领域的拓展提供了重要基础(Li *et al.*, 2024)。提高鱼皮明胶的生物活性, 是提升其应用价值的关键研究方向。针对其稳定性、生物利用度及控释性能的优化, 当前主要改性策略包括化学修饰、纳米包封技术和乳液体系等。

不同方法在改善明胶活性成分方面各具优势, 但其适用性、效率及稳定性仍存在差异。如酸水解和紫外(UV)照射, 通过调控明胶的分子结构提升其负载能力。酸水解可增强明胶的疏水性, 提高对疏水性活性物质(如姜黄素)的包封效率, 同时诱导构象变化, 增强疏水相互作用, 使其在消化过程中呈现缓释特性(Li *et al.*, 2024)。UV 照射则通过促进交联作用提高明胶的热稳定性和乳化能力, 从而改善其在食品与药物递送体系中的适用性(Shakeri *et al.*, 2023)。此外, K-卡拉胶与转谷氨酰胺酶(TGase)协同改性可增强明胶的凝胶强度和螺旋结构稳定性, 提高其在控释体系中的应用潜力(Wang *et al.*, 2023)。此外, 两步酶解结合活性炭吸附的方法, 也可用于从鱼皮明胶(FG)中制备低苯丙氨酸(Phe)多肽(LPPs), 为苯丙氨酸羟化酶(phenylalanine hydroxylase, PAH)缺乏症患者提供潜在的功能性食品原料, 满足了特定人群的营养需求(Bian *et al.*, 2025)。相比之下, 纳米包封技术凭借更精细的结构调控和更优异的包封效果, 在提升明胶生物活性方面展现出更大潜力。鱼皮明胶纳米颗粒(FGNPs)通过双步去溶剂化法制备, 可形成均一且稳定的纳米颗粒, 提高活性物质的生物利用度, 并实现缓释释放, 延长其在体内的作用时间(Subara *et al.*,

2017)。乳液体系则主要用于脂溶性活性物质的递送, 例如, 鱼皮明胶基乳液可有效保护苯甲基异硫氰酸酯等功能性化合物在胃肠道环境中的稳定性, 并显著提高其吸收率(Tang *et al.*, 2020)。此外, 明胶水凝胶因其优异的可控释特性, 被广泛应用于药物递送体系, 例如, 在阿霉素和藏红花素的负载与控释中, 水凝胶可通过可调节的物理化学特性, 提供更优的递送效果(Hermida-Merino *et al.*, 2022)。

综合比较不同改性策略, 纳米包封技术, 尤其是 FGNPs 的应用, 在提升鱼皮明胶生物活性方面最具优势。与化学改性相比, FGNPs 不仅能显著提高活性物质的稳定性和生物利用度, 还避免了化学修饰可能引发的安全性问题。相较于乳液和水凝胶体系, FGNPs 在活性物质包封效率、控释能力以及适用范围等方面均表现出更优异的性能。因此, 未来研究可进一步优化 FGNPs 的制备工艺, 以提升其负载与释放调控能力, 同时探索其在功能食品、药物递送及营养保健品领域的应用潜力(Subara *et al.*, 2017)。

3.5 其他理化性能及其改性

鱼皮明胶因其天然分子结构特点, 普遍存在溶解性差、吸水性不足及粘度偏低等问题, 限制了其在液态食品、药物递送体系及高粘度制剂中的应用(Kennell *et al.*, 2022)。同时, 受物种差异大、产品性能波动性强等因素影响, 鱼皮明胶在上述理化性能上的可控性整体偏弱, 严重制约了其工业化稳定应用。因此, 亟需通过多元化改性策略, 系统提升其结构功能一致性与应用适应性。

如表 2 所示, 在溶解性与吸水性方面, 包合复合物法(如与 HP- β -环糊精形成包合体)可通过疏水腔体包裹明胶分子, 显著提升其水溶性和分散性(Mendhe *et al.*, 2016); 此外, 固体分散体技术与共包合方法(如与尿素共包)也表现出良好效果, 但仍需在载体筛选与工艺参数方面进一步优化(Tungikar Aditya *et al.*, 2015; Dhall *et al.*, 2016)。值得注意的是, 超微粉碎技术作为一种绿色物理改性手段, 能有效减小粒径、加快水化过程, 并降低凝胶形成速率, 从而显著提升其溶解速率与吸水能力, 且适用于不同鱼种明胶原料,

降低了物种差异带来的性能不稳定性, 具有良好的产业化推广前景(Ishikawa *et al*, 2015)。

在粘度提升方面, 主要采用酶促交联(如 MTGase)、酶解处理、多糖复配以及糖基化修饰等方式(Huang *et al*, 2017; Huang *et al*, 2019, 何颖沛, 2018)。其中, 果胶复配与糖基化可在明胶分子间构建稳定三维网络结构, 增强体系的黏稠性和流变性能(Huang *et al*, 2017; Huang *et al*, 2019; Geng *et al*, 2024; 唐顺博等, 2020); 同时, pH、NaCl 及蔗糖等环境因素也可在一定程度上调控其粘度表现(曾名勇等, 2005)。

综上所述, 包含复合物法与超微粉碎技术在改善鱼皮明胶水溶性与吸水性方面成效显著, 且有助于缓解物种差异带来的产品性能不一致问题; 果胶复合与糖基化修饰在提升其粘度与流变性能方面表现出良好效果。未来可进一步结合不同来源鱼皮明胶的结构特性, 探索多种改性技术的协同效应, 系统优化其理化属性与功能稳定性, 推动鱼皮明胶向标准化、可控化与高值化方向发展, 拓展其在食品、医药及生物材

料等领域的应用潜力。

4 结论与展望

鱼皮明胶作为一种来源广泛、可持续发展的天然胶原蛋白材料, 因其优异的生物相容性、生物降解性和功能特性, 近年来在食品、医药、组织工程及智能包装等领域受到广泛关注(Joy *et al*, 2024; Yu *et al*, 2024; Derkach *et al*, 2024)。相较于传统哺乳动物明胶, 鱼皮明胶不仅具有更低的致敏风险, 更符合清真、犹太等特殊膳食需求, 同时可实现对水产加工副产物的高效利用, 契合绿色发展的产业理念(Derkach *et al*, 2024, 张婷等, 2022)。然而, 鱼皮明胶本身也存在热稳定性差、力学性能弱以及不同物种来源性能差异较大等问题, 限制了其在高端应用场景中的进一步推广(Wu *et al*, 2023; Shakeri *et al*, 2023)。针对上述瓶颈, 研究者已开展了多种改性策略的探索, 包括物理处理、酶促改性、化学交联等手段, 旨在提升其结构稳定性、乳化性能及生物活性等关键功能(Shakeri *et al*, 2023)。

表 2 鱼皮明胶改性方法比较

Tab.2 Comparison of Modification Methods for Fish Skin Gelatin

研究对象 Study object	类型 Type	方法 Method	效果 Effect	参考文献 Reference
冷水鱼胶 Cold-water fish gelatin	物理改性	超声波处理	超声处理后蛋白质尺寸的分布宽度降低, 明胶纤维平均长度减小, 使其更适合在乳液界面进行包装和稳定。	O'Sullivan, 2015
鱼皮 Fish skin	物理改性	冷冻解冻循环辅助微波	冻融处理通过破坏胶原蛋白分子间的氢键, 在原有的微波处理基础上进一步松弛了胶原结构, 暴露了更多的酶切位点, 使得凝胶强度及得率明显提高。	Feng <i>et al</i> , 2025; Chen <i>et al</i> , 2024
鱼皮明胶 Fish skin gelatin	化学改性	戊二醛交联明胶 (GLU)	交联后的样本膨胀率降低 5 倍。交联样本的抗压强度高; 且随着交联剂浓度增加而提升; 交联对释放控制的影响显著。	Mugnaini <i>et al</i> , 2023
	化学改性	葡萄糖醛交联明胶 (GAL)	GAL 交联的样本吸水能力高于 GLU 交联样本, 表明 GAL 交联网络对水分的约束力较弱。对比 GLU, GAL 的释放速率更高。	Mugnaini <i>et al</i> , 2023
	化学改性	谷氨酸酶共价修饰	TG 改性的鱼皮明胶在泡沫性能(泡沫能力及泡沫稳定性)方面具有更高的乳化性能, 乳化稳定性指数高。	Yang <i>et al</i> , 2024
	化学改性	诺尔本烯正交交联明胶	合成诺尔本烯功能化明胶(GelNB), 通过正交硫醇-诺尔本烯点击交联形成共价交联的水凝胶, 该分子可以通过硼酸酯键合(GelNB-BA)调节水凝胶的应力松弛。	Kim <i>et al</i> , 2021

鱼皮明胶、猪皮明胶、牛皮明胶 Fish skin gelatin, porcine skin gelatin, bovine skin gelatin	复合改性	低甲氧基果胶(LMP)与 3 种类型明胶的复合共聚作用	适当的明胶与 LMP 质量比以及适当的 pH 条件下,可获得具有良好沉淀分离效果的明胶-LMP 复合共聚物。鱼皮明胶在负载能力和过氧化值方面与哺乳动物明胶相当。	Zhang <i>et al</i> , 2024b
冷血鱼类明胶 Cold-blooded fish gelatin	复合改性	明胶与海藻酸钠形成聚电解质复合物	在海藻酸钠与鱼皮明胶的最佳质量比值下, 复合物的溶胶-凝胶转变温度、弹性模量和粘度都得到提升。	Derkach <i>et al</i> , 2021
	复合改性	明胶与卡拉胶复合改性	在卡拉胶/明胶最佳质量比下, G 和 η 达到最大值, 表明复合物具有更强的凝胶结构。	Derkach <i>et al</i> , 2022
	复合改性	明胶与壳聚糖复合改性	冷水鱼皮明胶的酰胺 A 吸收带(3401 cm^{-1})在与壳聚糖复合后移动至 3439 cm^{-1} 。表明壳聚糖的氨基与明胶的羧基形成了氢键和静电相互作用。	Derkach <i>et al</i> , 2022

结合当前研究现状, 鱼皮明胶的未来发展可聚焦于以下 3 个方向:

(1)高值化利用方向: 通过优化提取工艺(如酶解、热处理及膜分离技术)调控鱼皮明胶的分子结构, 可有效提升其热稳定性与功能多样性, 为其在功能食品、药物载体及生物活性肽开发等领域的高附加值利用奠定基础(Yu *et al*, 2024, Wu *et al*, 2023, Dhall *et al*, 2016)。

(2)与新型材料融合: 鱼皮明胶与天然或合成高分子材料的复合(如聚乙烯二丙烯酸酯、果胶等), 可显著改善其力学性能与结构可控性, 在组织工程支架、智能水凝胶、控释药物系统等生物医学领域展现出良好的应用前景(Walker, 2013; Ishikawa *et al*, 2015; Yu *et al*, 2023)。其中, 基于其可调结构与缓释特性构建的新型载药系统, 已在细胞培养和缓释制剂中展现出优异性能(Ishikawa *et al*, 2015)。

(3)环境友好型绿色改性策略: 顺应绿色化工趋势, 未来可更多引入天然低毒交联剂(如多酚、植物提取物等)进行功能化改性, 避免传统化学改性中潜在的环境污染问题。此外, 鱼皮明胶与天然纤维、藻类等复合材料在重金属离子吸附、水体净化等环境治理中的应用, 已显示出其在生态材料领域的潜力(Dhall *et al*, 2016)。

综上所述, 鱼皮明胶作为一种兼具功能性与可持续性的天然生物基材料, 在多领域的高值化利用前景广阔。随着改性技术的发展与多学科交叉的深入, 未来研究应在提升其应用性能的同时, 注重保持其绿色、安全及经济优势, 推动其在食品安全、健康医疗与生态环保等战略性新兴产业领域的广泛应用与产业转化。

参 考 文 献

- ASMAWATI A, FAHRIZAL F, ARPI N, *et al*. The characteristics of gelatin from fish waste: A review. *Aceh Journal of Animal Science*, 2023, 8(3): 99–107
- BEDIS KAYNARCA G, GÜMÜŞ T, DAMLA ALTAN KAMER D. Rheological properties of fish (*Sparus aurata*) skin gelatin modified by agricultural wastes extracts. *Food Chemistry*, 2022, 393: 133348
- BEKESHEVA A A, YAKUBOVA O S. Scientific substantiation of physical properties of fish gelatin. *Vestnik of Astrakhan State Technical University Series: Fishing industry*, 2018: 132–140
- BIAN Q Q, ZHANG W J, CHEN L J, *et al*. Preparation and characterization of fish gelatin polypeptides with low phenylalanine contents using enzymatic hydrolysis and activated carbon adsorption. *Food Hydrocolloids*, 2025, 163: 111153
- BINSI P K, NAYAK N, SARKAR P C, *et al*. Gelation and thermal characteristics of microwave extracted fish gelatin-natural gum composite gels. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(2): 518–530
- CHEN H R, LAN X N, GUAN X, *et al*. Comparative study on

- the effects of chitosan, carrageenan, and sodium alginate on the film-forming properties of fish skin gelatin. *LWT*, 2024, 199: 116111
- CHEN X Y, SU T Y, YANG H X, *et al.* Effect of fish skin gelatin on characteristics and staling properties of bread made from pre-baked frozen dough. *Food Bioscience*, 2023, 55: 103070
- CHENG K, YI Y F, WANG Y, *et al.* Research progress on the extraction and application of active collagen from marine sources. *Food Research and Development*, 2024, 45(16): 198–204 [程宽, 易一帆, 王越, 等. 海洋源活性胶原的提取及其应用研究进展. *食品研究与开发*, 2024, 45(16): 198–204]
- DARMANTO Y S, PUTUT H R, SUSANTI S, *et al.* Chemical, physical, and sensory properties of various fish skin gelatin fortified taro flour - seaweed based analogue rice. *Food Research*, 2024, 8(4): 68–74
- DERKACH S R, KOLOTOVA D S, VORON'KO N G, *et al.* Rheological properties of fish gelatin modified with sodium alginate. *Polymers*, 2021, 13(5): 743
- DERKACH S R, VORON'KO N G, KUCHINA Y A, *et al.* Modified fish gelatin as an alternative to mammalian gelatin in modern food technologies. *Polymers*, 2020, 12(12): 3051
- DERKACH S R, VORON'KO N G, KUCHINA Y A, *et al.* Rheological properties of fish and mammalian gelatin hydrogels as bases for potential practical formulations. *Gels*, 2024, 10(8): 486
- DERKACH S R, VORON'KO N G, KUCHINA Y A. Intermolecular interactions in the formation of polysaccharide-gelatin complexes: A spectroscopic study. *Polymers*, 2022, 14(14): 2777
- DEUTSCH LUKATSKY A T, DAN Y, MIZRAHI L, *et al.* Hydrogels based on crosslinked polyethylene glycol diacrylate and fish skin gelatin. *European Polymer Journal*, 2024, 210: 112990
- DHALL M, MADAN A K. Steep improvement in dissolution profile of ezetimibe through co-inclusion in urea. *Journal of Pharmaceutical Investigation*, 2016, 46(5): 433–451
- FENG X, DAI H J, MA L, *et al.* Effect of microwave extraction temperature on the chemical structure and oil-water interface properties of fish skin gelatin. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 74: 102835
- FENG X, ZHU H K, WANG Y G, *et al.* Clean and sustainable extraction of gelatin: Effects of microwave and freeze-thaw on the crosslinking degree and hydrogen bond of fish skin collagen. *Food Chemistry*, 2025, 470: 142682
- GENG H L, SUN W Y, ZHAN S N, *et al.* Glycosylation with different saccharides on the gelling, rheological and structural properties of fish gelatin. *Food Hydrocolloids*, 2024, 150: 109699
- HE Y P. A method for preparing a modified fish skin collagen-based sizing agent. CN 201711336474.3, 2018-05-29 [何颖沛. 一种改性鱼皮胶原蛋白施胶剂的制备方法. CN201711336474.3, 2018-05-29]
- HERMIDA-MERINO C, CABALEIRO D, LUGO L, *et al.* Characterization of tuna gelatin-based hydrogels as a matrix for drug delivery. *Gels*, 2022, 8(4): 237
- HIDAYATI N I, INDRATI R, HASTUTI P, *et al.* Emulsifying characteristics of gelatin hydrolysate from *Tilapia* skin covalently attached with N-hydroxysuccinimide esters of fatty acids. *agriTECH*, 2020, 40(1): 84
- HO T C, ROY V C, CHAMIKA W A S, *et al.* Subcritical water-assisted fish gelatin hydrolysis for astaxanthin-loaded fish oil emulsion stability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 267: 131242
- HUANG S, WANG H, WANG S, *et al.* Pectin stabilized fish gelatin emulsions: Physical stability, rheological, and interaction properties. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 961875
- HUANG T, TU Z C, WANG H, *et al.* Comparison of rheological behaviors and nanostructure of bighead carp scales gelatin modified by different modification methods. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(5): 1256–1265
- HUANG T, ZHAO H Z, FANG Y Y, *et al.* Comparison of gelling properties and flow behaviors of microbial transglutaminase (MTGase) and pectin modified fish gelatin. *Journal of Texture Studies*, 2019, 50(5): 400–409
- ISHIKAWA M, HASHIMOTO Y. The practice of medicinal chemistry. by WERMUTH C G, ALDOUS D, RABOISSON P, *et al.*, 4th ed, Academic Press, Cambridge, 2015, 747–765
- JOY J M, PADMAPRAKASHAN A, PRADEEP A, *et al.* A review on fish skin-derived gelatin: Elucidating the gelatin peptides-preparation, bioactivity, mechanistic insights, and strategies for stability improvement. *Foods*, 2024, 13(17): 2793
- KENNEL A, MACEWEN M, ARMSTRONG M, *et al.* Fish skin gelatin nanofibrous scaffolds spun using alternating field electrospinning and *in-vitro* tested with tdTomato mice fibroblasts. *Materials Today Communications*, 2022, 31: 103417
- KIM M H, NGUYEN H, CHANG C Y, *et al.* Dual functionalization of gelatin for orthogonal and dynamic hydrogel cross-linking. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2021, 7(9): 4196–4208
- KOLI J M, BASU S, NAYAK B B, *et al.* Improvement of gel strength and melting point of fish gelatin by addition of coenhancers using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 2011, 76(6): E503–E509
- KOLOTOVA D, PETROVA L. Technology and physico-chemical properties of gelatin from Atlantic cod skin. *KnE Life Sciences*, 2020, 426–436
- LI H X, MUSTAPHA W A W, LIU J, *et al.* Self-assembled nanoparticles of acid-induced fish (*Cyprinus carpio* L.) scale gelatin: Structure, physicochemical properties, and application for loading curcumin. *Food Chemistry: X*, 2024,

- 21: 101230
- LIN Y C, DU H, ROOS Y, *et al.* Transglutaminase crosslinked fish gelatins for emulsion stabilization: From conventional to Pickering emulsions. *Food Hydrocolloids*, 2023, 144: 108979
- LIU W W, LIN S Y, SONG L, *et al.* Unlocking stability and efficiency in benzyl isothiocyanate-loaded emulsions: Unveiling synergistic interactions of fish skin gelatin and pectin. *Food Bioscience*, 2024, 58: 103788
- MENDHE A A, KHARWADE R, MAHAJAN U N. Dissolution enhancement of poorly water-soluble drug by cyclodextrins inclusion complexation. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 2016, 8(4): 60–65
- MUGNAINI G, GELLI R, MORI L, *et al.* How to cross-link gelatin: The effect of glutaraldehyde and glyceraldehyde on the hydrogel properties. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(11): 9192–9202
- NHARI R M H R, MAN Y, ISMAIL A, *et al.* Chemical and functional properties of bovine and porcine skin gelatin. *International Food Research Journal*, 2011, 18(2): 787–791
- NITSUWAT S, ZHANG P Z, NG K, *et al.* Fish gelatin as an alternative to mammalian gelatin for food industry: A meta-analysis. *LWT*, 2021, 141: 110899
- NURILMALA M, HIZBULLAH H H, KARNIA E, *et al.* Characterization and antioxidant activity of collagen, gelatin, and the derived peptides from yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) skin. *Marine Drugs*, 2020, 18(2): 98
- O'SULLIVAN J J. Applications of ultrasound for the functional modification of proteins and submicron emulsion fabrication. Doctoral Dissertation of University of Birmingham, 2015
- PAN L Y, BIAN L, YANG Y, *et al.* Observation of the skin histology of *Thamnaconus septentrionalis*. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, 45(4): 65–74 [潘鲁莹, 边力, 杨赞, 等. 绿鳍马面鲈鱼皮组织结构观察. *渔业科学进展*, 2024, 45(4): 65–74]
- PRANOTO Y, ISTIGANI M, SANTOSO U, *et al.* Physicochemical properties of gelatin extracted from fivelined threadfin bream (*Nemipterus tambuloides*) skins. *KnE Life Sciences*, 2016, 3(3): 92
- RAMALHO PROCOPIO F, VALÉRIA DE CAMPOS J, MATTOS A L A, *et al.* An enhancement to development, characterization and potential application of gelatin extracted from native Brazilian fish skin (*Colossoma macropomum*). *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2024, 33(2): 205–220
- RAWDKUEN S, THITIPRAMOTE N, BENJAKUL S. Preparation and functional characterisation of fish skin gelatin and comparison with commercial gelatin. *International Journal of Food Science & Technology*, 2013, 48(5): 1093–1102
- SHAKERI F, BAHMANYAR F, BAHMANI Z A, *et al.* Extraction optimization and physical modification of fish gelatin from *Thunnus tonggol* using ultraviolet (UV) irradiation. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2023, 32(3): 292–303
- SIMON A, GROHENS Y, VANDANJON L, *et al.* A comparative study of the rheological and structural properties of gelatin gels of mammalian and fish origins. *Macromolecular Symposia*, 2003, 203(1): 331–338
- SUBARA D, JASWIR I, AL-KHATIB M, *et al.* Process optimization for the production of fish gelatin nanoparticles. *International Food Research Journal*, 2017, 24.
- SUGIHARTONO S. Kemampuan gelatin kulit ikan menggantikan gelatin Mamalia berdasarkan sifat fisika-kimianya untuk industri pangan. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 2016, 8(16): 156–167
- SURH J. Influence of pH, emulsifier concentration, and homogenization condition on the production of stable oil-in-water emulsion droplets coated with fish gelatin. *Food science and biotechnology*, 2007, 16(6): 999–1005
- TANG S B, TU Z C, SHA X M, *et al.* Optimization of preparation technology and structural characterization of tilapia scale collagen peptide ferrous chelate. *Food and Machinery*, 2020, 36(7): 155–160 [唐顺博, 涂宗财, 沙小梅, 等. 罗非鱼鳞胶原肽亚铁螯合物制备工艺优化及结构表征. *食品与机械*, 2020, 36(7): 155–160]
- TANG Y, WANG X H, YU J H, *et al.* Fish skin gelatin-based emulsion as a delivery system to protect lipophilic bioactive compounds during *in vitro* and *in vivo* digestion: The case of benzyl isothiocyanate. *LWT*, 2020, 134: 110145
- TU Z C, HUANG T, LIU G X, *et al.* A method for improving the gel strength and melting point of fish gelatin. CN 104448334B, 2016-09-14 [涂宗财, 黄涛, 刘光宪, 等. 一种提高鱼明胶凝冻强度和胶融温度的方法. CN104448334B, 2016-09-14]
- TU Z C, HUANG T, WANG H, *et al.* A preparation method for fish scale gelatin with high melting temperature. CN104342040A, 2014-11-20 [涂宗财, 黄涛, 王辉, 等. 一种高胶融温度鱼鳞明胶的制备方法. CN201410526469.9, 2014-11-20]
- TUNGIKAR ADITYA V, MAHALE N, RODE R. Design and characterization of solubility enhancement of ezetimibe - A poorly water soluble drug. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 2015, 4(2): 215–228
- VALL-LLOSERA M, JESSEN F, HENRIET P, *et al.* Physical stability and interfacial properties of oil in water emulsion stabilized with pea protein and fish skin gelatin. *Food Biophysics*, 2021, 16(1): 139–151
- WALKER M A. Improving Solubility via Structural Modification. In: MEANWELL N. (eds). *Tactics in contemporary drug design. Topics in medicinal chemistry*, vol 9. Springer, Berlin, Heidelberg. 2013, 69–106. https://doi.org/10.1007/7355_2013_32

- WANG C C, SU K Y, SUN W Y, *et al.* Comparative investigations of various modification methods on the gelling, rheological properties and mechanism of fish gelatin. *Food Chemistry*, 2023, 426: 136632
- WANG W H, GAO G X, ZHANG Y. A method for improving the thermal stability of fish skin gelatin films. CN 105602261A, 2016-05-25 [王稳航, 高贵贤, 张义. 一种提高鱼皮明胶膜热稳定性的方法. CN105602261A, 2016-05-25]
- WU J T, XIAO J, ZHU M Y, *et al.* Study of physicochemical and gelation properties of fish gelatin from different sources. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5337
- XU J M, YANG L L, NIE Y H, *et al.* Effect of transglutaminase crosslinking on the structural, physicochemical, functional, and emulsion stabilization properties of three types of gelatins. *LWT*, 2022, 163: 113543
- YANG L L, YANG M Y, XU J M, *et al.* Structural and emulsion stabilization comparison of four gelatins from two freshwater and two marine fish skins. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131129
- YANG Y K, MAO L, CHEN H, *et al.* The crosslinking sites and molecular conformation of gelatin hydrogel modified by transglutaminase. *Food Hydrocolloids*, 2024, 154: 110132
- YESILTAS B, ROBERT C, PETERSEN H O, *et al.* Gelatin from saithe (*Pollachius virens*) skin: Biochemical characterization and oxidative stability in O/W emulsions. *Marine Drugs*, 2022, 20(12): 739
- YU E M, PAN C Y, CHEN W J, *et al.* Gelatin from specific freshwater and saltwater fish extracted using six different methods: Component interactions, structural characteristics, and functional properties. *LWT*, 2024, 191: 115656
- YU E, PAN C Y, LUO X, *et al.* Structural characteristics, component interactions and functional properties of gelatins from three fish skins extracted by five methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 248(Suppl C): 125813
- ZENG M Y, ZHANG L Y, LIU Z Y, *et al.* Physico-chemical characteristics and modification of several fish skin collagen. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2005, 35(4): 608–612 [曾名勇, 张联英, 刘尊英, 等. 几种鱼皮胶原蛋白的理化特性及其影响因素. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2005, 35(4): 608–612]
- ZHANG L L, LIU H M, ZHAO Q. Fish gelatin-based flexible and self-healing hydrogel modified by $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. *Gels*, 2024a, 10(9): 557
- ZHANG T, SUN R, DING M Z, *et al.* Commercial cold-water fish skin gelatin and bovine bone gelatin: Structural, functional, and emulsion stability differences. *LWT*, 2020, 125: 109207
- ZHANG T, XU J M, HUANG S D, *et al.* Application progress of fish skin gelatins in food processing industry. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(11): 2241–2255 [张婷, 许嘉敏, 黄淑丹, 等. 鱼皮明胶在食品加工中的应用. 水产学报, 2022, 46(11): 2241–2255]
- ZHANG W J, CHEN L J, BIAN Q Q, *et al.* Complex coacervation of low methoxy pectin with three types of gelatins for the encapsulation of fish oil. *Food Chemistry*, 2024b, 460: 140567
- ZOU Z Y, ZHAO F, WANG Z, *et al.* Analysis and evaluation of nutrition and texture quality in different parts of turbot (*Scophthalmus maximus*). *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(6): 186–195 [邹朝阳, 赵峰, 王志, 等. 大菱鲆不同部位营养与质构品质分析评价. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 186–195]

(编辑 马璀艳)

Recent Advances in the Functional Properties and
Modification Strategies of Fish Skin Gelatin ZHU Jing¹, PAN Chuanyan², MA Huawei², PANG Jikun²,
LYU Min², JIANG Guangzheng², LUO Xu², YA Shiya², QIN Qiyun², WEI Weihao², WEI Yunyi¹①, HE Jiao¹,
ZHANG Zhixing¹

(1. College of Food and Quality Engineering, Nanning University, Nanning, Guangxi 530200, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Engineering Research Center for Processing and Storage of Advantageous & Featured Aquatic Products, Guangxi Zhuang Autonomous Region Academy of Fisheries Sciences, Nanning, Guangxi 530021, China)

Abstract Fish skin gelatin (FSG), a natural functional protein obtained from the partial hydrolysis of fish skin collagen, has gained increasing attention as a sustainable and value-added alternative to mammalian gelatin. Its excellent biocompatibility, biodegradability, and potential bioactivities, including antioxidant and antimicrobial properties, make it suitable for food, pharmaceutical, biomedical, and packaging applications. Moreover, the utilization of fish skin, a byproduct of aquatic processing, aligns

① Corresponding author: WEI Yunyi, Email: weiyunyi@unn.edu.cn

with circular economy principles and green and halal-compliant product development. Despite these advantages, the widespread industrial application of FSG remains limited due to weaknesses such as poor thermal stability, low gel strength, and highly variable functional properties influenced by fish species and processing conditions. This review systematically summarizes the current understanding of the structural characteristics and functional limitations of FSG and explores the strategies for its functional enhancement. The amino acid composition of FSG is characterized by a relatively low proline and hydroxyproline content, two amino acids essential for stabilizing the collagen triple-helix structure. Consequently, the molecular chains in FSG are more flexible and loosely associated, leading to weak gel-forming ability, reduced storage modulus, and limited mechanical strength. Comparative data show that the bloom value of FSG from cold-water species is significantly lower than that of porcine and bovine gelatin, which typically exhibit superior gelation and thermal properties. For instance, the gelling and melting points of FSG are generally 20–25 °C and 30–32 °C, respectively, whereas mammalian gelatins gel at 28–30 °C and melt above 34 °C, making them more suitable for heat-processed products. Regarding emulsification, FSG exhibits amphiphilic characteristics that allow it to adsorb at the oil–water interface and form protective layers around oil droplets. The interfacial adsorption behavior depends on processing parameters such as pH, temperature, gelatin concentration, and emulsification method. Optimal emulsification is typically achieved at pH values away from the isoelectric point, where electrostatic repulsion promotes uniform molecular distribution at the interface. However, owing to structural deficiencies such as shorter peptide chains and lower β -sheet content, FSG often forms unstable emulsions with larger droplet sizes and limited long-term stability. Therefore, improving the emulsifying capacity of FSG is critical in modification research. Several modification strategies have been developed to overcome these structural and functional bottlenecks. Physical methods, including ultrasound treatment, microwave processing, freeze–thaw cycling, and subcritical water hydrolysis (SWH), alter the molecular conformation and enhance thermal stability and emulsifying performance. SWH produces low-molecular-weight gelatin fragments that exhibit improved interfacial activity and better dispersion in emulsion systems. Chemical modifications such as cross-linking with glutaraldehyde, glycosylation with saccharides, and reactions with food-grade cross-linkers such as transglutaminase (TGase) have been used to reinforce gel networks and elevate the gelling temperature. In particular, TGase-catalyzed cross-linking forms irreversible protein networks that significantly enhance gel strength and emulsifying properties. Blending FSG with polysaccharides (pectin, alginate, carrageenan) or proteins (whey protein isolate) offers an effective route to compensate for its limitations. Such composites exhibit improved rheological properties, emulsion stability, and environmental resistance. For example, combining fish gelatin with galacto-oligosaccharides or γ -polyglutamic acid enhances emulsion stability under high temperatures and acidic conditions. Moreover, esterification or conjugation with hydrophobic molecules can increase surface hydrophobicity, further enhancing emulsification capacity. In addition to functional enhancement, FSG is a promising bioactive delivery carrier. Fish gelatin nanoparticles, prepared by desolvation or coacervation techniques, have been successfully used to encapsulate lipophilic compounds such as curcumin, astaxanthin, and benzyl isothiocyanate. These nanosystems improve bioavailability, protect active ingredients from degradation, and allow for controlled release. Furthermore, gelatin-based hydrogels derived from FSG are being increasingly applied in wound healing, drug delivery, and tissue engineering due to their tunable gelation, high water content, and biodegradability. In conclusion, FSG presents a renewable, versatile biopolymer with significant potential across multiple high-value application fields. Although its native performance is inferior to that of mammalian gelatin in terms of gelation and thermal behavior, advances in physical, chemical, enzymatic, and composite modification technologies have markedly expanded its functionality and industrial applicability. Moving forward,

research should focus on the synergistic integration of multiple modification methods, development of environmentally friendly and food-safe agents, and elucidation of structure–function relationships. Moreover, focus should be given to process optimization, product standardization, and safety evaluation to support large-scale industrial adoption. Promoting the high-value utilization of FSG will enhance the sustainability of aquatic resource use and contribute to the development of safe, functional, and environmentally responsible materials.

Key words Fish skin gelatin; Functional properties; Modification methods; Thermal stability; Emulsifying properties

