

燕麦 β -葡聚糖在水产品中的应用进展

郝志明¹, 孙群钊^{2,3}, 许祝辉⁴, 蔡秋杏^{2*}, 杨少玲³

(1. 广东农工商职业技术学院, 广东广州 510507) (2. 广西高校北部湾海产品高值化利用与预制食品重点实验室, 北部湾大学食品工程学院, 广西钦州 535011) (3. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部水产品加工重点实验室, 广东广州 510300) (4. 广州中康食品有限公司, 广东广州 510000)

摘要: 燕麦中含有丰富的可溶性膳食纤维, 其中 β -葡聚糖含量丰富。 β -葡聚糖是一种主要存在于糊粉、亚糊粉和胚乳中, 由 β -D-吡喃葡萄糖单位通过 β -1, 4和 β -1, 3糖苷键线性混合链接的水溶性多糖。由于其独特的结构特性, 具备抗氧化、肠道保护等健康功效, 燕麦 β -葡聚糖不仅应用于奶制品、烘焙制品中, 在水产品中也得到了广泛的关注。该文总结了燕麦 β -葡聚糖的提取工艺, 详细讨论了各种工艺的提取率和纯化效果的影响。同时, 该文综述了燕麦 β -葡聚糖在水产品中的应用研究进展, 涵盖了水产养殖和各类水产品食品中的应用现状。该文进一步的探明燕麦 β -葡聚糖目前研究应用中所面临的问题, 以期燕麦 β -葡聚糖进一步开发利用提供理论参考。

关键词: 燕麦; β -葡聚糖; 提取工艺; 水产养殖; 水产食品

文章编号: 1673-9078(2025)06-356-365

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0582

Progress in the Application of Oat β -Glucan in Aquatic Products

HAO Zhiming¹, SUN Qunzhao^{2,3}, XU Zhuhui⁴, CAI Qiuxing^{2*}, YANG Shaoling³

(1. Guangdong Agriculture Industry Business Polytechnic, Guangzhou 510507, China)
(2. Guangxi College and University Key Laboratory of High-value Utilization of Seafood and Prepared Food in Beibu Gulf, College of Food Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China) (3. Key Laboratory of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture and Rural A, Guangzhou 510300, China)
(4. Guangzhou Sinocon Food Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Oats are rich in soluble dietary fiber, particularly β -glucans. β -glucan is a water-soluble polysaccharide primarily found in the endosperm, subendosperm, and germ of cereals, which is linked by β -D-glucopyranosyl units through β -1,4 and β -1,3 glycosidic bonds. Due to its unique structural properties, it has health benefits such as antioxidant and intestinal protective effects. Oat β -glucans is not only applied in dairy products and baked goods, but also receives widespread attention in aquatic products. This paper summarizes the extraction processes of oat β -glucan, discuss in detail the impacts of extraction rates and purification effects of various processes. Meanwhile, the review provides an overview of the research progress on the applications of oat β -glucan in aquatic products, encompassing the application status of both aquaculture and

引文格式:

郝志明,孙群钊,许祝辉,等.燕麦 β -葡聚糖在水产品中的应用进展[J].现代食品科技,2025,41(6):356-365.

HAO Zhiming, SUN Qunzhao, XU Zhuhui, et al. Progress in the application of oat β -glucan in aquatic products [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 356-365.

收稿日期: 2024-04-29

基金项目: 广东省教育厅广东省普通高校重点领域专项(生物医药与健康)(2023ZDZX2081); 国家现代农业产业技术体系海水鱼体系(CARS-47)

作者简介: 郝志明(1980-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品加工与检测, E-mail: 22745989@qq.com

通讯作者: 蔡秋杏(1981-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与质量安全, E-mail: Caiqx@bbgu.edu.cn

various aquatic products. Furthermore, this paper explores the problems encountered in current research and applications of oat β -glucan, in order to offer theoretical reference for the further development and utilization of oat β -glucan.

Key words: oats; β -glucan; extraction process; aquaculture; aquatic food

燕麦是人类传统的八大粮食作物之一，在世界种植普遍，位居粮食作物第四名。燕麦具有独特的营养价值和保健生理功能。近些年来，国内外诸多临床研究验证，定期食用含燕麦食品对病患在降血压^[1]、降胆固醇^[2]方面起到帮助，还起到预防心脏病^[3]和控制糖尿病^[4]的功效。因此，对燕麦的营养功能特性深入探究，创新开发出各种具备保健功能的食品，具有极其重要的实际意义。

燕麦除富含蛋白质、不饱和脂肪酸、维生素等，更具有大量的可溶性膳食纤维，其中 β -葡聚糖尤为重要^[5,6]。 β -葡聚糖被认为是燕麦膳食纤维中的主要成员，其是由通过糖苷键连接的 β -D-葡萄糖单体组成的长链多糖，主要存在于许多天然来源如细菌、真菌、藻类和谷物的细胞壁中^[7-9]。通常， β -葡聚糖由于其良好的水溶性、高粘度和胶凝特性而被用作防腐剂、抗真菌剂和抗氧化剂^[10-12]。同时，它还在调节血糖和胆固醇水平以及降低冠心病和结肠直肠癌的风险方面发挥生理作用^[13,14]。到 2024 年，全球 β -葡聚糖市场预计价值 10.3 亿美元，其中燕麦 β -葡聚糖占据主导地位^[15]，从来自燕麦加工的废料（燕麦麸）中制取 β -葡聚糖在经济上是可行的，并且有益于资源的高效利用^[16]，因此有必要总结现阶段对燕麦中 β -葡聚糖的深加工和精细化利用的研究进展，探明存在的问题，以期为其进一步开发利用提供参考。

1 燕麦 β -葡聚糖的制备

近年来，大量文献报道了燕麦 β -葡聚糖提取分离纯化的方法。主要有水提法、碱提法、乙醇酶和热水二步法等。

1.1 水提法

在以往关于燕麦葡聚糖的研究中发现，这种多糖在有机溶剂中不具溶解性，但在水中有很好的溶解特性，因而水提法成为一种有效的提取手段。汪海波等^[17]采用热水浸提法从燕麦麸皮中提取 β -葡聚糖，发现在碱性条件下，料液比在 1:10 (g/mL) 时，温度在 60 °C 处理 60 min，得率为 4%，而潘婷等^[18]则发现提取温度为 60 °C，料液比为 1:25 (g/mL)，

pH 值 = 11，燕麦 β -葡聚糖的提取率明显提高，但温度继续升高，会导致淀粉的糊化，不利于提取。热水提取方法会产生较多杂质，如木聚糖、淀粉和蛋白质等，降低了 β -葡聚糖的纯度和质量，所以虽然热水提取方法简单，但提取时间长、杂质多、粘度高、提取率不高，所以共需要与其他的提取方法联合使用，可能效果更佳。

1.2 碱提法

为解决水提取物高粘度的问题，Wood 等^[19]提出了使用碱液制取燕麦 β -葡聚糖的方法，他采用 Na_2CO_3 溶液进行提取，考虑到超过 63 °C 淀粉的糊化以及杂质明显增多，通过优化，采用 Na_2CO_3 溶液调节提取液 pH 值为 10，在 45 °C 提取 30 min，产品得率较热水提法得到了一定程度上的提升，且有效减少了淀粉、蛋白质等杂质产生。林伟静等^[20]则采用 NaOH 溶液提取法从粉碎后的燕麦全粉中提取 β -葡聚糖，结果显示，40 °C 时提取率较理想，提取率随液体的不断增多而上涨，在料液比为 1:16 (g/mL) 时达到最大，考虑到强碱性对产物的破坏，pH 值保持在 12.5，结合经济效益以及长时间的提取对提取率的提高效果不明显，时间确定为 3 h，在这一设定条件下，成功实现了对燕麦全粉中 β -葡聚糖的高效提取，提取率达到了 91.83%。但强碱性可能会造成燕麦 β -葡聚糖色泽的变化，且容易产生强碱废液污染，所以不适于当前提倡的绿色环保的生产要求。

1.3 微波法

国内外有研究^[21]指出，微波提取多糖可以提高提取效率和多糖的得率，这主要归因于微波可以打碎燕麦糊粉层的细胞壁，使多糖更容易被提取。王尚玉等^[22]发现采用微波法，提取率随微波功率、料液比、温度和时间的增加而提高，但后期改善效果不明显，通过工艺优化确定功率为 640 W，料液比 1:15 (g/mL)，温度为 80 °C，微波时间 4 min， β -葡聚糖的得率 5.1%，比水提法提取快且提率高。申瑞玲等^[23]采取间歇性微波处理，微波功率 720 W，NaOH 溶液 pH 值为 10，料液比为 1:12 (g/mL)，总共提取 9 min，将燕麦 β -葡聚糖得率提高到 8.31%，

比前者有了较大的提高。梁茜茜等^[24]在微波处理的基础上加入了超声波工艺,提取时间为 18 min,在微波功率 639 W, pH 值为 10,料液比 1:36 (g/mL)的条件下,将得率提升至 8.45%,相比于单独微波法提取燕麦 β -葡聚糖有了不小的提升。相比于传统的水提法,微波辅助提取法在提高 β -葡聚糖得率的同时,极大的减少了时间的消耗,不过因其在微波过程中不可控,可能会对溶液造成影响,破坏其中的燕麦 β -葡聚糖,从而造成 β -葡聚糖的得率下降。

1.4 酶提法

酶提法是一种通过酶的作用分解和去除提取液中的杂质使原料中的 β -葡聚糖得以提取的方法。同时,酶对燕麦麸皮细胞结构的破坏导致发酵后提取过程中 β -葡聚糖的提取率更高。Neha 等^[25]学者采用酶法等 4 种方式分离 β -葡聚糖,使用耐热 α -淀粉酶和蛋白酶的酶法取得了 86.7% 的提取率,对比碱法和热水法,酶法提取的燕麦 β -葡聚糖得率高且具有较好的胶体稳定性。Aktas 等^[26]发现酶法提取提高了可溶性燕麦 β -葡聚糖的含量,但较长的酶解时间和较高的酶剂量会对其产生反作用,可能是由于燕麦 β -葡聚糖在长时间的反应过程中进一步水解为葡萄糖^[27]。

相比于化学试剂法,酶提法是一种绿色温和的方法,具有许多优点:较高的提取率、较好的纯度、提取产物更稳定、更安全,且提取物具有较低的降解特性。因此将生物酶用于燕麦 β -葡聚糖的提取有良好的应用前景,目前已经利用各种水解酶如木聚糖酶、葡糖淀粉酶、 α -淀粉酶和蛋白酶来使提取的 β -葡聚糖中大量杂质的存在最小化。

1.5 超声波法

Patist 等^[28]和 Bhaskaraeharya 等^[29]认为,超声波空化(气泡爆炸)产生的能量对细胞壁产生了破坏,从而改善了细胞成分如多糖的释放。翟爱华等^[30]研究得出超声处理中得率随温度上升而提高,在 70 °C 最佳,料液比 1:15 (g/mL),超声波提取 2 次,每次持续 18 min,燕麦 β -葡聚糖得率为 7.32%。李密转等^[31]将热水法、超声波法与酶法结合起来,先采用 75 °C 的热水加热 4 h,然后使用超声波法在其功率为 400 W、温度 50 °C、提取 30 min,最后加入 1.5% 淀粉酶进行酶解 30 min, β -葡聚糖提取率为 5.09%,但从这个工艺可以看到,提取过程很复杂且时间长,但得率并没有提到较大的提升。Chen

等^[32]研究在不同温度下对脱脂燕麦麸中 β -葡聚糖进行超声辅助提取和常规提取,结果表明,70 °C 下, β -葡聚糖的产率与 20 °C 条件下相差不大,在 20 °C 下,超声辅助提取预处理的 β -葡聚糖提取率比常规提取高约 37%。从经济效益考虑,选用更低的温度优势明显。超声处理时间对提取率有两个相反的影响,超声波处理时间不超过 5.5 min 时, β -葡聚糖产率显著增加;当超声波处理时间超过 5.5 min 时, β -葡聚糖产率反而有所下降,其对 β -葡聚糖提取率产生了负面影响^[33]。

在用于提取 β -葡聚糖的许多方法中,超声波辅助缩短了时间,具有更高效、快速、简单的优势。不过,长时间的超声波处理更有可能破坏 β -葡聚糖链。与此同时,超声波辅助提取的原料相对较少,对大量材料的提取可能会造成提取率低,能耗消耗大等问题。

1.6 发酵法

发酵是一种古老的食物加工方法,Wu 等^[34]利用丝状真菌发酵燕麦麸皮从而达到提高提取率的目的。分别采用尼日尔曲霉与根霉对燕麦麸皮进行发酵,以接种量、发酵时间和温度作为变量,在最佳条件下,其 β -葡聚糖的提取率分别为 45.57% 和 51.10%,约为发酵前三倍。吴迪等^[35]分别选用黄伞等 3 种真菌对燕麦进行发酵并提取燕麦 β -葡聚糖,与未经发酵的燕麦 β -葡聚糖相比,发酵后的燕麦 β -葡聚糖和总糖含量均有提高,其中黄伞的 β -葡聚糖得率最高,在 289 mg/L 左右,最佳发酵温度为 28 °C、料液比 1:20 (g/mL)、pH 值等于 5、发酵 48 h,其对得率影响程度依次增大。研究表明,温度升高,发酵产生的酶的酶解速率越快,进而使 β -葡聚糖具有更高可提取性,但过高的温度会导致酶失活与菌的死亡,从而使燕麦麸的水解程度降低,导致 β -葡聚糖的可提取性降低^[36]。在发酵的早期阶段,燕麦麸的细胞结构遭到破坏并增加 β -葡聚糖的可提取性^[37]。随着发酵时间的延长,发酵产生的酶可能会将 β -葡聚糖过度水解进而导致 β -葡聚糖的产量减少。

相比传统的水提法,发酵法的燕麦 β -葡聚糖得率有了较大的提升,且成本更加低廉,不过筛选出一种合适的菌种较为困难,需要投入大量的精力,发酵时间长,从而使得整体周期较为漫长。

1.7 其他

除了上述提到的常见提取方式外,目前也关注

联合工艺提取技术。Kurek 等^[38]采用天然絮凝剂（壳聚糖、瓜尔豆胶和明胶）从燕麦中提取纯化 β -葡聚糖，絮凝剂的使用相对减少了提取物总量，但能有效去除其中的蛋白质和灰分等杂质，提高提取物的纯度；当壳聚糖浓度为 0.6% 时，提取物中 β -葡聚糖含量最高，为 79.0%。吴佳等^[39]采用热水浸提-冻融循环的工艺提取燕麦 β -葡聚糖，其不灭内源酶活，热水（55℃）提取 2 h 并浓缩后，冷冻（-18℃，24 h）后解冻（4℃，12 h），反复冻融 3 次，燕麦 β -葡聚糖的得率提升 1.5%。王冲等^[40]在 300 W 功率下超声 15 min 再置于 300 MPa 压力的超高压中处理 4 min，整个过程采用了超高压-超声波协同的方法，在提取过程中 pH 值保持为 10、料液比 1:18 (g/mL)， β -葡聚糖得率比超声波法提高了 43.10%，相较于水提法提升了 159.38%。Yoo 等^[41]打破了传统低于 100℃的提取温度，采用高温高压的亚临界水萃取工艺，在提取温度为 200℃、时长 10 min、pH 值=4.0、粒度为 425~850 μm 的条件下，制得燕麦 β -葡聚糖得率高达 6.98%，对比 60℃热水提法有一定

的提高。不过长时间的高温高压提取会加剧 β -葡聚糖的水解，造成得率下降，如 5-羟甲基-2-呋喃甲醛、果糖等杂质的提高。亚临界水萃取对制备仪器的要求较为苛刻，得到的燕麦 β -葡聚糖并不廉价，其在商业上的应用还有待进一步评估。综合研究结果表明，协同提取工艺是比单独提取工艺在得率以及纯度方面均有积极影响，在时间和效率上取得了明显优势，值得进一步深入探索。

根据目前的研究结果，燕麦 β -葡聚糖的提取工艺因其特殊的物理化学性质而需要综合考虑不同的提取方法，以期达到提取效果的最优化，表 1 为不同燕麦 β -葡聚糖的提取方法的比较。这些方法通过物理或化学手段，改善了传统提取过程中的某些缺点，并且能够更好地保留燕麦 β -葡聚糖的生物活性。除却燕麦 β -葡聚糖的提取工艺的影响，燕麦的产地，品种品质以及前处理工艺等因素也在一定程度上影响着最终的提取率与纯度。未来的研究可能还会探索更多创新性的提取技术，以满足对燕麦 β -葡聚糖的高效提取和应用的不断需求。

表 1 燕麦 β -葡聚糖提取方法比较
Table 1 The research methods of oat β -glucan extraction

原料	提取方法	β -葡聚糖得率/%	提取率/%	参考文献
燕麦麸皮	热水浸提	4	/	[17]
燕麦麸皮	热水浸提	17	/	[18]
燕麦	碱提法	/	70~87	[19]
燕麦	碱提法	/	91.83	[20]
燕麦麸皮	微波法	5.1	/	[22]
燕麦麸皮	间歇性微波处理	8.31	/	[23]
燕麦麸皮	微波-超声波协同	8.45	/	[24]
燕麦麸皮	超声波法	7.32	/	[30]
燕麦麸皮	热水法，超声波法，酶法	5.09	/	[31]
燕麦麸皮	超声辅助提取，热水浸提	5.73（超声辅助提取最高）	/	[32]
燕麦麸皮	发酵法（尼日尔曲霉，根霉）	/	51.10 $\pm$ 2.32（根霉最高）	[34]
燕麦	发酵法（黄伞、大杯伞、灰树花）	5.78（黄伞最高）	/	[35]
燕麦	天然絮凝剂（壳聚糖、瓜尔豆胶和明胶）	/	79.0 $\pm$ 0.19	[38]
燕麦	热水浸提-冻融循环	1.5	/	[39]
燕麦	亚临界水萃取		6.98（得率）	[41]

2 燕麦β-葡聚糖的功能特性

2.1 物理特性

β-葡聚糖具有很好的物理特性：较好的水溶性^[42]、粘弹性^[43]、保水性^[44]、凝胶性^[45]，特别是其能有效促进蛋白质的折叠和交联，形成了更均匀、更致密、更稳定的凝胶网络结构^[46]，所以其可用于提高制品的凝胶强度或保水功能，如 He 等^[47]发现添加燕麦 β-葡聚糖可显著提高凝胶样品的质构性质、凝胶强度和持水性。燕麦 β-葡聚糖溶液在剪切速率增加的情况下，其黏度呈下降趋势，具有流变稳定行为。当其浓度为 2% 时，溶液具备相对较高的黏度，当含有量高于这一浓度，则呈现假塑性^[48]；但也有研究发现燕麦 β-葡聚糖分子量的降低会导致其粘度随之降低，进而对其生理活性造成负面影响^[49]。Johansson 等^[50]对比了相同浓度下的燕麦 β-葡聚糖和大麦 β-葡聚糖，表明燕麦 β-葡聚糖的黏度更高，这可能跟其结构有关。由此可见燕麦 β-葡聚糖的结构特征会影响其溶解性、粘性等理化、生物学特性，相比其它谷物 β-葡聚糖，燕麦 β-葡聚糖具有更大的黏性。燕麦 β-葡聚糖的生理活性机制及其应用前景有待进一步研究。

2.2 抗氧化

在生理正常状态下，自由基存在于生成和清除的不断动态平衡中，是身体代谢的副产物。这种平衡主要由抗氧化系统维持，当某一自由基水平超过正常限度时，会破坏体内的平衡状态，过度的炎症会耗尽抗氧化剂，导致氧化损伤的发生^[51]。Cui 等^[52]发现燕麦 β-葡聚糖存在一定的抗氧化能力，不同分子量的燕麦 β-葡聚糖都展现出抗氧化能力，其作用机制在于提升谷胱甘肽过氧化物酶、超氧化物歧化酶等抗氧化酶的活性，同时增强机体对自由基和超氧阴离子的清除效能，从而有效增强体内抗氧化能力^[53]。Du 等^[54]提出，燕麦 β-葡聚糖具有清除自由基和减少炎症产生的能力，并对血液或血浆中严重的氧化剂诱导的脂质过氧化有显著保护作用。Jacek 等^[55]发现在 LPS 诱导的肠炎大鼠中，补充燕麦 β-葡聚糖的大鼠在肝脏和胃组织中显示抗氧化活性，特别是低分子量形式的 β-葡聚糖，其表现出的积极作用更为明显。Kopiasz 等^[56]在三硝基苯磺酸（TNBS）诱导大鼠实验中得到了相似的结论，发现燕麦 β-葡聚糖对结肠炎大鼠的具有间接的抗氧化作

用。这使其特别适用于治疗或保护用途。

2.3 肠道保护

宿主体内的微生物群落具有抵御多种外部不利因素的能力，为其提供重要的保护。经过临床试验证实，对于多种病理状况，胃和肠道中的细菌群具更有显著效果^[57]。燕麦 β-葡聚糖作为一种具有益生元潜力的膳食纤维，对肠道功能具有潜在的促进健康作用^[58]。燕麦 β-葡聚糖可在人体内形成凝胶状网络，改变胃、肠液的黏度，它对肠胃的积极影响还可能与它改变了肠道微生物丛和有益微生物生长能力有关^[59]。Ma 等^[60]发现燕麦 β-葡聚糖调节肠道微生物组成和结构，增加乳酸杆菌、普雷沃氏菌、片球菌、芽孢杆菌等有益菌的丰度，进而保护肠道功能。Wang 等^[61]的研究也证实了燕麦 β-葡聚糖能增加肠内菌丛的多样性，调节肠内菌丛的成分这一作用。Wu 等^[62]的研究表明燕麦 β-葡聚糖可以通过增加短链脂肪酸的生成，提高肠屏障相关基因的表达水平。这些结果如表 2 显示，燕麦 β-葡聚糖具有对肠道菌群及相关代谢物的调节作用，具备抑制炎症的功能，有助于肠道疾病的预防以及改善。对于在燕麦 β-葡聚糖影响下微生物群的相互作用还有待进一步研究。

表 2 燕麦β-葡聚糖功能特性研究概况

Table 2 General situation on functional properties research for oat β-glucan

研究对象	作用	参考文献
/	具有抗氧化能力	[52]
健康大鼠和 LPS 诱导肠炎大鼠	对健康及患病大鼠都具有积极作用，尤其体现在抗氧化能力上	[55]
TNBS 诱导肠炎大鼠	在 TNBS 诱导结肠小鼠中具有间接抗氧化性，低分子量的 β-葡聚糖作用明显	[56]
断奶家兔	对结肠、血清代谢组分析，改善肠道菌群组成，促进有益菌群，抗炎，保护肠道功能	[60]
糖尿病肾病大鼠	对糖尿病肾病等不同对象肠道菌群调节和改善作用，减轻炎症反应，对短链脂肪酸杆菌、乳酸杆菌、瘤胃球菌分析，增强肠道屏障保护功能	[61]

3 燕麦β-葡聚糖在水产品中的应用

3.1 在水产养殖中的应用

β-葡聚糖是水产养殖中应用最广泛的天然免疫

刺激剂之一^[63], β -葡聚糖作为一种具有益生元潜力的膳食纤维, 对肠道功能具有潜在的促进健康作用^[64], 作为一种具备改善先天免疫特性的益生元, 在细胞因子水平上, 它促进机体更好的生长和对压力的耐受性, 提高存活率^[65,66]。因此, β -葡聚糖是一种有价值的功能性成分, 被广泛应用于水产饲料当中^[67]。燕麦 β -葡聚糖同样具备免疫调节等功效, 并已被在几种动物模型中被证实^[68,69]。Udayangani 等^[68]将燕麦 β -葡聚糖溶于含乳化剂的纯水中, 并超声处理 5 min 制得纳米级燕麦 β -葡聚糖, 用于喂养斑马鱼幼鱼, 结果发现其能有效增加斑马鱼幼虫的存活率, 增强斑马鱼幼鱼的抗病能力。同时还表明纳米级燕麦 β -葡聚糖可以长时间悬浮在水中且不容易聚集, 有利于添加到饲料中使用; 实时荧光定量 PCR 结果显示纳米级燕麦 β -葡聚糖的免疫调节功能随着浓度的升高而增强, 免疫功能基因包括 TNF- β 、IL-1 β 、 β -防御素、溶菌酶、IL 10、IL 12 和 C-Rel 的在含量为 500 mg/mL 时具有最高的表达。总之, 燕麦 β -葡聚糖展现出无毒和在鱼类肠道中优秀的保护作用, 具有较强的抗病能力, 是一种潜在的仔鱼免疫刺激剂, 但目前对于燕麦 β -葡聚糖在水产动物中免疫调节特性的研究较少, 相关知识并不完备, 需要进一步扩大研究。

Priscila 等^[70]为了提高枯草芽孢杆菌在储存和暴露于不利条件下的存活率, 采用喷雾干燥技术利用燕麦 β -葡聚糖微胶囊化, 并进行微囊化的细胞的表征实验, 通过暴露于模拟胃液在不同温度下存储 90 d, 表征包括分析的效率、形态、水分、水活性、吸湿性、粒径, Zeta 电位微胶囊粒径为 1.5 μ m, 包封率为 77.9%。经处理后微囊化细胞的存活率为 8.4 log CFU/mL, 而游离细胞的存活率为 7.6 log CFU/mL。贮存 90 d 后, 只有微囊化细胞保持在 6 个对数单位以上的活力。喷雾干燥技术结合燕麦葡聚糖的添加可以有效保护枯草芽孢杆菌。在水溶液中, β -葡聚糖因其良好的粘性从而形成黏稠的基质, 有助于包裹材料或生物细胞, 并因此形成膜。燕麦 β -葡聚糖有着可促进益生菌的生长的优秀益生元成分, 而微胶囊化过程可以有效保护益生菌。利用 β -葡聚糖所具备的出色理化性质和丰富营养特性作为微胶囊的壁材料, 为其在鱼类饲料中的应用提供好的保护, 具有重要的应用潜力。

目前酵母 β -葡聚糖在鱼、虾、贝类等水产动物中的研究较为广泛, 燕麦 β -葡聚糖的应用寥寥无几,

其原因可能是目前燕麦 β -葡聚糖的提取和结构特性仍未研究透彻, 成本相对较高。但燕麦 β -葡聚糖的分子量较小, 支链丰度高, 生物活性强, 有更佳的穿透能力和被吸收能力; 相比酵母 β -葡聚糖, 燕麦 β -葡聚糖的水溶性更优秀, 燕麦 β -葡聚糖在水产动物中的应用仍需进行分析和探讨, 同时进一步探索不同品种来源的 β -葡聚糖在结构、连接方式、功能等方面的共通和差异, 不仅能提升人们对 β -葡聚糖的认知, 还能促进多种资源和功能成分的开发与利用。

3.2 在水产食品中的应用

在过去几年中, 研究燕麦在食品中的应用的兴趣变的更加广泛。许多文献表明燕麦 β -葡聚糖提供调节胃肠道健康和提高机体免疫力等诸多功效。世界范围内对燕麦产品的需求正在迅速增长, 燕麦 β -葡聚糖在食品工业中的利用还有相当大的潜力。燕麦 β -葡聚糖表有良好的乳液稳定能力、保水能力、凝胶能力和结合水的能力^[44,71], 且在烘培中可以一定程度上的代替油脂, 不会对其物理特性和感官质量产生不利影响, 为燕麦 β -葡聚糖在水产食品中的进一步应用提供了可能。

燕麦 β -葡聚糖可以促进蛋白质的解折叠和交联, 形成了更均匀、更致密的凝胶网络结构, 进而使更多的水被捕获在网络结构中并被固定化^[46,72,73]。He 等^[74]将燕麦 β -葡聚糖掺入到白鲢鱼糜中, 发现燕麦 β -葡聚糖的添加量在 1.0% 时, 白鲢鱼糜的凝胶特性得到了显著的提高, 鱼糜凝胶网络结构也在这是最为紧凑和有序。鱼糜凝胶网络结构在加入 1.0% 的燕麦 β -葡聚糖时蒸煮损失降到最低, 并且不动水的占比也提升到最大, 这同时与燕麦 β -葡聚糖本身具有一定的亲水性有关, 这一研究结果与之前在猪肉、鸡肉制品中得到的实验结果类似。但燕麦 β -葡聚糖的添加量并非越大越好, 随着燕麦 β -葡聚糖的含量续增加, 鱼糜凝胶性能反而迅速降低, 其中的机理还有待进一步研究。相比与对照组, 由于提取工艺不同, 有的燕麦 β -葡聚糖色泽为黄色, 会影响添加物的色泽, 所以在提取燕麦 β -葡聚糖时要考虑这个因素, 另外其也适宜应用在当前水产预制菜食品中, 提升水产品的品质。Mohsen 等^[75]和 Sarteshnizi 等^[44]的研究表明在水产品中添加少量的燕麦 β -葡聚糖, 可以减少其肉质中水分的流失, 保持较好的嫩滑口感。

He 等^[47]研究了超声波结合燕麦 β -葡聚糖处理提升鱼糜凝胶强度,结果发现在超声频率为 25 kHz,强度为 75.60 W/cm²,燕麦 β -葡聚糖对鱼糜质构性质、凝胶强度和保水性方面的改善效果较无超声处理有所提升且鱼糜的色泽更白,说明超声波结合燕麦 β -葡聚糖可有效提升鱼糜的品质。

燕麦 β -葡聚糖被证实具有抗氧化性^[76],可降低水产品的氧化损伤,延长货架期,其在猪肉和鸡肉制品中的广泛应用也进一步印证了其在肉制品工业中的重要性,表 3 为现阶段燕麦 β -葡聚糖在水产品中的应用概况。目前燕麦 β -葡聚糖在水产食品中的研究较少,结合燕麦 β -葡聚糖的功能特性及目前它在水产食品中的一些应用效果,证明其对水产品的品质有很好的改良效果,所以未来要深入研究燕麦 β -葡聚糖在各类水产食品中的应用效果及作用机制,更好地提升水产食品品质,同时也促进燕麦 β -葡聚糖的开发利用。

表 3 燕麦 β -葡聚糖在水产品中的应用概况
Table 3 The application of oat β -glucan in aquatic products

类别	用途	应用功能	参考文献
水产养殖	斑马鱼幼鱼饲料	纳米级燕麦 β -葡聚糖对斑马鱼幼鱼的免疫调节的影响,其是幼鱼养殖的潜在免疫刺激剂。	[68]
	尼罗罗非鱼饲料	将 β -葡聚糖通过微胶囊化用于罗非鱼饲料具有潜在应用前景。	[70]
水产食品	白鲢鱼糜	1.0% 添加量的 β -葡聚糖对鱼糜凝胶性能的提升效果最显著。	[74]
	白鲢鱼糜	β -葡聚糖可以显著提高不同盐度鱼糜凝胶的质构性质,凝胶强度以及持水性。	[47]

4 总结与展望

燕麦 β -葡聚糖是一种具有明显的健康功效的可溶性膳食纤维,同时具备优秀的营养价值、经济价值和医疗价值,可广泛应用于功能性食品及生物医药领域。目前已被从燕麦及其副产品(麸皮等)中单独提取纯化,并投入到各类食品的生产加工中。因此,燕麦 β -葡聚糖已经成为健康食品领域的炙手可热的原料或食品配料之一。(1) 目前虽然已有多项研究关注如何提高燕麦 β -葡聚糖提取率及纯度,但因工艺问题仍然不能进行大规模制备,缺乏适合工业化生产的兼具低成本和高品质的提取纯化工艺,这仍然是制约燕麦 β -葡聚糖进一步产业化发展的主因。同时,寻找新型的提取和纯化技术,探

索燕麦 β -葡聚糖在水产品中的广泛应用也是至关重要,包括克服当前工艺难题,提高生产效率,确保产品质量。(2) 此外,关于燕麦 β -葡聚糖的研究数量和角度很多,但是对于在水产养殖中的研究颇为匮乏。深入了解燕麦 β -葡聚糖在水产养殖中的效益,探索燕麦 β -葡聚糖在水产养殖中的抗氧化、抗炎和抗菌等方面的作用,研究阐释其对水产动物生长性能的具体作用机制及机体内多组织与器官之间的作用是未来的重点。还需进一步考察水体生态环境,确保燕麦 β -葡聚糖应用有益于小动物时并不会对水域生态系统产生负面效应。(3) 使用含燕麦 β -葡聚糖产品有着很好的前景,在过去几年中, β -葡聚糖因其已被证明的健康益处而越来越普及,在例如乳制品、烘焙制品和肉类等广为应用。未来应该结合燕麦 β -葡聚糖的特性,探索其在预制菜中的应用,改善预制菜的口感、质地、以提高菜品的营养价值,创新开发具有功能性和美味性的预制菜产品,为消费者提供更健康的食品选择,满足市场对健康食品的需求。

参考文献

[1] PEMA R, KAREN S, LIPING Y, et al. Oat beta-glucan alone and in combination with hydrochlorothiazide lowers high blood pressure in male but not female spontaneously hypertensive rats [J]. *Nutrients*, 2023, 15(14): 3180.

[2] SCHLÖRMANN W, BOCKWOLDT J A, MAYR M F, et al. Fermentation profile, cholesterol-reducing properties and chemopreventive potential of β -glucans from *Levilactobacillus brevis* and *Pediococcus claussenii*-a comparative study with β -glucans from different sources [J]. *Food Function*, 2021, 12(21): 10615-10631.

[3] MAŁGORZATA D, MONIKA P, JUSTYNA B, et al. Multi-bioactivity of protein digests and peptides from oat (*Avena sativa* L.) kernels in the prevention of the cardiometabolic syndrome [J]. *Molecules*, 2022, 27(22): 7907.

[4] YANG Q, CAI X X, ZHU Y D, et al. Oat β -glucan supplementation pre- and during pregnancy alleviates fetal intestinal immunity development damaged by gestational diabetes in rats [J]. *Food Function*, 2023, 14(18): 8453-8466.

[5] RUNNAN L, ALMA D T, LEI S, et al. Structural modification of oat protein by thermosonication combined with high pressure for O/W emulsion and model salad dressing production [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 255: 128109-128109.

[6] BERTHOLDT K M A, BAIER K A, RAUH C. Potential of modification of techno-functional properties and structural characteristics of citrus, apple, oat, and pea dietary fiber by

- high-intensity ultrasound [J]. Foods, 2023, 12(19): 3663.
- [7] GUNJAN M, SUMATHI S, BABY J. Extraction and isolation of β -glucan from grain sources-a review [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(7): 1535-1545.
- [8] NORIYOSHI M, YOSHIKI Y. 3D Structural insights into β -glucans and their binding proteins [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(4): 1578.
- [9] LUO Y, LI Y C, MENG F B, et al. Simultaneously enhanced stability and biological activities of chlorogenic acid by covalent grafting with soluble oat β -glucan [J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100546.
- [10] CYRAN MAŁGORZATA R, SNOCHOWSKA KRZYSZTOFA K, POTRZEBOWSKI MAREK J, et al. Xylan-cellulose core structure of oat water-extractable β -glucan macromolecule: Insight into interactions and organization of the cell wall complex [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 324: 121522.
- [11] HONGWEI C, XIAOXUE W, MENGMEI S, et al. Influence of physicochemical changes and aggregation behavior induced by ultrasound irradiation on the antioxidant effect of highland barley β -glucan [J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100793.
- [12] MA X, DONG L, HE Y, et al. Effects of ultrasound-assisted Hsub2/subOsub2/sub on the solubilization and antioxidant activity of yeast β -glucan [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106210.
- [13] BERGENDIOVA K, TIBENSKA E, MAJTAN J. Pleuran (beta-glucan from *Pleurotus ostreatus*) supplementation, cellular immune response and respiratory tract infections in athletes [J]. European Journal of Applied Physiology, 2011, 111(9): 2033-2040.
- [14] MALL G J, LÖFVENDAHL L, BRUMMER R, et al. Differential effects of dietary fibres on colonic barrier function in elderly individuals with gastrointestinal symptoms [J]. Clinical Nutrition, 2018, 37(Supl.1): S8.
- [15] BAI J Y, REN Y K, LI Y, et al. Physiological functionalities and mechanisms of betaglucans [J]. Trends Food Sci. Technol, 2019, 88, 57-66.
- [16] SIBAKOV J, ABECASSIS J, BARRON C, et al. Electrostatic separation combined with ultra-fine grinding to produce β -glucan enriched ingredients from oat bran [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 445-455.
- [17] 汪海波,刘大川,谢笔钧.燕麦中 β -葡聚糖的提取及分离纯化工艺研究[J].食品科学,2004,5:143-147.
- [18] 潘妍,吴昊.正交优化燕麦 β -葡聚糖提取及其分子特性研究[J].北京工商大学学报(自然科学版),2009,27(5):5-9.
- [19] WOOD P J, SIDDIQUI I R, PATON D. Extraction of high-viscosity gums from oats [J]. Cereal Chemistry, 1978, 55(6): 1038-1049.
- [20] 林伟静,吴广枫,王强,等.燕麦全粉中 β -葡聚糖提取工艺优化[J].食品与机械,2010,26(1):121-124,167.
- [21] KRATCHANOVA M, PAVLOVA E, PANCHEV I. The effect of microwave heating of fresh orange peels on the fruit tissue and quality of extracted pectin [J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 56: 181-185.
- [22] 王尚玉,舒静,夏文水.燕麦麸皮 β -葡聚糖的微波辅助浸提技术研究[J].食品工业科技,2005,12:143-144,171.
- [23] 申瑞玲,董吉林,王章存.裸燕麦麸皮 β -葡聚糖微波提取工艺研究[J].中国农学通报,2006,10:316-320.
- [24] 梁茜茜,李芬,李良玉,等.超声—微波协同法提取燕麦麸皮多糖的参数优化及结构分析[J].中国食品添加剂,2016, 9:178-187.
- [25] NEHA M,NEETU M,PRAGYA M. Influence of different extraction methods on physicochemical and biological properties of β -glucan from Indian barley varieties [J]. Carpathian Journal of Food Science and Technology, 2020, 12(1): 27-39.
- [26] AKTAS-AKYILDIZ E, SIBAKOV J, NAPPA M, et al. Extraction of soluble β -glucan from oat and barley fractions: Process efficiency and dispersion stability [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 81: 60-68.
- [27] SIBAKOV J, MYLLYMÄKI O, SUORTTI T, et al. Comparison of acid and enzymatic hydrolyses of oat bran β -glucan at low water content [J]. Food Research International, 2013, 52(1): 99-108.
- [28] PATIST A, BATES D. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2007, 9(2): 147-154.
- [29] BHASKARAEHARYA K R, ASHOKKUMAR M, KENTISH S. Selected Applications of Ultrasonics in Food Processing [J]. Food Engineering Reviews, 2009, 1(1): 31-49.
- [30] 翟爱华,张莉姝,王东.777超声辅助提取燕麦麸皮中 β -葡聚糖的工艺研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2008, 5:61-64.
- [31] 李密转,路文秀,李名立,等.超声波联合酶法提取燕麦麸皮 β -葡聚糖的工艺优化[J].贵州农业科学,2020,48(11): 91-95.
- [32] CHEN C, WANG L, WANG R, et al. Ultrasound-assisted extraction from defatted oat (*Avena sativa* L.) bran to simultaneously enhance phenolic compounds and β -glucan contents: Compositional and kinetic studies [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 222: 1-10.
- [33] SOURKI H A, KOOCHAKI A, ELAHI M. Ultrasound-assisted extraction of β - d -glucan from hull-less barley: Assessment of physicochemical and functional properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 95: 462-475.
- [34] WU J, JIN S, WU S, et al. Effect of filamentous fungi fermentation on the extractability and physicochemical

- properties of β -glucan in oat bran [J]. Food Chemistry, 2018, 254: 122-128.
- [35] 吴迪, 邢雪, 王昌涛, 等. 双向发酵提取燕麦 β -葡聚糖及其理化性质研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(1): 184-193.
- [36] BANSAL N, TEWARI R, SONI R, et al. Production of cellulases from *Aspergillus niger* NS-2 in solid state fermentation on agricultural and kitchen waste residues [J]. Waste Management, 2012, 32(7): 1341-1346.
- [37] BEI Q, CHEN G, LU F, et al. Enzymatic action mechanism of phenolic mobilization in oats (*Avena sativa* L.) during solid-state fermentation with *Monascus anka* [J]. Food Chemistry, 2018, 245: 297-304.
- [38] KUREK A M, KARP S, STELMASIAK A, et al. Effect of natural flocculants on purity and properties of β -glucan extracted from barley and oat [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 188: 60-67.
- [39] 吴佳, 林向阳, 黄迪惠, 等. 燕麦 β -葡聚糖的冻融法提取及其结构表征[J]. 中国食品学报, 2011, 11(4): 48-54.
- [40] 王冲, 邹佳文, 陈虹均, 等. 超高压-超声波协同法提取藜麦 β -葡聚糖的工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(6): 39-44.
- [41] YOO H, KO M, CHUNG M. Hydrolysis of beta-glucan in oat flour during subcritical-water extraction [J]. Food Chemistry, 2020, 308(C): 125670.
- [42] NGUYEN S H, HEINONEN J, LAATIKAINEN M, et al. Evolution of the molar mass distribution of oat β -glucan during acid catalyzed hydrolysis in aqueous solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 382: 122863.
- [43] NANCY A, NKHATA L M, REBECCA M, et al. Effect of processing on oat β -glucan viscosity, postprandial glycemic response and subjective measures of appetite [J]. Food Function, 2021, 12(8): 3672-3679.
- [44] SARTESHNIZI A R, HOSSEINI H, BONDARIANZADEH D, et al. Optimization of prebiotic sausage formulation: Effect of using β -glucan and resistant starch by D-optimal mixture design approach [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 62(1): 704-710.
- [45] VASILEIA S, KALI K, G. CB, et al. Emulsion gel enriched with a barley β -glucan concentrate for reducing saturated fat in biscuits [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109163.
- [46] WANG Z W, SUN Y Y, DANG Y L, et al. Water-insoluble dietary fibers from oats enhance gel properties of duck myofibrillar proteins [J]. Food Chemistry, 2020, 344: 128690.
- [47] HE X L, ZHAO H L, XU Y X, et al. Synergistic effects of oat β -glucan combined with ultrasound treatment on gel properties of silver carp surimi [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 95: 106406.
- [48] DONGOWSKI G, DRZIKOVA B, SENGE B, et al. Rheological behaviour of β -glucan preparations from oat products [J]. Food Chemistry, 2004, 93(2): 279-291.
- [49] JUNG H K, J P W. Impact of the molecular weight, viscosity, and solubility of β -glucan on *in vitro* oat starch digestibility [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(13): 3270-3277.
- [50] JOHANSSON L, KARESOJA M, EKHOLM P, et al. Comparison of the solution properties of (1 $\rightarrow$ 3)(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucans extracted from oats and barley [J]. LWT - Food Science and Technology, 2007, 41(1): 180-184.
- [51] JIANLIN C, YANG L, ZIJIONG D, et al. Toxicological damages on copper exposure to IgMsup+/sup B cells of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and mitigation of its adverse effects by β -glucan administration [J]. Toxicology in Vitro, 2022, 81: 105334.
- [52] CUI Y M, HAN X D, HU X P, et al. Distinctions in structure, rheology, antioxidation, and α -glucosidase inhibitory activity of β -glucans from different species [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253(P8): 127684.
- [53] SUCHECKA D, HARASYM J, WILCZAK J, et al. Hepato- and gastro- protective activity of purified oat 1-3, 1-4- β -d-glucans of different molecular weight [J]. Int J Biol Macromol, 2016, 91: 1177-1185.
- [54] DU B, XU B. Oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and ferric reducing antioxidant power (FRAP) of β -glucans from different sources with various molecular weight [J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2014, 3(1): 11-16.
- [55] JACEK W, KATARZYNA B, DARIUSZ K, et al. The effect of low or high molecular weight oat beta-glucans on the inflammatory and oxidative stress status in the colon of rats with LPS-induced enteritis [J]. Food Function, 2015, 6(2): 590-603.
- [56] ŁUKASZ K, KATARZYNA D, MAŁGORZATA G, et al. Time-dependent indirect antioxidative effects of oat beta-glucans on peripheral blood parameters in the animal model of colon inflammation [J]. Antioxidants, 2020, 9(5): 375.
- [57] JAYACHANDRAN M, CHEN J, CHUNG S S M, et al. A critical review on the impacts of β -glucans on gut microbiota and human health [J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2018, 61: 101-110.
- [58] BAI J Y, LI T T, ZHANG W H, et al. Systematic assessment of oat β -glucan catabolism during *in vitro* digestion and fermentation [J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129116.
- [59] PHAM V T, SEIFERT N, RICHARD N, et al. The effects of fermentation products of prebiotic fibres on gut barrier and immune functions *in vitro* [J]. PeerJ, 2018, 6: e5288.
- [60] MA L, LUO Z Z, HUANG Y X, et al. Modulating gut microbiota and metabolites with dietary fiber oat β -glucan interventions to improve growth performance and intestinal function in weaned rabbits [J]. Frontiers in Microbiology,

- 2022, 13: 1074036.
- [61] WANG R Y, ZHANG Z F, AIHEMAITIJIAN S, et al. Oat β -glucan ameliorates renal function and gut microbiota in diabetic rats [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 875060.
- [62] WU X Y, CHEN D W, YU B, et al. Effect of different dietary non-starch fiber fractions on growth performance, nutrient digestibility, and intestinal development in weaned pigs [J]. *Nutrition*, 2018, 51-52: 20-28.
- [63] STEINHAGEN, DIETER, ADAMEK, et al. Dietary beta-glucan (MacroGard (R)) enhances survival of first feeding turbot (*Scophthalmus maximus*) larvae by altering immunity, metabolism and microbiota [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2016, 48: 94-104.
- [64] MARTIN G, ALEJANDRA Z, LUIS J P, et al. Modulation of postprandial plasma concentrations of digestive hormones and gut microbiota by foods containing oat β -glucans in healthy volunteers [J]. *Foods*, 2023, 12(4): 700-700.
- [65] DOS S V, ANA P S, LUCAS D F D, et al. β -Glucan improves wound healing in silver catfish (*Rhamdia quelen*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 93: 5.
- [66] REVINA O, AVSEJENKO J, REVINS V. Effect of dietary supplementation with β -glucan on growth performance and skin-mucus microbiota of sea trout (*Salmo trutta*) [J]. *Fisheries & Aquatic Life*, 2020, (3): 28.
- [67] WILSON W, LOWMAN D, ANTONY P S, et al. Immune gene expression profile of *Penaeus monodon* in response to marine yeast glucan application and white spot syndrome virus challenge [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2015, 43(2): 346-356.
- [68] UDAYANGANI R, DANANJAYA S, FRONTE B, et al. Feeding of nano scale oats β -glucan enhances the host resistance against *Edwardsiella tarda* and protective immune modulation in zebrafish larvae [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2017, 60: 72-77.
- [69] BŁASZCZYK K, GAJEWSKA M, WILCZAK J, et al. Oral administration of oat beta-glucan preparations of different molecular weight results in regulation of genes connected with immune response in peripheral blood of rats with LPS-induced enteritis [J]. *European Journal of Nutrition*, 2019, 58(7): 2859-2873.
- [70] PRISCILA A A C D, AMANDA A C D, FERREIRA A R R, et al. Microencapsulation of *Bacillus subtilis* and oat β -glucan and their application as a synbiotic in fish feed [J]. *Journal of Microencapsulation*, 2023, 40(7): 11-15.
- [71] DOMAGALA J, SADY M, GREGA T, et al. The influence of storage time on rheological properties and texture of yoghurts with the addition of oat-maltodextrin as the fat substitute [J]. *International Journal of Food Properties*, 2007, 8(3): 439-448.
- [72] RUI F, DAN Z, XUELI C. Evaluation of oat β -glucan -marine collagen peptide mixed gel and its application as the fat replacer in the sausage products [J]. *PloS One*, 2020, 15(5): e0233447.
- [73] YOLANDA B, CHERYL D, YING W, et al. Textural and rheological properties of oat beta-glucan gels with varying molecular weight composition [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(14): 3160-3167.
- [74] HE X L, LV Y A, LI X P, et al. Effect of oat β -glucan on gel properties and protein conformation of silver carp surimi [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103: 3367-3375.
- [75] MOHSEN C, EHSAN S, REZA M, et al. The effect of β -glucan and inulin on the reduction of aflatoxin B1 level and assessment of textural and sensory properties in chicken sausages [J]. *Current Research in Food Science*, 2021, 4: 765-772.
- [76] MARTA M, OLIWIA W, BEATA K, et al. Preparation and characterization of fish skin collagen material modified with β -glucan as potential wound dressing [J]. *Materials*, 2021, 14(6): 1322.