

鲫鱼鱼鳞结构与有效成分的研究进展

武陶, 高天天, 李俊, 张志豪, 丛欣然 (天津商业大学生物技术与食品科学学院天津市食品生物技术重点实验室, 天津 300314)

摘要 鲫鱼是一类重要的经济型食用鱼, 不仅肉质鲜美, 鱼鳞也有极高的利用价值。从鲫鱼鱼鳞的结构以及鲫鱼鱼鳞胶原蛋白等有效成分的提取方法、鲫鱼鱼鳞抗菌活性肽的制备方法以及鱼鳞的应用等方面总结了鲫鱼鱼鳞结构与有效成分的研究进展, 旨在为鲫鱼鱼鳞的深加工与进一步优化利用提供参考。

关键词 鲫鱼; 鱼鳞; 结构; 功能成分; 应用研究

中图分类号 TS 201.2 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)11-0004-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.11.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on the Structure and Effective Components of *Carassius auratus* Fish Scales

WU Tao, GAO Tian-tian, LI Jun et al (College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, Tianjin 300134)

Abstract Crucian carp is an important economic food fish, not only its meat is delicious, but also its scales have high utilization value. This paper summarizes the research progress on the structure and effective components of *Carassius auratus* fish scales from the aspects of the structure of fish scale and the extraction methods of effective components such as collagen of *Carassius auratus* fish scales, the preparation methods of antibacterial active peptides of *Carassius auratus* fish scales and the applications of fish scales, aiming to provide reference for the deep processing and further optimization of the utilization of *Carassius auratus* fish scales.

Key words *Carassius auratus*; Fish scale; Structure; Functional components; Applied research

水产动物是指生活在水生生态系统中, 具有一定应用价值的动物及其初级加工产品。随着我国水资源的不断开发, 中国的水产养殖业已经走在了世界的前列^[1]。水生动物是一种相对安全的原料来源, 可作为加工各种产品的原料^[2]。鱼鳞作为鱼类的副产品, 经常被作为废弃物丢弃, 易造成环境污染与资源浪费。相关研究表明, 鱼鳞中的胶原蛋白含量丰富, 胶原蛋白分解后的产物肽类可以被人体肠道直接吸收, 长期食用胶原蛋白肽具有提高皮肤弹性、修复表皮受损细胞、延缓衰老等益处^[3]。因此, 在保护环境与节约资源以及关注大健康的背景下, 提高鱼鳞的综合利用率也变得日趋重要^[4-5]。

鲫鱼是中国最重要的淡水鱼类之一, 分布广泛, 生活在除青藏高原以外的几乎所有主要水系^[6]。鲫鱼的体色以灰色为主, 包括灰黑色的背部、银灰色的腹面和灰白色的鳍^[7]。鲫鱼是一种杂食性鱼类, 适应性强, 繁殖力强, 抗病力强, 生长快, 易繁殖^[8], 鲫鱼也是评估水生生态系统和各种毒理学研究的良好模型^[9]。

该研究以鲫鱼为主要研究对象, 总结了近年来鲫鱼鱼鳞结构及其有效成分的研究进展, 以期对鲫鱼鱼鳞资源的开发利用提供参考。

1 鱼鳞的结构与有效成分研究进展

鱼鳞覆盖在鱼体表面, 属于鱼类皮肤的衍生物, 具有保护鱼体的作用。鱼鳞按照其质地与形态, 分为盾鳞、齿鳞、圆鳞和硬鳞 4 种类型。盾鳞一般在软骨鱼上发现较多, 比如鲨鱼的鱼鳞就属于盾鳞^[10-11]。鱼鳞中的主要成分为粗蛋白和灰分, 另外含有少量的脂肪和糖类。根据文献报道, 鲫鱼鱼

鳞含有约 44.90% 的粗蛋白, 27.43% 灰分以及 18.29% 的水分^[12]。

1.1 鱼鳞结构与鲫鱼鱼鳞结构 1982 年, Zylberberg 等^[13]通过扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等手段首次对鱼鳞的精细结构进行了分析, 发现鱼鳞具有纵向的 3 层结构。1990 年, 周伟等^[14]采用扫描电子显微镜技术观察与分析了杞麓湖鲤鱼鳞片表面结构, 发现其表面的齿状粒突渐变结构可能作为鱼类分类的一种依据; 另外, 通过对鱼鳞辐射沟的分析, 发现鱼鳞辐射沟对于热胀冷缩起着缓冲作用, 同时也可以增强鳞片的柔韧性。随后, 丁瑞华等^[15]观察分析了虎嘉鱼鳞片的表面结构。另外还有众多研究采用透射显微镜技术先后对蓝罗非鱼鱼鳞、寿南小沙丁鱼鳞、鲤鱼的鱼鳞片的断面结构进行了分析^[16]。上述研究均集中于对鱼鳞表面结构的研究。

王玉坤^[17]利用热重、XRD 和扫描电子显微镜(含能谱), 对鲫鱼鱼鳞分级结构的成分组成和构成模式进行了更加全面的观察与研究。其研究结果表明, 鲫鱼鱼鳞在基本组成上, 主要由羟基磷灰石和 I 型胶原构成。其中, 有机质(包括但不限于 I 型胶原)的质量含量约 58.2%, 无机物(包括但不限于羟基磷灰石)的质量含量约 29.5%, 另外含有约 12.3% 的水分。从结构组成来看, 可将鲫鱼鱼鳞看作羟基磷灰石/胶原复合材料, 其分级结构主要包括羟基磷灰石颗粒、羟基磷灰石颗粒与细胶原纤维相互间隔形成的板条状复合物等 5 级结构。段婷婷等^[18]采用光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线能谱与衍射、傅里叶红外光谱和热分析等方法与手段对鲫鱼鱼鳞跨尺度结构与成分进行了表征与研究, 结果表明, 鲫鱼鱼鳞片表面含有鳞脊和鳞槽, 是一种跨尺度结构复合材料, 由有机成分和无机成分组成。有机成分为片状或层状的蛋白质纤维, 无机成分为羟基磷灰石颗粒。另外, 在

基金项目 天津市大学生创新训练计划(202010069069)。

作者简介 武陶(1988—), 女, 山西晋中人, 讲师, 博士, 从事代谢工程研究。

收稿日期 2022-06-01

液氮冷冻条件下,橡胶会变脆而鱼鳞不会变脆与断裂,因此认为鱼鳞的韧性高于橡胶。鲫鱼鱼鳞的良好韧性可以使其防止内部组织受到侵害。

至此,人们对于包括鲫鱼在内的各种鱼鳞的结构有了比较清晰的认识,也有了比较完善的分析与观察手段。

1.2 鲫鱼鱼鳞的有效成分 鱼鳞中的有效成分主要包括鱼鳞胶原、鱼鳞明胶、鱼鳞胶原肽、羟基磷灰石、卵磷脂等,其中的主要成分为鱼鳞胶原和羟基磷灰石^[19]。鲫鱼鱼鳞中的有效成分同样主要包括前述主要物质。其中,鱼鳞胶原即胶原蛋白,是由动物细胞合成的一种高分子化合物,具有生物活性,同时也是结缔组织中极其重要的成分。与陆生动物相比,虽然鱼类明胶中脯氨酸和羟脯氨酸的含量低于动物明胶中的含量,但鱼鳞明胶中的蛋氨酸含量明显高于动物明胶中的含量。因而可以利用这些特性开发相应的高附加值产品^[17]。

鲫鱼鱼鳞中主要的无机成分为羟基磷灰石,属于磷灰石的一种,该类物质具有生物相容性、骨传导性、无生物毒性、不引起炎症、不引起机体免疫等特性,目前广泛应用于医疗行业^[20]。

2 鲫鱼鱼鳞胶原蛋白提取工艺研究

2.1 胶原蛋白的结构 胶原蛋白普遍存在于动物的皮肤、软骨等结缔组织中,占总生物蛋白的 25%~30%^[21]。根据结构特征分类,胶原蛋白可分为纤维状(条纹状)、非纤维状(网状)、微纤维状(丝状)和纤维状相关的胶原蛋白。根据现有的研究,已经确定了 29 种类型,常见的类型有 I 型、II 型、III 型、V 型和 D 型,其中 I 型胶原是最常见的,几乎存在于所有结缔组织中^[22]。从胶原蛋白组成的结构单元来看,胶原蛋白是由 3 条肽链(2 条 $\alpha 1$ 和 1 条 $\alpha 2$)组成的三螺旋结构,由重复的氨基酸单元组装而成,通过分子内氢键和相互右旋形成,这样的结构保证了胶原蛋白的稳定性。

2.2 胶原蛋白的提取方法 如表 1 所示,从水产动物中提取胶原蛋白通常使用 5 种提取方法。每种方法都有其优点和缺点。选择酸类作为提取液用于鱼鳞胶原蛋白的提取,可使胶原蛋白水解较彻底,但存在色氨酸等氨基酸被破坏、胶原蛋白粗提物含量降低、后续纯化工作烦琐、提取设备易被酸液腐蚀等问题,不利于工业化大规模生产,因此在实际提取过程中可以考虑酸酶结合、超声波提取或微波辅助提取等方法进行优化。采用酶法提取鱼鳞胶原蛋白时,只需展开胶原蛋白的肽链,不改变胶原蛋白的 3 股螺旋结构。酶法提取鱼鳞胶原蛋白所需要的反应条件温和,提取速率高,提取时间短,提取过程无消解^[24]。Ikoma 等^[20]提取鱼鳞胶原蛋白时,采用 EDTA 对鱼鳞进行脱钙预处理,然后用胃蛋白酶水解鱼鳞,胶原蛋白的提取率超过 33.6%。为了提高鱼鳞胶原蛋白的提取率,胡建平^[25]用多种酶分别水解鲢鱼的鱼鳞,鱼鳞胶原蛋白提取率的大小依次为胃蛋白酶、木瓜蛋白酶、胰蛋白酶。胡方园^[26]利用 Alcalase 酶解鳙鱼鱼鳞,并且在鱼鳞预处理阶段辅以超声波、微波、微细粉碎等辅助手段。结果表明,经过微细粉碎处理的样品,其酶解效果最好,水解度

为 24.22%、蛋白回收率为 95.76%。

表 1 水产动物胶原蛋白提取方法
Table 1 Extraction methods of collagen from aquatic animals

序号 No.	方法 Method	原理 Principle
1	酸法	盐键和席夫碱键断裂,醛胺类交联键的胶原纤维与未交联的胶原分子水解
2	酶法	水解胶原蛋白末端肽链间的赖氨酸或羟赖氨酸相互作用而形成的共价键,使肽链展开
3	碱法	通过 NaOH、Na ₂ CO ₃ 等碱性化合物的作用,使胶原蛋白中含有羟基、巯基的氨基酸不稳定,成为游离氨基酸 ^[23]
4	盐法	利用盐溶液加速胶原蛋白的溶解
5	热水浸提法	利用蛋白质的水溶性,浸提温度不断升高,胶原蛋白提取的含量也不断增加

2.3 鲫鱼鱼鳞胶原蛋白提取工艺 在鲫鱼鱼鳞胶原蛋白提取方面,朱秀灵等^[27]采用响应面法对影响鲫鱼鱼鳞酸溶性胶原蛋白提取效果的醋酸浓度、料液比、提取时间 3 个因素进行了优化,建立了各因素与酸溶性胶原蛋白提取率的关系数学模型并进行了分析。

陈军等^[28]对鲫鱼鳞蛋白酶解工艺进行了优化。结果表明,采用胃蛋白酶进行水解,最佳提取条件为酶添加量 5%,酶解 7 h,60 ℃条件下酶解,酶解环境的 pH=3。此条件下得到最佳水解度 14.58%。

在鲫鱼鱼鳞胶原蛋白的提取过程中,脱钙是鱼鳞胶原蛋白提取过程中一个非常重要的步骤。陈健萍等^[29]采用单因素和正交试验优化了鲫鱼鱼鳞胶原蛋白的提取工艺,在最佳提取条件下,胶原蛋白的提取率为 0.773%。聂小宝等^[30]采用不同浓度的盐酸作为脱钙液,以 0.5 mol/L 的醋酸-醋酸钠缓冲液为原料,提取鲫鱼鱼鳞中的胶原蛋白。结果表明,提取温度 12 ℃,固液比 1:25,提取时间 2 d,脱钙酸浓度 0.4 mol/L,脱钙时间 3 h 的提取条件下,胶原蛋白提取率为 1.142%。李文凤等^[31]为探索大黄鱼鱼鳞的脱钙工艺条件,以柠檬酸为脱钙剂,在超声波辅助处理下对大黄鱼鱼鳞的脱钙条件进行了优化。以脱钙率为评价指标,考察了料液比、柠檬酸浓度和超声时间 3 个因素对大黄鱼鱼鳞脱钙的影响。通过优化分析,得到了大黄鱼鱼鳞脱钙的最佳工艺条件。响应面优化试验表明,超声波辅助脱钙可以有效提高柠檬酸对大黄鱼鱼鳞的脱钙效果,并且在此条件下,造成的鱼鳞胶原蛋白的损失较小。超声波辅助脱钙也是鲫鱼鱼鳞脱钙可参考的方法。

另外,纪书焕^[32]采用离子液体法来提取鲫鱼鱼鳞中的胶原蛋白。选择了氯化胆碱/1,4-丁二醇提取鲫鱼鱼鳞中的胶原蛋白。在温度 70 ℃、提取时间 2.5 h、固液比 1:15 的最优提取条件下,胶原蛋白的得率为 4.14%,而且提取的胶原蛋白具有良好的三螺旋结构。

3 鲫鱼鱼鳞抗菌肽的制备工艺研究

鱼鳞胶原蛋白活性肽是鱼鳞胶原蛋白或鱼鳞明胶水解的产物,具有较强的抗氧化活性,可减缓脂质过氧化、清除自由基,也具有一定的调节机体新陈代谢的功效,因此在食品

保鲜与营养保健方面较多的应用^[33]。

近年来,对鲫鱼鱼鳞胶原蛋白肽的研究呈现出多元化、多角度的特点。施永清等^[34]采用双酶消化法制备鲫鱼鱼鳞的抗菌肽,并通过响应面方法确定最佳的酶解条件;采用 G-25 分离纯化酶解物,同时考察了有效抑制部分对不同细菌的最小抑制浓度(MIC)。结果显示,酸性蛋白酶是二次酶解的最佳蛋白酶。在最佳酶解条件下,G2 馏分对假单胞菌和志贺氏菌的 MIC 为 1.56 $\mu\text{g/mL}$,对金黄色葡萄球菌、枯草杆菌、大肠杆菌、沙门氏菌和副溶血性弧菌经层析后的 MIC 为 6.25 $\mu\text{g/mL}$ 。

顾晨涛等^[35]研究了鲫鱼鳞片抗菌多肽的制备、纯化过程及其抗菌性能。对鲫鱼鱼鳞进行预处理后,采用柠檬酸提取和酶解得到鱼鳞的粗酶解物,然后采用透析、凝胶过滤色谱和阴离子交换色谱对粗酶解物进行纯化,获得鲫鱼鱼鳞的抗菌多肽,该多肽具有较强的抗菌活性。然后通过 SDS-PAGE 分析了抗菌多肽的分子量和纯度。结果表明,鱼鳞抗菌肽的分子质量约为 20.1 kDa,对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、白葡萄球菌、副溶血性弧菌、假单胞菌和施瓦那菌的最小抑制活性为 16 $\mu\text{g/mL}$,对大肠杆菌和沙门氏菌的最小抑制活性为 32 $\mu\text{g/mL}$ 。

董倍余等^[36]优化了鲫鱼多肽的提取工艺,并对其抗氧化能力进行了研究。得到了鲫鱼多肽的最优提取条件,并通过 DPPH 自由基清除试验以及与抗坏血酸抗氧化能力的对比,证明鲫鱼多肽具有较强的抗氧化能力。

贺江等^[37]研究了制备草鱼抗氧化活性肽的最优工艺,在草鱼胶原蛋白粗提液中加入木瓜蛋白酶进行酶解得到酶解液,酶解液对 ABTS⁺ 自由基的抑制率达 45.7%;制备的 ACEI 活性肽的酶解液对血管紧张素转换酶(ACE)的活性抑制率可达 98.8%。

4 鱼鳞有效成分的应用研究

4.1 鱼鳞胶原膜的制备与应用 基于鱼鳞胶原蛋白具有的生物相容性和可降解性,符合食用膜的要求,因此可以利用鱼鳞来制备鱼鳞胶原蛋白膜^[38]。湿法和干法是目前制备鱼鳞胶原蛋白膜较常用的方法^[39]。湿法的主要原理是将所有成分溶解或分散,然后干燥成膜,包括将成膜溶液直接涂在食品表面形成涂层,利用成膜溶液的液-液分离或液-固分离固化成膜以及通过热诱导相分离成膜等成膜方式。干法成膜则不使用溶剂,主要是利用成膜成分的热塑性,选择高于材料熔点的温度加热成膜成分,使其流动成形^[40]。此外,近年来,纳米技术的兴起也为食用膜的制备提供了新思路^[41]。鱼鳞胶原蛋白膜的性能评价主要包括 3 个方面:机械、热和阻隔性能。范德华力、氢键和二硫键等分子间作用力是维持胶原蛋白分子结构稳定性的主要作用力,同时也影响胶原蛋白膜的性能。

涂宗财等^[42]比较了鳙鱼、草鱼和鲫鱼 3 种淡水鱼类明胶膜与猪皮和牛皮明胶膜的性能,结果表明,与哺乳动物制备的明胶膜相比,鱼鳞明胶膜的水蒸气渗透率(WVP)较低,而且鲫鱼鱼鳞明胶膜的 WVP 最低。但是,鱼鳞明胶膜的溶

解度、透光率和透油率指标均高于哺乳动物明胶膜。高透光率的鱼鳞明胶膜具有较高的防止食品脂质氧化的能力。因此,鱼鳞明胶膜可以作为哺乳动物明胶膜的替代品用于胶囊制备与冷链食品的包装,上述研究结果表明,鲫鱼鱼鳞明胶膜在胶囊和冷藏或冷冻食品的包装中具有很大的应用潜力。

良好的水分和气体阻隔性能、合适的机械性能、感官特性和安全性是对食品包装材料的基本要求^[43]。鱼鳞胶原膜具有阻隔氧气和湿气渗透的作用^[40],因此,在食品领域可以选择其作为食品包装材料。例如,于林等^[44]研究发现,鲢鱼鳞胶原蛋白与茶多酚和壳聚糖形成的交联膜可以有效抑制石斑鱼中微生物的生长,延长其保质期。甘钊生等^[45]采用鱼鳞胶原蛋白与绿茶提取物制备得到的复合涂膜,可有效降低圣女果的损耗率和腐烂率,延长圣女果的货架期。在生物医药领域,由于胶原蛋白具有良好的生物相容性、高生物降解性和低免疫原性,可应用于组织工程再生、药物输送和疾病治疗^[46]。陈亮等^[47]研究了草鱼鱼鳞胶原膜对大鼠骨髓间质干细胞的黏附增殖和成骨分化的影响,发现鱼鳞胶原膜的表面细胞黏附良好,可以促进骨髓间质干细胞的增殖和成骨分化,具有良好的生物相容性和骨组织再生潜力。

4.2 鱼鳞胶原蛋白在处理废水方面的应用 鱼鳞除了用于制备胶原膜、明胶膜外,还可作为吸附剂,应用于废水处理中。梁志等^[48]研究了罗非鱼鱼鳞对于染料废水中正甲基蓝的吸附作用。结果表明,当溶液 pH 为 7、温度为 30 $^{\circ}\text{C}$,吸附剂用量为 3 g/L、吸附时间为 30 min,亚甲基蓝初始浓度为 40 mg/L 时,吸附效果最好;另外,傅里叶红外光谱分析表明罗非鱼鱼鳞中的胶原蛋白和羟基磷灰石均参与了亚甲基蓝染料的吸附。此外,该团队还研究了罗非鱼鱼鳞对废水中刚果红的吸附作用^[49]。主要考察了鱼鳞用量、刚果红初始浓度和溶液 pH 等因素对罗非鱼鱼鳞吸附水中刚果红的性能影响,并通过红外光谱、吸附动力学和吸附等温线分析了吸附机理。研究人员还研究了鱼鳞生物活性炭对含甲醛的废水的吸附作用。张净净等^[50]在 550 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,将经过干燥的鱼鳞与 85%磷酸进行活化,制备了鱼鳞活性生物炭,并研究了鱼鳞活性生物炭对甲醛的吸附性能。发现鱼鳞活性生物炭对甲醛的吸附随着温度的增加而增加,并且其吸附过程可以用准二级动力学方程进行描述。

5 总结与展望

鲫鱼在众多水产品中虽然价格低廉,但其营养丰富,具有较高的营养价值。在文献调研过程中发现,不同种类鱼鳞的结构以及鲫鱼鱼鳞的结构研究已比较明晰,针对鱼鳞胶原蛋白以及鱼鳞明胶等鱼鳞有效成分的提取,研究虽不如罗非鱼、草鱼等类群多,但类似的方法也可借鉴于鲫鱼鱼鳞的有效成分提取中。在今后的研究中,可在已有的鲫鱼鱼鳞有效成分提取工艺的基础上,综合其他鱼类鱼鳞有效成分的提取工艺,尝试对鲫鱼鱼鳞有效成分的提取工艺继续进行优化或开发新型提取方式,以期提高鱼鳞的利用率以及活性成分的提取率。而目前针对鲫鱼鱼鳞再利用的研究较少,这是今后鲫鱼鱼鳞的进一步开发利用可参考的方向。

参考文献

- [1] 殷艳慧,蒋万胜,潘晓斌,等.水产养殖鱼类生长性状研究进展[J].中国水产科学,2020,27(4):463-484.
- [2] SUGIURA H,YUNOKI S,KONDO E,et al. *In vivo* biological responses and bioresorption of tilapia scale collagen as a potential biomaterial[J]. Journal of biomaterials science, polymer edition,2009,20(10):1353-1368.
- [3] 刘雨萱,陈媛,李美良,等.罗非鱼鱼鳞胶原蛋白的研究进展[J].食品工业科技,2019,40(6):355-360.
- [4] 李敏,邓放明,王乔隆.淡水鱼下脚料的综合利用[J].中国食物与营养,2007,13(2):19-22.
- [5] 蔡路韵,张滋慧,李秀霞,等.鱼类下脚料在工业中应用的研究进展[J].食品工业科技,2017,38(8):356-363.
- [6] WEN J X,XU Y,SU M Z,et al. Susceptibility of goldfish to cyprinid herpesvirus 2 (CyHV-2) SH01 isolated from cultured crucian carp[J]. Viruses,2021,13(9):1-11.
- [7] 饶发祥.鲫鱼种类生物学特性及其特殊的繁殖方式[J].北京水产,1996(S1):21-23.
- [8] 魏友海.鲫鱼的经济价值与食用[J].科学养鱼,2007(9):78.
- [9] FU G H,DONG Y P,ZHANG X M,et al. Metabolomic profiles and pathways of praziquantel in crucian carp[J]. Environmental toxicology and pharmacology,2020,80:1-7.
- [10] KARDONG K V. Vertebrates: Comparative anatomy, function, evolution [M]. New York: McGraw-Hill Higher Education,2015.
- [11] ZARRIN J,AGUIAR R L,BARRACA J P. Manycore simulation for petascale system design: Motivation, tools, challenges and prospects[J]. Simulation modelling practice and theory,2017,72:168-201.
- [12] 刘庆慧,刘从力,王采理.鱼鳞营养成分的分析及对高脂饲料大鼠血脂水平的影响[J].中国水产科学,2000,7(4):56-59.
- [13] ZYLBERBERG L,NICOLAS G. Ultrastructure of scales in a teleost (*Carassius auratus* L.) after use of rapid freeze-fixation and freeze-substitution[J]. Cell and tissue research,1982,223(2):349-367.
- [14] 周伟,谢庆春.杞麓湖鲤鱼鳞片表面结构的扫描电镜观察[J].动物学研究,1990,11(1):35-39,101.
- [15] 丁瑞华,方盛国.虎鲈鱼鳞片表面结构扫描电镜观察[J].水产学杂志,1995,8(1):7-9.
- [16] 高聚琼,陈东辉,孙霁宇,等.鲤鱼鳞片断面的微观结构及纳米力学性能[J].农机化研究,2006,28(11):147-150.
- [17] 王玉坤.鲫鱼鱼鳞的分级结构及其生物学性能[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
- [18] 段婷婷,王吉辉,郭雁,等.鲫鱼鱼鳞跨尺度结构及成分的表征[J].中国组织工程研究,2018,22(26):4191-4195.
- [19] 顾杨娟,李杰,李富威,等.鱼鳞有效成分的研究进展[J].食品工业科技,2012,33(10):415-419.
- [20] IKOMA T,KOBAYASHI H,TANAKA J,et al. Physical properties of type I collagen extracted from fish scales of *Pagrus major* and *Oreochromis niloticus*[J]. International journal of biological macromolecules,2003,32(3/4/5):199-204.
- [21] GAUZA-WŁODARCZYK M,KUBISZ L,MIELCAREK S,et al. Comparison of thermal properties of fish collagen and bovine collagen in the temperature range 298-670 K[J]. Materials science and engineering:C,2017,80:468-471.
- [22] 孙圣伟,何健,刘美娟,等.原型胶原蛋白的提取分离及其结构鉴定[J].食品安全质量检测学报,2019,10(23):7947-7952.
- [23] DING J F,LI Y Y,XU J J,et al. Study on effect of jellyfish collagen hydrolysate on anti-fatigue and anti-oxidation[J]. Food hydrocolloids,2011,25(5):1350-1353.
- [24] 吴锁连,康怀彬,李冬姣.鱼鳞有效成分提取技术的研究进展[J].安徽农业科学,2017,45(27):110-112,141.
- [25] 胡建平,吴琦,陈惠.鲢鱼鳞胶原蛋白的制备及性质研究[J].食品科技,2010,35(1):230-234,238.
- [26] 胡方园.酶法制备鲮鱼低聚肽及其抗氧化活性研究[D].无锡:江南大学,2012.
- [27] 朱秀灵,戴清源,蔡为荣,等.响应面法优化鲫鱼鱼鳞酸性胶原蛋白提取工艺[J].食品工业科技,2010,31(11):247-251.
- [28] 陈军,丁志雯,益璐,等.鲫鱼鳞蛋白酶解工艺的优化[J].食品研究与开发,2013,34(24):235-238.
- [29] 陈健萍,朱屋彪.鱼鳞中胶原蛋白的提取工艺研究[J].广州化工,2015,43(12):76-77,170.
- [30] 聂小宝,潘洪民,程丽林,等.鲫鱼鱼鳞胶原蛋白提取工艺的研究[J].山东农业科学,2012,44(1):109-111.
- [31] 李文凤,王标诗,余石坚,等.响应面法优化黄花鱼鱼鳞脱钙工艺[J].食品工业科技,2021,42(4):155-160.
- [32] 纪书焕.离子液体提取鲫鱼鱼鳞中羟基磷灰石和胶原蛋白的研究[D].天津:天津科技大学,2019.
- [33] 代昕冉,刘焱,陈力力.淡水鱼鳞综合利用研究进展[J].农产品加工,2018(16):61-66.
- [34] 施永清,王巧巧,吴丹丽,等.响应面法优化双酶酶解法制备鱼鳞抗菌肽工艺及其抑菌性能分析[J].食品科学,2018,39(6):155-161.
- [35] 顾晨涛,黄洒,王雪燕,等.鲫鱼鱼鳞抗菌多肽的制备纯化及其抑菌活性研究[J].食品科学,2019,40(22):193-198.
- [36] 董倍余,张敏娟,黄晓霞,等.优化鲫鱼多肽提取工艺及其抗氧化能力的研究[J].广州化工,2020,48(23):72-75.
- [37] 贺江,赵自龙,彭磊,等.草鱼鱼鳞胶原蛋白提取及活性肽制备研究[J].食品研究与开发,2017,38(5):52-55.
- [38] 李岩陇,肖枫,康怀彬.鱼鳞胶原蛋白可食性膜研究进展[J].食品与机械,2021,37(1):222-228.
- [39] DHUMAL C V,SARKAR P. Composite edible films and coatings from food-grade biopolymers[J]. Journal of food science & technology,2018,55(11):4369-4383.
- [40] HASSAN B,CHATHA S A S,HUSSAIN A I,et al. Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review[J]. International journal of biological macromolecules,2018,109:1095-1107.
- [41] HOSSEINI S F,REZAEI M,ZANDI M,et al. Development of bioactive fish gelatin/chitosan nanoparticles composite films with antimicrobial properties[J]. Food chemistry,2016,194:1266-1274.
- [42] 涂宗财,黄涛,王辉,等.3种淡水鱼鳞明胶成膜性的比较[J].食品与发酵工业,2014,40(2):151-154.
- [43] CHUAYCHAN S,BENJAKUL S,KISHIMURA H. Characteristics of acid- and pepsin-soluble collagens from scale of seabass (*Lates calcarifer*) [J]. LWT-food science and technology,2015,63(1):71-76.
- [44] 于林,陈舜胜,王娟娟,等.茶多酚改性胶原蛋白-壳聚糖复合膜对冷藏斜带石斑鱼的保鲜效果[J].食品科学,2017,38(3):220-226.
- [45] 甘钊生,梁志.鱼鳞胶原蛋白可食性复合涂膜对圣女果保鲜效果研究[J].农产品加工,2019(16):17-19.
- [46] LIM Y S,OK Y J,HWANG S Y,et al. Marine collagen as A promising biomaterial for biomedical applications[J]. Marine drugs,2019,17(8):1-32.
- [47] 陈亮,孟姝,程国平,等.鱼鳞胶原膜对大鼠骨髓间充质干细胞黏附增殖及成骨分化的影响[J].中国组织工程研究,2021,25(16):2494-2499.
- [48] 梁志,胡鑫鑫,车文成.罗非鱼鱼鳞对染料废水中亚甲基蓝的吸附研究[J].印染助剂,2018,35(11):53-56.
- [49] 梁志,胡鑫鑫.罗非鱼鱼鳞对染料废水中刚果红的吸附研究[J].印染助剂,2017,34(12):17-21.
- [50] 张净净,李海朝,杜树璇,等.鱼鳞活性生物炭对含甲醛废水的吸附研究[J].化学世界,2021,62(10):623-630.