

高若涵, 马楠, 王霞, 等. 谷物 β -葡聚糖提取、分离纯化、生物活性及应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 407–414. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100127

GAO Ruohan, MA Nan, WANG Xia, et al. Cereal β -Glucan Extraction, Isolation and Purification, Bioactivity and Application Studies in Review[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 407–414. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100127

· 专题综述 ·

谷物 β -葡聚糖提取、分离纯化、生物活性及应用研究进展

高若涵, 马楠, 王霞, 曹家宝, 鹿保鑫*
(黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319)

摘要: 谷物 β -葡聚糖是一种主要存在于谷物的糊粉、亚糊粉及胚乳中, 对人体健康有积极影响的膳食纤维。谷物 β -葡聚糖因其具有预防糖尿病, 减少心血管疾病的发病率、平衡肠道菌群及增强免疫细胞活性等功效被广泛应用于食品工业中。本文概述了谷物 β -葡聚糖的提取、分离纯化、结构和生物活性, 并综述了谷物 β -葡聚糖在奶制品、烘焙食品及肉制品中的应用。对谷物 β -葡聚糖目前的研究存在的问题及解决办法进行展望, 并为谷物 β -葡聚糖食品的进一步开发和应用提供理论支持。

关键词: 谷物 β -葡聚糖, 分离纯化, 结构, 生物活性, 食品应用

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)19-0407-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100127



本文网刊:

Cereal β -Glucan Extraction, Isolation and Purification, Bioactivity and Application Studies in Review

GAO Ruohan, MA Nan, WANG Xia, CAO Jiabao, LU Baoxin*

(College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: β -Glucan derived from cereals is a crucial dietary fiber primarily found in pastes, sub-pastes, and endosperm of cereals, which has a positive impact on human health. The integration of cereal β -glucan in the food industry is widespread due to its proven effectiveness in preventing diabetes, reducing the incidence of cardiovascular disease, modulating intestinal microbiota, and enhancing immune cell function. This comprehensive review thoroughly examines the extraction, isolation, purification, structure, and biological properties of cereal β -glucans. Furthermore, the article explores the utilization of cereal β -glucans in dairy, bakery, and meat products. It provides a comprehensive overview of current research in this field, addressing both challenges and solutions, while laying the theoretical foundations for future advancements in incorporating cereal β -glucan-based foods.

Key words: cereal β -glucan; isolation and purification; structure; biological property; food applications

β -葡聚糖是一种长链多糖, 是由 D-葡萄糖单体通过糖苷键连接而成^[1], 其主要来源有谷物、细菌及真菌, 按结构可分为 β -1,3-葡聚糖、 β -1,3-1,6-葡聚糖和 β -1,3-1,4-葡聚糖^[2]。 β -葡聚糖具有调控血糖水平^[3-5]、降低血清胆固醇水平^[6-8]、平衡肠道菌群^[9-10]、增强免疫细胞活性^[11] 及调节血压^[12] 等生理功能, 可

以降低 II 型糖尿病、心血管疾病、结肠癌等疾病的发病率。此外, β -葡聚糖还可作为食品添加剂添加到乳制品等食品生产中, 改善产品的品质^[13-14]。

在 β -葡聚糖众多来源中, 青稞、燕麦等谷物提取出的 β -葡聚糖由于其含量高、来源可靠且安全, 并具有良好的理化特性成为了当前国内外科学家的研究

收稿日期: 2023-10-19

基金项目: 国家重点研发计划项目“稻谷加工精准调控技术研究及营养平衡型开发与示范”(2021YFD2100902)。

作者简介: 高若涵 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: gaoruohan2000@126.com。

* 通信作者: 鹿保鑫 (1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工, E-mail: lubaoxin72@126.com。

热点^[15-16]。研究表明,谷物 β -葡聚糖作为生物活性成分,在食品生物医药领域具有十分广阔的应用前景。本文对谷物 β -葡聚糖的提取、分离纯化、结构、生物活性和应用等方面进行综述,为谷物 β -葡聚糖的进一步开发及产品应用提供参考。

1 谷物 β -葡聚糖的结构

燕麦、青稞及大麦作为最常见的谷物 β -葡聚糖来源,其结构与细菌及真菌 β -葡聚糖有所不同^[17]。谷物 β -葡聚糖是一种主要通过 β -1,3键和 β -1,4键将葡萄糖单体连接而成的线性多糖^[18]。 β -1,3键可以有效避免分子堆积且使 β -葡聚糖具有水溶性。所以,谷物 β -葡聚糖的理化性质会因其含有 β -1,3键和 β -1,4键及纤维三糖和纤维四糖的比例等因素改变^[19-21]。

谷物 β -葡聚糖因来源不同,其含量和结构也有所不同(图1)。大麦和燕麦中的 β -葡聚糖含量(3.46%~17%)明显高于小麦及黑麦的 β -葡聚糖含量(1.5%~2.5%)^[22-23]。不同谷物 β -葡聚糖中纤维三糖和纤维四糖的比例会导致 β -葡聚糖的分子量也存在差异。比如燕麦 β -葡聚糖的分子量最高可达850 kDa^[24],而黑麦中 β -葡聚糖分子量仅为21 kDa^[25]。谷物 β -葡聚糖的不同结构也会使其理化性质发生改变。谷物 β -葡聚糖中 β -1,3键和 β -1,4键的含量及分子量会直接影响谷物 β -葡聚糖的水溶性及溶液黏度。谷物 β -葡聚糖溶液浓度越高,其溶液黏度就越高^[26]。除此之外, β -葡聚糖上的羟基可以结合水分子,由 β -1,3键连接而形成结合区,将水束缚在其中,导致 β -葡聚糖吸水溶胀^[27]。

2 谷物 β -葡聚糖的提取

谷物 β -葡聚糖的提取方法主要有热水浸提法、碱提法、酶提法以及微生物发酵法等,这些提取方法可单独使用,也可联合使用。谷物 β -葡聚糖的各种提取方法总结见表1。

2.1 热水浸提法

低分子谷物 β -葡聚糖易溶于水而不易溶于有机

溶剂,可用热水提取^[28]。有研究表明,使用热水浸提法得到的 β -葡聚糖产率为5.3%±0.3%,显著高于酸提法的产率^[29]。Irakli等^[30]使用热水浸提法对6种大麦中 β -葡聚糖进行提取,提取率在3.91%~5.93%之间。吴佳等^[31]使用热水浸提法与冻融法联用,在保留内源酶活性的情况下,经过3次冻融,燕麦 β -葡聚糖的得率为1.5%,纯度为92%。但是,热水浸提法提取时间相对较长,Woodward等^[32]对大麦中 β -葡聚糖进行提取,提取时间43 h,最后得率为2.5%~5.4%。

因此,尽管水提法所使用的提取条件较为温和,但具有提取时间长,且如果不与其他方法联用,得到的 β -葡聚糖会有纯度相对较低的缺点,所以只能作为基础提取方式。

2.2 碱提法

高分子 β -葡聚糖不易溶于水,但易溶于一些稀碱溶液,如NaOH、Na₂CO₃,因此,可用稀碱溶液提取谷物 β -葡聚糖^[33]。Al-jumaice等^[34]使用0.1 mol/L NaOH溶液分别从面包酵母和大麦麸皮中提取 β -葡聚糖, β -葡聚糖的最优得率分别为5.95%和5.18%。Rimsten等^[35]分别使用Na₂CO₃、0.05 mol/L NaOH及含耐热淀粉酶的热对谷物进行提取,结果表明,利用碱法提取 β -葡聚糖的纯度为86%~98%,而热水浸提法的 β -葡聚糖纯度只有28%~36%。有研究证明,在pH10.9,提取时间1.9 h,料液比1:21,提取温度85℃的工艺条件下,使用碱提法对燕麦中 β -葡聚糖进行提取,得率为4.36%^[36]。

碱提法虽然提取率较高,但提取出的谷物 β -葡聚糖分子量低,并具有较多杂质,对后续纯化脱色产生影响。

2.3 酶提法

酶提法是利用酶的特异性将谷物 β -葡聚糖提取液中杂质分解^[37]。据报道,大麦麸皮提取液经使用 α -淀粉酶、蛋白水解酶及木聚糖酶处理后, β -葡聚糖的含量达到88.56%^[38]。类似研究发现,酶提的 β -葡

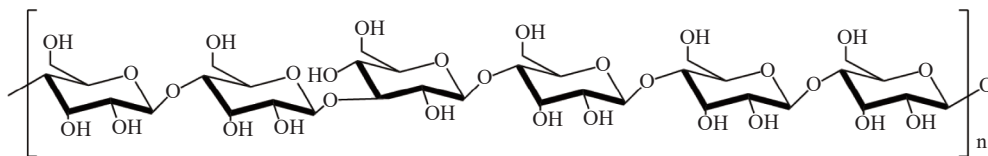


图1 谷物 β -葡聚糖结构

Fig.1 Structure of cereal β -glucan

表1 谷物 β -葡聚糖的提取方法比较

Table 1 Comparison of extraction methods for cereal β -glucan

方法	原料	优点	缺点	参考文献
热水浸提法	大麦、青稞、燕麦	提取条件温和	提取时间长、溶剂用量大、纯度和生物活性低	[45-47]
碱提法	青稞、大麦、小麦	提取率高	分子量降低、后续脱色纯化困难	[48-50]
酶提法	大麦、燕麦	提取过程安全、提取率高、纯度高	工艺不成熟	[38,51]
微生物发酵法	燕麦、大麦	提取率及纯度高	菌种筛选较困难	[42,52]

聚糖具有杂质少、分子量大、得率高等优点^[39]。Neha 等^[40]利用碱法、酸法、热水浸提法及酶提法 4 种不同方法从大麦中分离 β -葡聚糖,其中使用 α -淀粉酶、蛋白水解酶的酶提法提取率显著高于其他方法。

酶提法具有提取过程安全、污染小、纯度高的优点,而且提取效率更高。酶提法常应用在其他活性物质的提取中,因此酶提法用于谷物 β -葡聚糖的提取是完全可靠的。

2.4 微生物发酵辅助提取法

微生物发酵辅助提取法提取谷物 β -葡聚糖是将筛选好的菌种接种到谷物浸提液中,在适宜条件下发酵,通过对发酵液离心得到谷物 β -葡聚糖^[41]。Wu 等^[42]利用黑曲霉和米根霉分别对燕麦麸皮 β -葡聚糖进行提取,结果表明,发酵后提取率分别提高到了 45.57% 和 51.10%,为发酵前的 3 倍,且分子量得到显著降低。类似研究表明,使用 3 种菌种,以燕麦麸皮作为培养基,利用双向发酵法从燕麦麸皮发酵液中提取 β -葡聚糖,其与发酵前对比,得率显著提高,分子量显著降低^[43]。刘新琦等^[44]在料液比为 1:6,接种 0.05% 高活性酵母,在 32 °C 下发酵 34 h 条件下, β -葡聚糖的得率为 5.21%,比热水浸提法提高了 60.8%。

微生物发酵辅助提取法对比水提法,谷物 β -葡聚糖的提取率和纯度较高,但菌种的筛选以及后续分离纯化增加了提取的工作量。

3 谷物 β -葡聚糖的分离纯化

从谷物中提取得到的 β -葡聚糖含有淀粉、蛋白质、杂多糖、色素以及小分子物质等杂质,由于提取后谷物 β -葡聚糖纯度不够,不能满足实际生产的纯度要求,所以需要将其中杂质去除以提高纯度。

3.1 淀粉和蛋白质的去除

因谷物中蛋白质和淀粉含量较高,蛋白质和淀粉的去除也是谷物 β -葡聚糖粗提液分离纯化中最重要的部分。

在提取谷物 β -葡聚糖的过程中,由于高温导致谷物中淀粉糊化,随 β -葡聚糖一并被提取,进而影响了 β -葡聚糖的纯度。在实际提取中,常用 α -淀粉酶及糖化酶将淀粉水解为小分子葡萄糖,再经透析除去。Papageorgiou 等^[53]使用 α -淀粉酶在 pH4.5, 90 °C, 提取 3 h 条件下,最终提取出来的大麦 β -葡聚糖和燕麦 β -葡聚糖中几乎无淀粉。

而蛋白质是谷物 β -葡聚糖粗提液中除淀粉外又一大类杂质。去除杂质蛋白质常用 Sevag 法、三氯三氯乙烷法、三氯乙酸(TCA)法、酶法、等电点法等单一方法,或酶-Sevag 法、酶-等电点法等联用方法,其中 TCA 法和 Sevag 法中所用的三氯乙酸、氯仿和正丁醇试剂均为有机溶剂,易挥发,会对环境造成污染,且除蛋白的效果不是很好,因此通常使用酶法去蛋白,效果更佳,去除率可达 88.6%^[54]。郭欢^[55]加入

耐高温 α -淀粉酶与胰酶去除粗青稞 β -葡聚糖提取液中剩余的淀粉和蛋白质,最终样品中 β -葡聚糖纯度为 93.8%。Harasym 等^[56]多种酶联用,经胰酶、 α -淀粉酶及等电点沉淀除去杂质, β -葡聚糖纯度均可达到 97%;如果使用胰酶、 α -淀粉酶、淀粉糖苷酶及木瓜蛋白酶连续除杂, β -葡聚糖的纯度高达 99.25%。

可以看出,目前,若想在谷物中提取出纯度较高的 β -葡聚糖,大多需使用多种酶联合使用才有可能达到目的。相比较其他方法,酶法作为国内外研究常用的初级纯化方法,具有较好的杂质脱除率和 β -葡聚糖保留率。

3.2 色素及小分子物质的去除

β -葡聚糖粗提液中色素会影响产品的最终质量,因此需要脱色处理。去除色素常采用活性炭吸附,活性炭吸附色素的同时可以吸附蛋白质^[57],该方法具有操作简单的优点,但脱色时间长,多糖损失量大,活性炭难以从多糖中过滤出来。此外,还可用硅藻土和大孔吸附树脂等方法吸附色素^[58]。其中,使用大孔吸附树脂脱色的 β -葡聚糖保留率较高。贾莹等^[59]利用 XAD-7 树脂对色素进行吸附,在样品溶液 40 °C, pH6, 流速 0.5 mL/min 的条件下,脱色率为 72.9%,损失率仅为 4.3%。

β -葡聚糖粗提液中的小分子物质和杂多糖可以利用乙醇、丙酮等作为沉淀剂来去除。Ryu 等^[60]用 Na_2CO_3 溶液提取 β -葡聚糖,粗提液再使用 300 g/L 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 50% 的异丙醇纯化,去除部分醇溶性杂质后 β -葡聚糖得率为 1.9%,纯度为 78.8%。同时有研究表明在低于淀粉糊化温度的条件下水提,后将淀粉酶解去除淀粉,调节 pH 至酸性除蛋白质,最后用乙醇沉淀去除提取液中的小分子物质,得到的 β -葡聚糖纯度为 93.7%^[61]。董兴叶^[62]利用超声波技术提取燕麦 β -葡聚糖,平均得率为 4.09%,经淀粉酶、胰蛋白酶-等电点法、树脂脱色后, β -葡聚糖纯度为 91.10%。

谷物 β -葡聚糖的提取液经过初步纯化工艺,其纯度已经达到较高水平,但完全纯化还需要层析等方法。

3.3 分级纯化

为获得高纯度且单一组分的 β -葡聚糖,还需对初级纯化获得的 β -葡聚糖提取物进行分级纯化,以层析法为主。

刘焕云等^[63]利用水提法,使用耐热 α -淀粉酶去除淀粉与等电点沉淀法去除蛋白质后经醇析后得到粗品 β -葡聚糖的得率为 6.52%,纯度为 75.56%,后用硫酸铵分级法进一步纯化,纯度可提高到 90.66%。谢昊宇等^[64]利用碱提法提取 β -葡聚糖,粗提物中 β -葡聚糖含量为 62.63%,后经分级纯化处理后,样品含量提高到 94.91%。类似研究表明,提取小麦麸皮中 β -葡聚糖,利用耐热 α -淀粉酶、等电点沉淀及木聚糖酶去除杂质后,粗提物中 β -葡聚糖的含量为 76.62%,

再利用硫酸铵沉淀及层析纯化后, β -葡聚糖的含量为 97.93%^[65]。

层析后的谷物 β -葡聚糖, 已达到葡聚糖制剂的要求, 能满足食品以及医药制剂的高纯度标准, 但纯化过程中耗材的消耗也成为了大规模工业化生产的阻碍。

4 谷物 β -葡聚糖的生物活性

谷物 β -葡聚糖具有降低血糖及胆固醇, 使肠道菌群正常化, 增强免疫细胞活性和改善大脑功能等功效, 也为其在功能性食品等方面的开发赋予了巨大潜能。

4.1 降血糖作用

糖尿病是一类以高血糖、高血脂为主要特征的慢性疾病。随着生活质量的提高, 糖尿病的患病率逐年上升, 而 β -葡聚糖对缓解糖尿病症状、改善糖尿病药物包装、加强药物储存均具有积极影响, 引起了研究人员的广泛关注^[66]。

研究表明, 高浓度的燕麦 β -葡聚糖溶液可以刺激胰岛素分泌, 改善肝源性糖代谢。此外, β -D-葡聚糖还能显著修复和改善胰岛 β 细胞和组织结构的完整性, 使其在链脲佐菌素-烟酰胺诱导的糖尿病小鼠中具有很强的降血糖作用^[67]。Guo 等^[68] 利用燕麦 β -葡聚糖对高脂饮食和链脲佐菌素诱导的高血糖小鼠进行饮食干预, 结果表明, 燕麦 β -葡聚糖使小鼠的空腹血糖明显降低, 改善了小鼠葡萄糖耐量和胰岛素敏感性。同时也有研究证明燕麦 β -葡聚糖增加肠道食糜粘度的能力, 使小鼠的血糖含量降低^[69]。目前, 谷物 β -葡聚糖也可被应用于降糖药物的薄膜中, Avramia 等^[70] 开发了一种负载 β -葡聚糖的防水性较好的结构紧凑高密度膜, β -葡聚糖的加入, 使疏水性变差, 透气性变差, 吸湿性更低, 水活度更低, 会抑制微生物生长, 并且可以在常温下储存, 对预防糖尿病等代谢疾病相关并发症方面有积极影响。

4.2 降低血清胆固醇作用

高胆固醇是导致心血管疾病和代谢紊乱的重要因素^[71], 谷物 β -葡聚糖可使血浆中总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇降低, 但不会影响高密度脂蛋白胆固醇及甘油三酯^[72]。Joyce 等^[73] 指出燕麦 β -葡聚糖可通过调节人体胆汁酸和胆固醇的代谢来降低人体内的胆固醇含量。Groot 等^[74] 指出 β -葡聚糖能有效降低胆固醇的合成, 并经过大量动物实验和人体试验证明了该结论。同时也有研究发现饲喂 β -葡聚糖可使斑马鱼血浆中总胆固醇降低^[75]。Tong 等^[76] 发现了饲喂 β -葡聚糖组的小鼠可依靠排便, 使血浆中胆固醇含量降低, 从而降低小鼠体内的胆固醇含量。综上所述, 谷物 β -葡聚糖可以改善胆固醇代谢并且不会产生不良影响, 具有促进人体健康的作用。

4.3 平衡肠道菌群

因人体中缺少 β -葡聚糖酶, β -葡聚糖并不能被人体消化系统消化, 但却能被消化系统中的微生物所

利用, 因此 β -葡聚糖刺激了人体有益菌的活力, 同时阻碍了有害菌的生长繁殖^[57], 从而对胃肠中微生物产生积极影响^[77]。另一方面, β -葡聚糖可分解产生短链脂肪酸(SCAFs)促进肠上皮细胞的增殖, 改善健康人群的肠道菌群结构^[78], 为肠粘膜细胞提供营养^[79]。Zhang 等^[80] 研究结果发现 β -葡聚糖对坏死性小肠结肠炎有拮抗作用, 其可增加肠道细胞中 IL-10 的表达, 提高了肠道中有益菌的比例, 从而平衡肠道菌群。这些结果表明, 谷物 β -葡聚糖作为膳食补充剂可以调节肠道菌群并产生有益作用, 代表其可作为缓解肠道疾病的潜在功能性食品成分。

4.4 增强免疫细胞活性

目前研究表明, β -葡聚糖可作为免疫调节剂激活免疫细胞和分泌细胞因子, 从而提高机体免疫力^[81]。Jin 等^[82] 发现燕麦 β -葡聚糖可参与免疫应答, 增加小鼠血清免疫球蛋白, 并刺激抗炎因子的分泌, 使小鼠免疫细胞活性增强。 β -葡聚糖还可通过调节小鼠淋巴结的细胞数量, 增强小鼠对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌感染的抵抗力^[83], 从而提高免疫细胞活性。因此推测, β -葡聚糖可通过刺激免疫蛋白和调节肠道菌群增加机体免疫细胞活性。

4.5 改善大脑功能的作用

Xu 等^[84] 探究 β -葡聚糖对神经退行性疾病的影响, 结果表明, β -葡聚糖可以通过调节一些炎症相关菌对 A β 1-42 诱导的阿尔兹海默症小鼠进行改善。也有研究证明, β -葡聚糖具有增强识别记忆的能力^[85]。临床研究表明, 孤独症儿童在摄入含有 β -葡聚糖的食品补充剂后, 会显著改善行为模式和 α -突触核蛋白的表达水平^[86]。因此推测, 谷物 β -葡聚糖及代谢产物通过改善神经炎症和脑胰岛素抵抗从而保护脑功能。

5 谷物 β -葡聚糖在食品中的应用

目前, 谷物 β -葡聚糖因其水溶性、黏性、凝胶性和保健功效被广泛应用到食品行业中^[87-88]。随着时代的发展, 谷物 β -葡聚糖也因为具有可降低胆固醇和降低血糖的功效被应用到功能性食品中^[89-90], 并受到消费者的喜爱。但谷物 β -葡聚糖的添加会影响食品的质构特性、感官特性和保质期。以下详细介绍谷物 β -葡聚糖在食品行业中的应用。

5.1 谷物 β -葡聚糖在奶制品中的应用

谷物 β -葡聚糖作为一种功能性生物活性成分, 在不同食品中均起到重要作用。Anli 等^[91] 在羊奶酸奶中添加不同比例的燕麦 β -葡聚糖, 但因为羊奶中的酪蛋白与 β -葡聚糖有热力学不相容性, 因此在乳制品配方中的应用具有一定的局限性, 所以添加燕麦 β -葡聚糖需要以微流态化技术改善酸奶的感官和质构特性, 从而减少羊奶本身的膻味, 但随着燕麦 β -葡聚糖的添加, 酸奶中谷物的味道会加重。同时有研究表明, 谷物 β -葡聚糖的合理添加可以提高酸奶中的益生菌的活力和稳定性^[92]。添加燕麦 β -葡聚糖能

够提高酸奶发酵后的 pH,使其黏度增大,表现出网络结构稳定的弱凝胶状态,从而增加酸奶的硬度和胶着性,使酸奶拥有更稠厚的口感。如果少量添加到酸奶中,会使其有机酸含量提高,进而增强酸奶持水力,使其风味更好^[93]。Aydinol 等^[94]研究表明谷物 β -葡聚糖可以作为脂肪替代品添加到低脂干酪中,可使其硬度更高且风味更好。董吉林等^[95]表明将燕麦 β -葡聚糖添加到冰淇淋中,可提高冰淇淋的膨胀率和黏度,增加其抗融性。由此可得出,添加谷物 β -葡聚糖的奶制品具有更好的理化指标及质构特性,可作为稳定剂存在于食品中^[96]。

5.2 谷物 β -葡聚糖在烘焙食品中的应用

目前,谷物 β -葡聚糖作为增稠剂添加到面包等烘焙食品中,同时因其具有降低胆固醇和血糖等作用备受消费者的青睐^[97]。Zhang 等^[98]将青稞 β -葡聚糖添加到全麦面包中,结果表明,含有青稞 β -葡聚糖的全麦面包具有较低的消化率和更好的质地品质,更适合患有糖尿病的消费者食用。Collar 等^[99]使用高 β -葡聚糖大麦粉替代普通面粉,发现使用高 β -葡聚糖面粉制成的面包与普通面包对比,具有更好的理化性质及感官特性。总的来说,谷物 β -葡聚糖可作为功能性因子添加到烘焙食品中,可以改善烘焙食品的理化性质和风味,并使烘焙食品具有功能性。

5.3 谷物 β -葡聚糖在肉制品中的应用

在肉饼和香肠等肉制品中,谷物 β -葡聚糖可作为食品添加剂替代品添加到其中。赵谋等^[100]将燕麦 β -葡聚糖作为食盐替代物添加到羊肉肉糜中,研究发现,燕麦 β -葡聚糖在 0.4% 添加量时束水能力更强,组织结构强度和感官优于其他实验组。同时有实验表明,在高压加工的鸡胸肉中可用 β -葡聚糖来替代食盐^[101]。Amini 等^[102]研究表明谷物 β -葡聚糖对益生菌香肠具有有益影响,可利用谷物 β -葡聚糖、抗性淀粉生产益生菌香肠。此后,谷物 β -葡聚糖可作为生物活性成分添加到肉制品中来提高产品质量并丰富肉制品的功能性。

6 结论与展望

谷物 β -葡聚糖作为一种具有丰富生物活性的膳食纤维,因其各种功能特性被应用于功能性食品的开发中。随着时代的进步,功能性食品越来越受到消费者的关注,因此,富含谷物 β -葡聚糖的食品也受到大众的关注。本文对谷物 β -葡聚糖的结构、不同提取方法对谷物 β -葡聚糖的影响、分离纯化、谷物 β -葡聚糖的生物活性及目前谷物 β -葡聚糖在食品领域中的应用进行总结,以期扩大谷物 β -葡聚糖在食品及生物医药等领域的应用。目前,关于谷物 β -葡聚糖仍需解决以下问题: a. 虽已明确谷物 β -葡聚糖对肠道微生物有显著影响,但不明确其作用机制,仍值得进一步研究。 b. 目前应用主要以单一谷物 β -葡聚糖为主,而谷物 β -葡聚糖-配体复合物是否具有相同作用,以及作用机制如何,也是重要的科学问题。 c. 谷物 β -

葡聚糖的分子量、结构以及理化性质与功能特性之间的关系尚不明确,尤其是增强免疫系统机制,从而使谷物 β -葡聚糖得到更充分的利用。 d. 需要考虑添加谷物 β -葡聚糖后产品的适口性及感官特性,有助于开发富含谷物 β -葡聚糖的食品。

© The Author(s) 2024. 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] MAHESHWARI G, SOWRIRAJAN S, JOSEPH B. Extraction and isolation of β -glucan from grain sources—A review[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(7): 1535–1545.
- [2] LANTE A, CANAZZA E, TESSARI P. Beta-glucans of cereals: Functional and technological properties[J]. *Nutrients*, 2023, 15(9): 2124.
- [3] 李志鹏, 周晨熠, 潘书童, 等. 两种青稞多糖对胰 α -淀粉酶的抑制作用[J]. *食品科学*, 2023, 44(22): 192–199. [LI Z P, ZHOU C Y, PAN S T, et al. Inhibitory effects of two polysaccharides from highland barley on the activity of pancreatic α -amylase[J]. *Food Science*, 2023, 44(22): 192–199.]
- [4] EKSTRÖM L M N K, HENNINGSSON BOK E A E, SJÖÖ M E, et al. Oat β -glucan containing bread increases the glycaemic profile[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 32: 106–111.
- [5] BOZBULUT R, SANLIER N. Promising effects of β -glucans on glycaemic control in diabetes[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 83: 159–166.
- [6] WANG Y, HARDING S V, THANDAPILLY S J, et al. Barley β -glucan reduces blood cholesterol levels via interrupting bile acid metabolism[J]. *British Journal of Nutrition*, 2017, 118(10): 822–829.
- [7] 杜杰. 有氧运动结合燕麦 β -葡聚糖对高脂仓鼠降低胆固醇的作用及机制[J]. *中国体育科技*, 2017, 53(1): 97–103. [DU J. Studies on cholesterol-lowering effect and mechanism of aerobic exercise combined with oat β -glucan on high-fat diet hamsters[J]. *China Sport Science and Technology*, 2017, 53(1): 97–103.]
- [8] SIMA P, VANNUCCI L, VETVICKA V. β -Glucans and cholesterol (Review)[J]. *International Journal of Molecular Medicine*, 2018, 41(4): 1799–1808.
- [9] 曾鸿哲, 方雯雯, 周方, 等. 陈年武夷岩茶对葡聚糖硫酸钠诱导小鼠结肠炎的缓解作用及肠道菌群的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(13): 67–78. [ZENG H Z, FANG W W, ZHOU F, et al. Effect of aged Wuyi rock tea on relieving dextran sulfate sodium-induced colitis and regulating the gut microbiota in mice[J]. *Food Science*, 2023, 44(13): 67–78.]
- [10] 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.
- [11] RÖSCH C, MEIJERINK M, DELAHAIJE R J B M, et al. Immunomodulatory properties of oat and barley β -glucan populations on bone marrow derived dendritic cells[J]. *Journal of Functional Foods*, 2016, 26: 279–289.
- [12] RAJ P, AMES N, JOSEPH THANDAPILLY S, et al. The effects of oat ingredients on blood pressure in spontaneously hypertensive rats[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(10): e13402.
- [13] 郑健, 房天琪, 沈雪, 等. 乳清分离蛋白与燕麦 β -葡聚糖作为增稠剂在酸奶中的应用[J]. *中国乳品工业*, 2020, 48(7): 21–25.

- [ZHENG J, FANG T Q, SHEN X, et al. Application of whey protein and oat β -glucan complex as thickening agent in yogurt[J]. China Dairy Industry, 2020, 48(7): 21–25.]
- [14] BUNIEWSKA-OLEJNIK M, MYKHALEVYCH A, POLISHCHUK G, et al. Study of water freezing in low-fat milky ice cream with oat β -glucan and its influence on quality indicators[J]. *Molecules*, 2023, 28(7): 2924.
- [15] 陈瑜, 王伟, 焦迎春, 等. 不同发酵剂对青稞中富集 β -葡聚糖的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(4): 64–71. [CHEN Y, WANG W, JIAO Y C, et al. Effect of different fermentation agents on yield of β -glucan from highland barley[J]. Food Research and Development, 2023, 44(4): 64–71.]
- [16] HU H, LIN H, XIAO L, et al. Impact of native form oat β -glucan on the physical and starch digestive properties of whole oat bread[J]. *Foods*, 2022, 11(17): 2622.
- [17] LAZARIDOU A, BILIADERIS C G. Molecular aspects of cereal β -glucan functionality: Physical properties, technological applications and physiological effects[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46(2): 101–118.
- [18] BOULOS S, NYSTRÖM L. Complementary sample preparation strategies for analysis of cereal β -glucan oxidation products by UPLC-MS/MS[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2017, 5: 90.
- [19] HU X, ZHAO J, ZHAO Q, et al. Structure and characteristic of β -glucan in cereal: A review: β -Glucan from barley, oat and wheat[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 3145–3153.
- [20] LI W, CUI S W, WANG Q, et al. Study of conformational properties of cereal β -glucans by computer modeling[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 26(2): 377–382.
- [21] ZHANG M, LIU H, WANG Q. Characterization of β -glucan-peanut protein isolate/soy protein isolate conjugates and their application on low-fat sausage[J]. *Molecules*, 2022, 27(9): 3037.
- [22] NISHANTHA M D L C, ZHAO X, JEEWANI D C, et al. Direct comparison of β -glucan content in wild and cultivated barley[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 2218–2228.
- [23] BOCKWOLDT J A, STAHL L, EHRMANN M A, et al. Persistence and β -glucan formation of beer-spoiling lactic acid bacteria in wheat and rye sourdoughs[J]. *Food Microbiology*, 2020, 91: 103539.
- [24] ZHANG K, LI X, MA Z, et al. Solvent retention capacity of oat flour: Relationship with oat β -glucan content and molecular weight[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 19–23.
- [25] WOOD P J. Review: Oat and rye β -glucan: Properties and function[J]. *Cereal Chemistry*, 2010, 87(4): 315–330.
- [26] ZIELKE C, LU Y, POINSOT R, et al. Interaction between cereal β -glucan and proteins in solution and at interfaces[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2018, 162: 256–264.
- [27] ZIELKE C, STRADNER A, NILSSON L. Characterization of cereal β -glucan extracts: Conformation and structural aspects[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 79: 218–227.
- [28] CYRAN M R, SNOCHOWSKA K K. Evidence of intermolecular associations of β -glucan and high-molar mass xylan in a hot water extract of raw oat groat[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 272: 118463.
- [29] CLIMOVA A, IBRAHIM M N G, SALAMAHINA A, et al. Application of extracted β -glucan from oat for β -carotene encapsulation[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58(7): 2641–2650.
- [30] IRAKLI M, BILIADERIS C G, IZYDORCZYK M S, et al. Isolation, structural features and rheological properties of water-extractable β -glucans from different Greek barley cultivars[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2004, 84(10): 1170–1178.
- [31] 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. [WU J, LIN X Y, HUANG D H, et al. Freeze-thaw extraction of oat β -glucan and its structural characterization[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2011, 11(4): 48–54.]
- [32] WOODWARD J R, FINCHER G B. Substrate specificities and kinetic properties of two (1 $\rightarrow$ 3), (1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucan endo-hydrolases from germinating barley (*Hordeum vulgare*) [J]. *Carbohydrate Research*, 1982, 106(1): 111–122.
- [33] SOUSA P, TAVARES-VALENTE D, AMORIM M, et al. β -Glucan extracts as high-value multifunctional ingredients for skin health: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 322: 121329.
- [34] AL-JUMAIEE S A J, AL-HUSSAINY K S J, AL-MANHEL A J A. Effect of different level of β -glucan extracted from Baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae* and barley bran in the physicochemical properties of fish patties at cooling storage periods[J]. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(1): 79–87.
- [35] RIMSTEN L, STENBERG T, ANDERSSON R, et al. Determination of β -glucan molecular weight using SEC with calcofluor detection in cereal extracts[J]. *Cereal Chemistry*, 2003, 80(4): 485–490.
- [36] 李楠, 闫智超, 孙元琳, 等. 裸燕麦 β -葡聚糖的提取工艺及其理化性质研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(8): 81–86. [LI N, YAN Z C, SHUN Y L, et al. Study on extraction technology and physicochemical properties of naked oat β -glucan[J]. Food Research and Development, 2021, 42(8): 81–86.]
- [37] LI Y, LI C, MUHAMMAD AQEEL S, et al. Enhanced expression of xylanase in *Aspergillus niger* enabling a two-step enzymatic pathway for extracting β -glucan from oat bran[J]. *Biore-source Technology*, 2023, 377: 128962.
- [38] KARIMI R, AZIZI M H, XU Q. Effect of different enzymatic extractions on molecular weight distribution, rheological and microstructural properties of barley bran β -glucan[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 126: 298–309.
- [39] ANTONINI E, LOMBARDI F, ALFIERI M, et al. Nutritional characterization of naked and dehulled oat cultivar samples at harvest and after storage[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 72: 46–53.
- [40] 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.
- [41] UTAMA G L, DIO C, SULISTIYO J, et al. Evaluating comparative β -glucan production aptitude of *Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus oryzae*, *Xanthomonas campestris*, and *Bacillus natto* [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, 28(12): 6765–6773.
- [42] 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.
- [43] 吴迪, 郇雪, 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. [WU D, BING X, WANG C T, et al. Bidirectional fermentation of oat β -glucan and research of physical and chemical properties[J]. Food Research and Development, 2019, 40(1): 184–193.]
- [44] 刘新琦, 何先喆, 刘洁纯, 等. 发酵法提取青稞麸皮中 β -葡聚糖的工艺优化及其理化性质研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 49–54. [LIU X Q, HE X Z, LIU J C, et al. Study on opti-

- mization of extraction process of barley bran β -glucan by fermentation and its physicochemical properties[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(7): 49–54.]
- [45] KIM H J, KIM H J. Physicochemical characteristics and *in vitro* bile acid binding and starch digestion of β -glucans extracted from different varieties of Jeju barley[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2017, 26(6): 1501–1510.]
- [46] LIU H, LI Y, YOU M, et al. Comparison of physicochemical properties of β -glucans extracted from hull-less barley bran by different methods[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 182: 1192–1199.]
- [47] 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.]
- [48] CHEN M, TIAN S, LI S, et al. β -Glucan extracted from highland barley alleviates dextran sulfate sodium-induced ulcerative colitis in C57BL/6J mice[J]. *Molecules*, 2021, 26(19): 5812.]
- [49] RAGAE S M, WOOD P J, WANG Q, et al. Extractability, structure and molecular weight of β -glucan from Canadian rye (*Secale cereale* L.) whole meal[J]. *Cereal Chemistry*, 2008, 85(3): 283–288.]
- [50] SAULNIER L, GÉVAUDAN S, THIBAUT J F. Extraction and partial characterisation of β -glucan from the endosperms of two barley cultivars[J]. *Journal of Cereal Science*, 1994, 19(2): 171–178.]
- [51] 潘妍. 生物转化提取燕麦 β -葡聚糖及其化妆品功效研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2012. [PAN Y. The study on the extraction method of biotransformation and cosmetic efficacy of oat β -glucan[D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2012.]
- [52] 张岳一, 兰社益, 裴海阔, 等. 多菌株联用发酵燕麦麸皮工艺优化及发用功效评价[J]. *生物技术通报*, 2023, 39(9): 58–70. [ZHANG Y Y, LAN S Y, QIU H R, et al. Process optimization of multi-strain fermented oat bran and hair efficacy evaluation[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2023, 39(9): 58–70.]
- [53] PAPAGEORGIOU M, LAKHDARA N, LAZARIDOU A, et al. Water extractable (1 $\rightarrow$ 3, 1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucans from barley and oats: An intervarietal study on their structural features and rheological behaviour[J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 42(2): 213–224.]
- [54] 罗燕平, 李家林, 张雪飞. 微波辅助提取青稞 β -葡聚糖工艺优化[J]. *农产品加工*, 2016(14): 35–38. [LUO Y P, LI J L, ZHANG X F. Optimization of microwave-assisted extraction technology of β -glucan from barleys[J]. *Farm Products Processing*, 2016(14): 35–38.]
- [55] 郭欢. 青稞 β -葡聚糖的提取分离、结构表征、化学修饰及其生物活性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020. [GUO H. Extraction, isolation, structural characterization, chemical modification, and biological activities of Qingke (*Hordeum vulgare* L.) β -glucans[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2020.]
- [56] HARASYM J, ŽYIA E, DZIENDZIKOWSKA K, et al. Proteinaceous residue removal from oat β -glucan extracts obtained by alkaline water extraction[J]. *Molecules*, 2019, 24(9): 1729.]
- [57] 孟续, 李言, 钱海峰, 等. 燕麦 β -葡聚糖的提取制备及纯化研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(21): 268–274. [MENG X, LI Y, QIAN H F, et al. Research progress on extraction, preparation and purification of oat β -glucan[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(21): 268–274.]
- [58] 赵孝先, 高玲, 杨文, 等. 响应面法优化香菇多糖脱色工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(11): 99–103. [ZHAO X X, GAO L, YANG W, et al. Optimization of decolorization of lentinan using response surface methodology[J]. *Food Research and Development*, 2016, 37(11): 99–103.]
- [59] 贾莹, 常雅宁, 俞建琪, 等. 青稞麸皮 β -葡聚糖脱色工艺研究[J]. *食品工业*, 2013, 34(8): 107–110. [JIA Y, CHANG Y N, YU J Y, et al. Study on decolorization technology of β -glucan from highland barley bran[J]. *The Food Industry*, 2013, 34(8): 107–110.]
- [60] RYU J H, LEE S, YOU S, et al. Effects of barley and oat β -glucan structures on their rheological and thermal characteristics[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 89(4): 1238–1243.]
- [61] 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*, 2008, 41(1): 180–184.]
- [62] 董兴叶. 燕麦 β -葡聚糖的提取、纯化及性质研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014. [DONG X Y. Extraction, purification and properties of oat β -glucan[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.]
- [63] 刘焕云, 李慧荔, 马志民. 燕麦麸中 β -葡聚糖的提取与纯化工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2008(2): 56–58. [LIU H Y, LI H L, MA Z M. Extraction and purification process of β -glucan from oat bran[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2008(2): 56–58.]
- [64] 谢昊宇, 何思宇, 贾冬英, 等. 青稞 β -葡聚糖的分离纯化及理化特性研究[J]. *食品科技*, 2016, 41(1): 142–146. [XIE H Y, HE S Y, JIA D Y, et al. Isolation, purification and physico-chemical properties of highland barley β -glucan[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(1): 142–146.]
- [65] 袁建, 范哲, 王艳, 等. 小麦麸皮中 β -葡聚糖的分离纯化及组成研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(15): 90–94. [YUAN J, FAN Z, WANG Y, et al. The isolation, purification and composition analysis of β -glucan from wheat bran[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(15): 90–94.]
- [66] 吴睿婷, 付王威, 万敏, 等. 黑灵芝多糖对糖尿病大鼠血糖血脂调节及肠道菌群的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(5): 91–102. [WU R T, FU W W, WAN M, et al. Effect of polysaccharide from *Ganoderma atrum* on hyperglycemia, blood lipid and gut microbiota of diabetic rats[J]. *Food Science*, 2022, 43(5): 91–102.]
- [67] LIU M, ZHANG Y, ZHANG H, et al. The anti-diabetic activity of oat β -D-glucan in streptozotocin-nicotinamide induced diabetic mice[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 91: 1170–1176.]
- [68] GUO H, WU H, KONG X, et al. Oat β -glucan ameliorates diabetes in high fat diet and streptozotocin-induced mice by regulating metabolites[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2023, 113: 109251.]
- [69] WANG Q, ELLIS P R. Oat β -glucan: Physico-chemical characteristics in relation to its blood-glucose and cholesterol-lowering properties[J]. *British Journal of Nutrition*, 2014, 112(S2): S4–S13.]
- [70] AVRAMIA I, AMARIEI S. Formulation, characterization and optimization of β -glucan and pomegranate juice based films for its potential in diabetes[J]. *Nutrients*, 2022, 14(10): 2142.]
- [71] PUTTARAT N, KASORN A, VITHEEJONGJAROEN P, et al. Beneficial effects of indigenous probiotics in high-cholesterol diet-induced hypercholesterolemic rats[J]. *Nutrients*, 2023, 15(12): 2710.]
- [72] 戎银秀. 青稞 β -葡聚糖的制备、结构解析及其降血脂活性的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018. [RONG Y X. The extraction and structural elucidation of highland barley β -glucan and the investigation of its antihyperlipidemic effects[D]. Suzhou: Soochow Uni-

versity, 2018.]

[73] JOYCE S A, KAMIL A, FLEIGE L, et al. The cholesterol-lowering effect of oats and oat beta glucan: Modes of action and potential role of bile acids and the microbiome[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2019, 6: 171.

[74] DE GROOT A P, LUYKEN R, PIKAAR N A. Cholesterol-lowering effect of rolled oats[J]. *The Lancet*, 1963, 282(7302): 303–304.

[75] GORA A H, REHMAN S, KIRON V, et al. Management of hypercholesterolemia through dietary β -glucans-Insights from a zebrafish model[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 8: 797452.

[76] TONG L T, ZHONG K, LIU L, et al. Effects of dietary hull-less barley β -glucan on the cholesterol metabolism of hypercholesterolemic hamsters[J]. *Food Chemistry*, 2015, 169: 344–349.

[77] CHEN C, HUANG X, WANG H, et al. Effect of β -glucan on metabolic diseases: A review from the gut microbiota perspective[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 47: 100907.

[78] 王如月, 余讯, 徐静静, 等. 燕麦 β -葡聚糖及其寡糖对肠道菌群结构和代谢的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(11): 85–91, 97. [WANG R Y, YU X, XU J J, et al. Effects of oat β -glucan and its oligosaccharides on composition and metabolism of intestinal microorganisms[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(11): 85–91, 97.]

[79] OLANO-MARTIN E, MOUNTZOURIS K C, GIBSON G R, et al. *In vitro* fermentability of dextran, oligodextran and maltodextrin by human gut bacteria[J]. *British Journal of Nutrition*, 2000, 83(3): 247–255.

[80] ZHANG X, ZHANG Y, HE Y, et al. β -Glucan protects against necrotizing enterocolitis in mice by inhibiting intestinal inflammation, improving the gut barrier, and modulating gut microbiota[J]. *Journal of Translational Medicine*, 2023, 21(1): 14.

[81] GU Y H W A, TAKAGI Y, NAKAMURA T, et al. Enhancement of radioprotection and anti-tumor immunity by yeast-derived β -glucan in mice[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2005, 8(2): 154–158.

[82] JIN Y, LI P, WANG F. β -Glucans as potential immunoadjuvants: A review on the adjuvant activity, structure-activity relationship and receptor recognition properties[J]. *Vaccine*, 2018, 36(35): 5235–5244.

[83] YUN C H, ESTRADA A, KESSEL A, et al. β -Glucan, extracted from oat, enhances disease resistance against bacterial and parasitic infections[J]. *FEMS Immunology & Medical Microbiology*, 2003, 35(1): 67–75.

[84] XU M, MO X, HUANG H, et al. Yeast β -glucan alleviates cognitive deficit by regulating gut microbiota and metabolites in A β 1–42-induced AD-like mice[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 161: 258–270.

[85] HU M, ZHANG P, WANG R, et al. Three different types of β -glucans enhance cognition: The role of the gut-brain axis[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 848930.

[86] RAGHAVAN K, DEDEEPIYA V D, IKEWAKI N, et al. Improvement of behavioural pattern and alpha-synuclein levels in autism spectrum disorder after consumption of a beta-glucan food supplement in a randomised, parallel-group pilot clinical study[J]. *BMJ Neurology Open*, 2022, 4(1): e000203.

[87] SUN L, HU M, ZHAO J, et al. Molecular characteristics, synthase, and food application of cereal β -glucan[J]. *Journal of Food Quality*, 2021, 2021: 1–8.

[88] SCHMIDT M. Cereal beta-glucans: An underutilized health

endorsing food ingredient[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(12): 3281–3300.

[89] ASTIZ V, GUARDIANELLI L M, SALINAS M V, et al. High β -glucans oats for healthy wheat breads: Physicochemical properties of dough and breads[J]. *Foods*, 2022, 12(1): 170.

[90] ORTIZ DE ERIVE M, HE F, WANG T, et al. Development of β -glucan enriched wheat bread using soluble oat fiber[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 95: 103051.

[91] ANLI E A, GURSEL A, GURSOY A, et al. Assessment of the quality attributes of oat β -glucan fortified reduced-fat goat milk yogurt supported by microfluidization[J]. *Foods*, 2023, 12(18): 3457.

[92] VASILJEVIC T, KEALY T, MISHRA V K. Effects of β -glucan addition to a probiotic containing yogurt[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(7): C405–C411.

[93] 黄苑怡, 劳晓, 刘勇勇, 等. 燕麦 β -葡聚糖添加对酸奶质构及流变特性的影响[J]. *工业微生物*, 2023, 53(3): 113–119.

[HUANG Y Y, LAO X, LIU Y Y, et al. Effect of oat β -glucan addition on the textural and rheological properties of yoghurt[J]. *Industrial Microbiology*, 2023, 53(3): 113–119.]

[94] AYDINOL P, OZCAN T. Production of reduced-fat Labneh cheese with inulin and β -glucan fibre-based fat replacer[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2018, 71(2): 362–371.

[95] 董吉林, 郑坚强, 申瑞玲. 燕麦 β -葡聚糖的黏性及其在冰淇淋中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2007(7): 193–196. [DONG J L, ZHENG J Q, SHEN R L. Application of oat β -glucan in ice cream production[J]. *Food Research and Development*, 2007(7): 193–196.]

[96] MYKHALEVYCH A, POLISHCHUK G, NASSAR K, et al. β -Glucan as a techno-functional ingredient in dairy and milk-based products—A review[J]. *Molecules*, 2022, 27(19): 6313.

[97] 江丹, 陈阳, 宋庭宁, 等. 响应面分析法优化高含量青稞 β -葡聚糖饼干工艺及品质评价[J]. *粮食与饲料工业*, 2022(5): 36–43. [JIANG D, CHEN Y, SONG T N, et al. Optimize the process and quality analysis of high-content highland barley β -glucan cookies by response surface methodology[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2022(5): 36–43.]

[98] ZHANG Q, YANG Y, JIN Z, et al. Effects of highland barley protein and β -glucan addition on the flour structure, bread quality and starch digestibility of whole wheat bread[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, 58(11): 6068–6080.

[99] COLLAR C, ANGIOLONI A. Nutritional and functional performance of high β -glucan barley flours in breadmaking: Mixed breads versus wheat breads[J]. *European Food Research and Technology*, 2014, 238(3): 459–469.

[100] 赵谋, 杨欢欢, 杨莉, 等. 燕麦 β -葡聚糖对低盐羊肉肉糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(16): 159–168. [ZHAO M, YANG H H, YANG L, et al. Effect of oat β -glucan on gel properties of low-salt mutton mince[J]. *Food Science*, 2023, 44(16): 159–168.]

[101] OMANA D A, PLASTOW G, BETTI M. The use of β -glucan as a partial salt replacer in high pressure processed chicken breast meat[J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(3): 768–776.

[102] AMINI SARTESHNIZI R, HOSSEINI H, BONDARIAN-ZADEH 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.