

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.06.008

刘畅, 张欣, 魏亚凤, 等. 元麦麸皮功能成分与产品开发的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(6): 63-70.

LIU C, ZHANG X, WEI Y F, et al. Research progress on functional components and product development of naked barley bran[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(6): 63-70.

# 元麦麸皮功能成分与产品开发 的研究进展

刘 畅, 张 欣, 魏亚凤, 宋居易✉

(江苏沿江地区农业科学研究所, 江苏 南通 226012)

**摘 要:** 麸皮是元麦加工的副产物, 主要包括元麦的籽实皮、胚、糊粉层和少量淀粉胚乳部分。元麦麸皮中不仅含有丰富的营养物质, 还含有阿拉伯木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖、酚类物质、植物甾醇等功能成分, 具有降血糖、降血脂、抗氧化、调理肠道等多种生理活性, 可满足人们对于健康饮食的需求。然而口感粗糙、消化性差等问题导致了元麦麸皮的加工利用不足、产品开发受限。近年来, 在低碳与创新理念的倡导下, 元麦麸皮的相关研究日益增多, 以其为原料的油脂类、膳食纤维类、发酵型产品及相关加工技术不断发展, 激发出元麦麸皮的高效利用潜力。针对元麦麸皮功能成分与产品开发的研究现状进行综述, 旨在为突破元麦麸皮的精深加工关键技术、加速优质产品的商业化进程提供理论参考。

**关键词:** 元麦麸皮; 功能成分; 生理活性; 产品开发; 加工技术

中图分类号: TS210.9 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)06-0063-08

## Research Progress on Functional Components and Product Development of Naked Barley Bran

LIU Chang, ZHANG Xin, WEI Ya-feng, SONG Ju-yi✉

(Jiangsu Yanjiang Institute of Agricultural Sciences, Nantong, Jiangsu 226012, China)

**Abstract:** Bran is a by-product of naked barley mainly including seed coat, germ, aleurone layer and a small amount of starchy endosperm. It is not only rich in nutrients, but also has functional components such as arabinoxylan,  $\beta$ -glucan, phenolic compounds and phytosterol. Besides, it has a variety of physiological activities such as hypoglycemic effect, antilipemic function, antioxidant capacity and intestinal tract regulation, and can meet the demand for a healthy diet. However, rough taste and poor digestibility result in its insufficient processing and utilization, and limit the development of its product. With the advocacy of low-carbon and innovative ideas, there has been an increasing number of related researches on naked barley bran in recent years. The oil, dietary fiber, fermentation product and related processing technologies based

收稿日期: 2022-06-10

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(21)3113); 南通市科技项目(MS22020035)

Supported by: Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund (No. CX(21)3113); Nantong Science and Technology Project (No. MS22020035)

作者简介: 刘畅, 女, 1996年出生, 硕士, 研究实习员, 研究方向为农产品加工与营养健康。E-mail: haliuchangppy@163.com.

通讯作者: 宋居易, 女, 1989年出生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为农产品加工与营养健康。E-mail: songjuyi526@163.com.

on naked barley bran have developed continually, which has stimulated the potential for its efficient utilization. To provide a theoretical reference for breaking through the key technology of deep processing and accelerating the commercialization of high-quality products, the research process of functional components and product development of naked barley bran have been reviewed.

**Key words:** naked barley bran; functional components; physiological activity; product development; processing technology

元麦 (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. f.) 是禾本科大麦属作物, 因其稃壳脱离于颖果, 故又称裸大麦, 又名米大麦、青稞<sup>[1]</sup>。常见颜色有黄白色、黄棕色、蓝灰色、紫红色和黑色<sup>[2]</sup>。元麦颖果由籽实皮、胚乳和胚构成, 经分级碾磨可得麸皮、元麦米、元麦粉等初加工产品(图1), 后两者是元麦精加工的主要原料, 利用率较高, 而麸皮因感官品质和消化性能较差, 多用于制作动物饲料或直接废弃, 不仅造成了资源的浪费, 还会增加环境的压力<sup>[3-4]</sup>。元麦麸皮的营养成分以

淀粉、膳食纤维、蛋白质为主, 还含有脂肪、矿物质等<sup>[5]</sup>(表1)。其功能成分主要为阿拉伯木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖、酚类物质、植物甾醇, 具有降血糖、降血脂、抗氧化、调理肠道等生理功效。随着食品加工技术的发展和人们饮食需求的改变, 对元麦麸皮的研究已不断深入, 在探索功能成分和研发新型产品方面也有了一定积累。因此, 本文围绕元麦麸皮的功能成分和相关产品就现有研究进行概括总结, 以期后续开展试验、推进产业化进程提供思路。



图1 元麦初加工产品 (a.元麦麸皮 b.元麦米 c.元麦粉)

Fig.1 Primary processed product of naked barley (a. naked barley bran, b. naked barley kernels, c. naked barley flour)

表1 文献报道的元麦麸皮营养成分

Table 1 Nutritional components of naked barley bran obtained from the literature

参考文献	含量	膳食纤维	粗纤维	蛋白质	脂肪	灰分	水分
	淀粉						
[6]	37.40	-	8.61	17.54	8.42	5.81	5.72
[6]	34.30	-	10.95	16.85	6.80	5.88	5.48
[7]	-	-	-	24.35	2.43	7.19	14.29
[8]	43.98	39.23	-	10.05	1.80	2.26	-
[9]	25.60	-	10.13	12.61	6.25	12.32	2.21
[10]	21.25	36.59	-	13.09	5.66	0.59	11.81
[11]	52.50	-	-	12.47	9.43	1.69	13.42

## 1 元麦麸皮功能成分的研究进展

### 1.1 阿拉伯木聚糖

阿拉伯木聚糖是一种半纤维素多糖, 存在于

多种植物的细胞壁中, 对于元麦而言, 麸皮部位含量相对较高<sup>[12]</sup>。其基本结构是由 D-吡喃木糖以  $\beta$ -1, 4 糖苷键连接形成主链,  $\alpha$ -L-阿拉伯呋喃糖在 C<sub>2</sub> 和/或 C<sub>3</sub> 位以侧链形式取代主链糖单元<sup>[13]</sup>。经研究发现, 阿拉伯木聚糖具有良好的吸水性、氧化凝胶性和独特的溶解性, 因此可用于改良面团品质, 还能作为微胶囊壁材包埋蛋白质、益生菌等物质<sup>[14-16]</sup>。此外, 阿拉伯木聚糖还具有降血脂、降血糖、改善矿物质吸收等生理功效<sup>[17]</sup>。徐中香<sup>[7]</sup>通过响应面法优化了元麦麸皮阿拉伯木聚糖的碱提工艺, 得出在料液比 1 : 25 (g/mL)、NaOH 浓度 15 g/L、温度 55 °C 条件下提取 3 h, 实际得率可达 14.31%。Gong 等<sup>[18]</sup>利用高效液相色谱分析得出, 元麦麸皮的单糖组成为葡萄糖、木聚糖、

阿拉伯糖、甘露糖、半乳糖,其中前三者的含量占比较高,经比色法测得三种元麦麸皮中阿拉伯木聚糖的含量分别为14.21%、18.18%、21.06%,阿拉伯糖与木糖的比值分别为0.83、0.76、0.58。Guo等<sup>[19]</sup>对该多糖进行了分级纯化,得出其主要组分HBAX-25占阿拉伯木聚糖总量的37.1% (w/w),该组分中阿拉伯糖与木糖的比值为0.58,主链由 $\beta$ -1,4糖苷键连接的D-吡喃木糖构成,六种不同的支链结构在部分糖单元的C<sub>3</sub>位单取代或在C<sub>2</sub>和C<sub>3</sub>位双取代。

## 1.2 $\beta$ -葡聚糖

$\beta$ -葡聚糖广泛存在于真菌(酵母、蕈菌等)和植物(大麦、燕麦等)中,酵母、蕈菌来源的 $\beta$ -葡聚糖的结构键型为 $\beta$ -1,3糖苷键和 $\beta$ -1,6糖苷键,而谷物来源的 $\beta$ -葡聚糖是葡萄糖残基经 $\beta$ -1,3糖苷键和 $\beta$ -1,4糖苷键连接而成的无支链线性多糖<sup>[20]</sup>。元麦 $\beta$ -葡聚糖的生理活性主要为降血脂<sup>[21]</sup>、降血糖<sup>[22]</sup>、抗炎<sup>[23]</sup>、调节肠道菌群<sup>[24]</sup>,Song等<sup>[25]</sup>还发现羧甲基化修饰的元麦麸皮 $\beta$ -葡聚糖纯化组分CMG-2可诱导金黄色葡萄球菌的细胞壁和细胞膜损伤,从而改变其通透性,达到抑菌效果。 $\beta$ -葡聚糖的分子量、黏度、溶解度等理化特性会因元麦来源和提纯方法的不同而产生差异,其凝胶性、发泡能力、泡沫稳定性、乳化能力、乳化稳定性等也会受到外界环境(温度、pH等)的影响<sup>[26-27]</sup>。贾晓丽<sup>[28]</sup>发现将元麦麸皮 $\beta$ -葡聚糖添加到鸡块的油炸外裹糊中,可使鸡块的保水性提高、含油量降低,进而在保证鸡块感官品质的同时满足了低脂的需求。基于上述特性, $\beta$ -葡聚糖在食品、医药、化工等多个领域都有着良好的应用前景。

虽然元麦 $\beta$ -葡聚糖在麸皮部位的含量低于其胚乳部位,但因麸皮为元麦加工的副产物,以其为原料提取 $\beta$ -葡聚糖仍具有重要的研究意义<sup>[29-30]</sup>。目前常见的提取方法可分为物理法、化学法和生物法三大类。Liu等<sup>[31]</sup>对比了超声、热水、微波、微波辅助超声四种提取方法对元麦麸皮 $\beta$ -葡聚糖得率和理化特性的影响,经试验得出微波辅助超声提取法耗时较短且得率最高,得到的 $\beta$ -葡聚糖数均分子量和表观黏度最高,发泡能力最弱但泡

沫稳定性最强,且具有良好的乳化能力和乳化稳定性。Du等<sup>[32]</sup>得出以加速溶剂萃取法提取元麦麸皮 $\beta$ -葡聚糖的最优工艺参数为萃取压力10 MPa、萃取温度70℃、时间9 min、循环4次,该条件下粗 $\beta$ -葡聚糖的实际得率为16.39%,高于超声提取、微波提取和传统回流水提法。刘新琦等<sup>[33]</sup>通过发酵法提取元麦麸皮中的 $\beta$ -葡聚糖,得出最适发酵条件为料液比1:6、高活性干酵母接种量0.05%、发酵温度32℃、发酵时间34 h,以该条件提取的 $\beta$ -葡聚糖较传统水提法得率提高了60.8%。宋居易等<sup>[34]</sup>采用生物酶法提取元麦麸皮中的 $\beta$ -葡聚糖,得出其最优提取工艺为料液比1:15、碱性蛋白酶30 mg/g、酶解时间2 h,最优除蛋白工艺为中性蛋白酶:胰蛋白酶=1:2、酶用量1 mg/mL、酶解温度45℃、时间2.5 h。此外,贾莹等<sup>[35]</sup>研究了元麦麸皮 $\beta$ -葡聚糖粗品的脱色工艺,得出在样品溶液温度40℃、pH 6、流速0.5 mL/min时,使用XAD-7树脂可使元麦麸皮 $\beta$ -葡聚糖的脱色率达72.9%,损失率为4.3%。

## 1.3 酚类物质

元麦麸皮中的酚类物质包括酚酸、黄酮、鞣质等。酚类物质是植物的次级代谢产物,具有很强的抗氧化性,能够有效地清除体内自由基、调节身体机能。元麦由外层到内层,可溶性酚类物质总量呈逐级降低趋势,抗氧化力与其呈高度正相关<sup>[36]</sup>。徐菲等<sup>[37]</sup>经优化得出以11.1%的硫酸为提取剂、料液比1:17 g/mL、提取温度75℃时,对元麦麸皮结合酚具有较好的提取效果。杨希娟等<sup>[38]</sup>经筛选得出AB-8大孔吸附树脂对元麦麸皮结合酚有着良好的吸附-解吸作用,以最优工艺将其分离纯化后,可检测到的单体酚种类增加,且半数以上单体酚的含量显著提高。

酚酸是具有羧酸性质的酚类物质。陈晓默<sup>[39]</sup>以60%丙酮为溶剂提取元麦麸皮,提取物中共鉴定出五种主要的酚酸类物质(咖啡酸、丁香酸、阿魏酸、对香豆酸、芥子酸),经研究得出这五种酚酸类物质对活性二羰基化合物的清除率均可达50%以上,对饼干模拟体系中的羧甲基赖氨酸均有不同程度的抑制作用。阿魏酸是谷物中最常见

的酚酸类物质,多以结合态聚集于细胞壁中<sup>[40]</sup>。阿魏酰糖酯是由阿魏酸羧基与糖羟基酯化形成的低聚糖,由于酯键的存在,阿魏酰糖酯较游离的阿魏酸具有更强的抗氧化力,生理活性更加优越<sup>[41]</sup>。高汪磊<sup>[42]</sup>从元麦麸皮中分离纯化出阿魏酰糖酯,通过构建体外非酶糖基化反应体系,证明了阿魏酰糖酯对晚期糖基化终产物(Advanced Glycation End Products, AGEs)具有良好的抑制作用,为更加安全、有效的AGEs抑制剂的研发奠定基础。

有研究表明,元麦的粒色与酚类物质有着密切联系,深色品种较浅色品种的酚类物质含量更高,组成也更丰富<sup>[36]</sup>。黄白粒元麦中不含生物色素,黄棕粒元麦的种皮中含有原花青素,蓝灰粒和紫红粒元麦的粒色与花青素有关,而黑粒元麦的粒色与酚类物质的氧化和聚合产物、植物黑色素有关<sup>[43-45]</sup>。Zhang等<sup>[46]</sup>针对紫红粒元麦优化了其麸皮花色苷的提取工艺,得出最优参数为料液比1:40 g/mL、pH 1.0、超声功率200 W、提取温度80 °C、提取时间10 min,其纯化物具有良好的抗氧化和抗生物膜活性,经液相色谱-质谱联用仪测定出六种花色苷,其中含量最高的为矢车菊-丙二酰葡萄糖苷。

#### 1.4 植物甾醇

植物甾醇因其降胆固醇、抗氧化、抗炎等多种生理活性而被广泛应用于食品、医药领域,同时也可作为乳化剂、分散剂、着色剂等用于合成化工产品<sup>[47]</sup>。谷物是人类膳食植物甾醇的重要来源,同种谷物不同部位的甾醇含量有着明显差异,就元麦而言,麸皮部位的总量最高,其游离甾醇和阿魏酸甾醇酯的占比是元麦全谷物的2倍多<sup>[48]</sup>。元麦麸皮具有较高的产油率,Moreau等<sup>[49]</sup>以两种元麦麸皮为原料提取油脂,测得其游离甾醇含量平均为1.10%,甾醇酯含量平均为1.65%。龚凌霄等<sup>[50]</sup>以正己烷为溶剂提取元麦麸皮油,经气相色谱-质谱联用(Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)分析得出游离甾醇总量为7 357.72 mg/kg,主要类型为 $\beta$ -谷甾醇和菜油甾醇,此外还检测到了链甾醇、豆甾醇和岩藻甾醇。

## 2 元麦麸皮产品开发的研究进展

### 2.1 元麦麸皮油

元麦麸皮油中除含有丰富的植物甾醇外,还有优质的脂肪酸,其中不饱和脂肪酸占比高达77.27%(以亚油酸为主),饱和脂肪酸主要为棕榈酸,经动物试验得出元麦麸皮油可明显抑制大鼠动脉硬化的形成及其高血脂症<sup>[51]</sup>,此外元麦麸皮油对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶也具有抑制活性,可在II型糖尿病新型治疗药物的研发中发挥积极作用<sup>[52]</sup>。目前元麦麸皮油以正己烷、乙酸乙酯、石油醚等有机溶剂提取为主,罗龙龙等<sup>[52]</sup>在此基础上辅以超声处理,优化出最优工艺条件为超声时间30 min、功率225 W、温度30 °C、浸提时间12 h,该条件下的元麦麸皮油得率为3.62%。为了满足更加安全、环保的工艺需求,有研究采用超临界CO<sub>2</sub>萃取法提取元麦麸皮油,工艺参数为萃取压力20 MPa、时间2 h、温度40 °C、CO<sub>2</sub>流量15 L/h,该条件下得率可达6.26%<sup>[53]</sup>。

### 2.2 元麦麸皮膳食纤维产品

膳食纤维是一类不能被人体小肠消化吸收、对人体健康有利的碳水化合物聚合物(聚合度 $\geq 3$ ),主要存在于植物中,分为可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF),包括纤维素、半纤维素、果胶、菊粉等<sup>[54]</sup>。元麦麸皮中膳食纤维含量可达39.23%(表1),具有良好的加工利用前景。张倩芳等<sup>[55]</sup>分别采用挤压膨化、蒸煮、烘烤、超微粉碎四种方式处理元麦麸皮,发现处理后麸皮的总膳食纤维含量均无显著变化,但挤压膨化改变了膳食纤维的组成比例(SDF含量升高、IDF含量降低),此外四种处理均提高了元麦麸皮的持水力、膨胀力和对胆固醇的吸附能力。王羲<sup>[11]</sup>优化了元麦麸皮IDF的提取和纯化工艺,得出均质转速为10 000 r/min,碱处理条件为氢氧化钠浓度6%、温度60 °C、时间2 h、料液比1:6,脱色条件为过氧化氢浓度5%、pH 11、时间2.5 h,除淀粉工艺为液化时间1 h、糖化时间2 h,再经胰蛋白酶除去粗品中的蛋白质,最终产品中IDF含量可达83.4%。Zhu等<sup>[56]</sup>提取了元麦麸皮的IDF,

并对比了常规研磨和超微粉碎两种处理方式对其的影响,经测定得出超微粉碎 IDF 的总酚含量和抗氧化力均显著高于常规研磨。

多元化的生产设备和加工技术可赋予膳食纤维产品不同的性状和用途。王佳欣等<sup>[57]</sup>提出气流冲击磨技术可将元麦麸皮粒径降至亚微米级,且不影响其膳食纤维的含量和组成,处理后元麦麸皮粉的冲调稳定性和感官品质均显著改善,为富膳食纤维产品的研发提供了技术支撑。赵萌萌<sup>[5]</sup>分别采用超微粉碎、酶解、挤压膨化、气流膨化、酶解复合挤压膨化五种方式处理元麦麸皮粉,再用于食品加工,得出添加 15%超微粉碎粉可使高纤维面包的体积饱满、外形匀整、可接受度更高,添加 55%复合处理粉的曲奇饼干具有最高的感官评分和膳食纤维含量,添加 25%复合处理粉的油茶风味独特、膳食纤维含量最高。Pontonio 等<sup>[58]</sup>利用木聚糖酶酶解元麦麸皮,并经植物乳杆菌 T6B10 和融合魏斯氏菌 BAN8 等比例混合发酵后得到麸皮面团,以其为原料制作面包可使总膳食纤维和蛋白质含量显著增加,同时提高了蛋白质消化率、降低了预测血糖指数,感官特性也更加协调。

此外,元麦麸皮膳食纤维还可作为辅料改善肉制品的品质,郭年红<sup>[59]</sup>以酶法提取了元麦麸皮膳食纤维并分别添加到猪肉火腿肠和猪肉香肠中,与未添加元麦麸皮膳食纤维的对照组相比,9.40%的添加量可使火腿肠的蛋白质含量增加 6.38%、脂肪含量降低 32.60%、热量降低 34.42%;8%的添加量可使香肠具有更好的质构、色泽、感官品质和营养特性。

### 2.3 元麦麸皮发酵产品

基于元麦麸皮降血脂的生理活性,蒲立柠<sup>[60]</sup>等结合了同样具有降脂功效的薏仁和红曲,研制出一款新型红曲产品,以元麦麸皮和薏仁为底物,以紫色红曲 CICC 5046 为发酵菌种,最适工艺为发酵温度 29 °C、接种量 8%、装料量 40 g (250 mL 烧杯)、初始含水量 60%、发酵时间 12 d,该条件下新型红曲中主要降脂成分 Monacolin K 的含量可达 110.556 mg/kg。马敬<sup>[61]</sup>分别以元麦麸皮和

小麦麸皮为主料固态发酵两种食醋,经对比发现元麦麸皮醋中总多酚、总黄酮、 $\gamma$ -氨基丁酸含量更高,ABTS 和羟自由基清除能力更强,挥发性风味物质组成也更加丰富。黄月等<sup>[62]</sup>探究了元麦脱皮与否对其酿造黄酒挥发性风味物质的影响,经 GC-MS 结合气味活度值分析得出未脱皮元麦黄酒中的挥发性风味物质总量 (71 134.67  $\mu\text{g/L}$ ) 高于脱皮元麦黄酒,但脱皮元麦黄酒的特征性风味物质种类更加丰富;元麦麸皮的挥发性风味物质以烷烃和醛酮类为主,虽不直接影响黄酒风味,但可经微生物作用产生特定的挥发性成分,进而促进黄酒风味的形成。

### 3 展望

元麦是我国的特色农作物,具有“三高两低”(高蛋白、高纤维、高维生素、低糖、低脂肪)的特性,是“大健康”理念下极具加工利用潜力的优质谷物。麸皮虽是元麦加工的副产物,但其丰富的营养成分和良好的功能活性仍不容忽视。目前已有不少针对元麦麸皮精深加工的研究,但大多还处于实验阶段,以其为原料提取的功能成分和加工产品并未形成工厂化、商品化的规模。其次,我国的元麦种质资源丰富,不同品种间存在着物质组成与含量的差异,进而影响其加工品质,但目前鲜有对不同品种的元麦麸皮进行对比分析的研究,也未确定出不同品种的最适加工方式和加工产品。此外,为进一步提高元麦麸皮的附加值,还需继续加强技术创新、丰富产品种类,拓宽其在医药、化工等其他领域的应用,以创造出更好的经济与社会效益。

### 参考文献:

- [1] 闵晶晶. 四种元麦胚乳淀粉体发育、消亡及淀粉理化性质的比较研究[D]. 扬州大学, 2020.  
MIN J J. Comparison of development and degradation of starch granule in endosperm and physicochemical properties of starches from four kinds of naked barley[D]. Yangzhou University, 2020.
- [2] 苏乐平. 基于 SLAF-seq 的青稞黑粒基因的挖掘及候选基因的功能验证[D]. 青海大学, 2020.  
SU L P. Mining and functional verification of black seed coat color gene in Tibetan hulless barley based on SLAF-seq[D]. Qinghai University, 2020.

- [3] 卢良恕. 中国大麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.  
 LU L S. Chinese barley science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996.
- [4] 赵萌萌, 党斌, 张文刚, 等. 青稞分层碾磨中各层粉体的营养及功能成分的分布差异[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(6): 98-107.  
 ZHAO M M, DANG B, ZHANG W G, et al. Distribution difference of nutrients and functional components of various powders in milling layer of highland barley by stratified milling[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(6): 98-107.
- [5] 赵萌萌. 青稞麸皮加工特性研究及开发应用[D]. 青海大学, 2021.  
 ZHAO M M. Study on processing characteristics and development application of highland barley bran[D]. Qinghai University, 2021.
- [6] 向卓亚, 夏陈, 杨开俊, 等. 青稞麸皮营养成分及提取物抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 163-168.  
 XIANG Z Y, XIA C, YANG K J, et al. Study on the nutrient composition and antioxidant activity of highland barley bran[J]. Food & Machinery, 2019, 35(12): 163-168.
- [7] 徐中香. 青稞麸皮阿拉伯木聚糖的结构与溶液特性[D]. 上海交通大学, 2018.  
 XU Z X. Structure and solution properties of arabinoxylans from hull-less barley bran[D]. Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [8] 姜忠杰, 李国明, 周明, 等. 青稞麸皮可溶性粗多糖的提取及其抗氧化性研究[J]. 中国食品添加剂, 2012, (6): 70-77.  
 JIANG Z J, LI G M, ZHOU M, et al. Studies on extraction of soluble crude polysaccharose from barley bran and its antioxidant activity[J]. China Food Additives, 2012, (6): 70-77.
- [9] 贾莹. 青稞麸皮水溶性 $\beta$ -葡聚糖的提取、分离纯化和性质研究[D]. 华东理工大学, 2013.  
 JIA Y. Extraction, separation and purification, properties of water-soluble  $\beta$ -glucan from highland barley bran[D]. East China University of Science and Technology, 2013.
- [10] 赵萌萌, 党斌, 张文刚, 等. 超微粉碎对青稞麸皮粉微观结构及功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 278-286.  
 ZHAO M M, DANG B, ZHANG W G, et al. Effects of ultrafine crushing on microstructure and functional properties of highland barley bran powder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 278-286.
- [11] 王羲. 青稞麸皮不溶性膳食纤维提取纯化工艺研究[D]. 兰州大学, 2011.  
 WANG Y. Extraction and purification process of hull-less barley bran infusibility dietary fiber[D]. Lanzhou University, 2011.
- [12] 姚豪颖叶. 青稞中 $\beta$ -葡聚糖与阿拉伯木聚糖的分离纯化与结构表征[D]. 南昌大学, 2016.  
 YAO H Y Y. Isolation and purification and structural characterization of  $\beta$ -glucan and arabinoxylan in hullless barley[D]. Nanchang University, 2016.
- [13] IZYDORCZYK M S, DEXTER J E. Barley  $\beta$ -glucans and arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products-a review[J]. Food Research International, 2008, 41(9): 850-868.
- [14] IZYDORCZYK M S. Barley arabinoxylans: Molecular, physicochemical, and functional properties[J]. Barley: Chemistry and Technology (Second Edition), 2014: 97-122.
- [15] LI J, LU Z J, CHEN Z X, et al. Preparation and characterization of pH-responsive microgel using arabinoxylan from wheat bran for BSA delivery[J]. Food Chemistry, 2020, 342: 128220.
- [16] WU Y, ZHANG G Y. Synbiotic encapsulation of probiotic *Lactobacillus plantarum* by alginate-arabinoxylan composite microspheres[J]. LWT, 2018, 93: 135-141.
- [17] 姚豪颖叶. 青稞、燕麦中 $\beta$ -葡聚糖和阿拉伯木聚糖的理化性质、溶液性质和结构特征[D]. 南昌大学, 2021.  
 YAO H Y Y. Physicochemical properties, solution property and structural characteristics of  $\beta$ -glucans and arabinoxylans from hull-less barley and oat[D]. Nanchang University, 2021.
- [18] GONG L X, JIN C, WU X Q, et al. Determination of arabinoxylans in Tibetan hull-less barley bran[J]. Procedia Engineering, 2012, 37: 218-222.
- [19] GUO R, XU Z X, WU S F, et al. Molecular properties and structural characterization of an alkaline extractable arabinoxylan from hull-less barley bran[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 218: 250-260.
- [20] MAHESHWARI G, SOWRIRAIAN S, JOSEPH B. Extraction and isolation of  $\beta$ -glucan from grain sources-a review[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(7): 1535-1545.
- [21] BENGTTSSON S, ÅMAN P, GRAHAM H, et al. Chemical studies on mixed-linked  $\beta$ -glucans in hull-less barley cultivars giving different hypocholesterolemic responses in chickens[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1990, 52(4): 435-445.
- [22] 胡辉, 刘鹏, 程佩佩, 等. 小分子青稞 $\beta$ -葡聚糖辅助降血糖功能研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(21): 33-37+99.  
 HU H, LIU P, CHENG P P, et al. Study on the auxiliary hypoglycemic function of small molecule  $\beta$ -glucan from hull-less barley[J]. Food Research and Development, 2018, 39(21): 33-37+99.
- [23] 孙昌武, 谢云飞, 姚卫蓉, 等. 发芽处理对青稞 $\beta$ -葡聚糖抗氧化和抗炎作用的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 308-313.  
 SUN C W, XIE Y F, YAO W R, et al. Effect of germination on the anti-oxidation and anti-inflammatory of Qingke  $\beta$ -glucan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 308-313.
- [24] 聂晨曦. 青稞 $\beta$ -葡聚糖理化性质及其对肠道菌群的影响[D]. 西北农林科技大学, 2019.  
 NIE C X. Physicochemical properties of highland barley  $\beta$ -glucan and its effects on intestinal flora[D]. Northwest A&F University, 2019.
- [25] SONG J Y, CHEN H, WEI Y F, et al. Synthesis of carboxymethylated

- $\beta$ -glucan from naked barley bran and its antibacterial activity and mechanism against *Staphylococcus aureus*[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 242: 116418.
- [26] 张峰, 杨勇, 赵国华, 等. 青稞  $\beta$ -葡聚糖研究进展[J]. 粮食与油脂, 2003, (12): 3-5.  
ZHANG F, YANG Y, ZHAO G H, et al. Advance on  $\beta$ -glucan from hull-less barley[J]. Cereals & Oils, 2003, (12): 3-5.
- [27] 文一. 青稞  $\beta$ -葡聚糖的降血脂功能研究[D]. 西南农业大学, 2005.  
WEN Y. Studies on antilipemic function of  $\beta$ -glucan from highland barley[D]. Southwest Agricultural University, 2005.
- [28] 贾晓丽. 添加  $\beta$ -葡聚糖对油炸外裹糊及鸡块含油量的影响研究[D]. 武汉轻工大学, 2021.  
JIA X L. Study on the effect of adding  $\beta$ -glucan on fried batter and oil content of chicken nuggets[D]. Wuhan Polytechnic University, 2021.
- [29] 曲良冉, 郑学玲, 李利民. 青稞中非淀粉多糖— $\beta$ -葡聚糖研究进展[J]. 粮油加工, 2009, (2): 77-81.  
QU L R, ZHENG X L, LI L M. Research progress on non-starch polysaccharides— $\beta$ -glucan of hull-less barley[J]. Cereals and Oils Processing, 2009, (2): 77-81.
- [30] LI Y, YOU M L, LIU H B, et al. Comparison of distribution and physicochemical properties of  $\beta$ -glucan extracted from different fractions of highland barley grains[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 189: 91-99.
- [31] LIU H B, LI Y, YOU M L, et al. Comparison of physicochemical properties of  $\beta$ -glucans extracted from hull-less barley bran by different methods[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 182(2): 1192-1199.
- [32] DU B, ZHU F M, XU B J.  $\beta$ -Glucan extraction from bran of hull-less barley by accelerated solvent extraction combined with response surface methodology[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 59(1): 95-100.
- [33] 刘新琦, 何先喆, 刘纯洁, 等. 发酵法提取青稞麸皮中  $\beta$ -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 optimization of extraction process of barley bran  $\beta$ -glucan by fermentation and its physicochemical properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 49-54.
- [34] 宋居易, 刘建, 魏亚凤, 等. 元麦麸皮中  $\beta$ -葡聚糖的生物酶法制备工艺[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(4): 10-14.  
SONG J Y, LIU J, WEI Y F, et al. Preparation technology of  $\beta$ -glucan from naked barley bran by biological enzyme method[J]. Packaging and Food Machinery, 2019, 37(4): 10-14.
- [35] 贾莹, 常雅宁, 俞建瑛, 等. 青稞麸皮  $\beta$ -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  $\beta$ -glucan from highland barley bran[J]. The Food Industry, 2013, 34(8): 107-110.
- [36] GONG L X, JIN C, WU L J, et al. Tibetan hull-less barley (*Hordeum vulgare* L.) as a potential source of antioxidants[J]. Cereal Chemistry, 2012, 89(6): 290-295.
- [37] 徐菲, 杨希娟, 党斌, 等. 酸法提取青稞麸皮结合酚工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 301-308.  
XU F, YANG X J, DANG B, et al. Optimization of combined phenols extraction with sulfuric acid from hullless barley bran[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 301-308.
- [38] 杨希娟, 党斌, 张杰, 等. 黑青稞麸皮结合态酚类物质大孔树脂分离纯化工艺优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 295-303.  
YANG X J, DANG B, ZHANG J, et al. Process optimization on separation and purification of bound polyphenol in black highland barley bran by macroporous resin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 295-303.
- [39] 陈晓默. 青稞及其副产物对晚期糖基化终产物的抑制研究[D]. 北京工商大学, 2018.  
CHEN X M. Study on inhibition of AGEs by highland barley and its by-products[D]. Beijing Technology and Business University, 2018.
- [40] PAZO-CEPEDA M V, ASPROMONTE S G, ALONSO E. Extraction of ferulic acid and feruloylated arabinoxylo-oligosaccharides from wheat bran using pressurized hot water[J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101374.
- [41] KYLLI P, NOUSIAINEN P, BIELY P, et al. Antioxidant potential of hydroxycinnamic acid glycoside esters[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2008, 56(12): 4797-4805.
- [42] 高汪磊. 青稞麸皮中阿魏酰糖酯的分离提取及其抗糖化作用研究[D]. 浙江大学, 2015.  
GAO W L. Extraction of feruloyl oligosaccharides from Tibetan hull-less barley bran and the study of antiglycation activities[D]. Zhejiang University, 2015.
- [43] AASTRUP S, OUTTRUP H, ERDAL K. Location of the proanthocyanidins in the barley grain[J]. Carlsberg Research Communications, 1984, 49(1): 105-109.
- [44] JIA Q J, ZHU J H, WANG J M, et al. Genetic mapping and molecular marker development for the gene *Pre2* controlling purple grains in barley[J]. Euphytica International Journal of Plant Breeding, 2016, 208: 215-223.
- [45] SHOEVA O Y, MOCK H P, KUKOEVA T V, et al. Regulation of the flavonoid biosynthesis pathway genes in purple and black grains of *Hordeum vulgare*[J]. Plos One, 2016, 11(10): e0163782.
- [46] ZHANG Y Z, LIN Y F, HUANG L, et al. Composition, antioxidant, and anti-biofilm activity of anthocyanin-rich aqueous extract from purple highland barley bran[J]. LWT, 2020, 125: 109181.
- [47] 汪秀秀. 植物甾醇凝胶油的制备及其降血脂功能研究[D]. 合肥工业大学, 2020.  
WANG X X. Study on the preparation and lowering blood lipid

- effects of phytosterol-based oleogel[D]. Hefei University of Technology, 2020.
- [48] LAMPI A M, MOREAU R A, PIIRONEN V, et al. Pearling barley and rye to produce phytosterol-rich fractions[J]. *Lipids*, 2004, 39(8): 783-787.
- [49] MOREAU R A, FLORES R A, HICKS K B. Composition of functional lipids in hulled and hullless barley in fractions obtained by scarification and in barley oil[J]. *Cereal Chemistry*, 2007, 84(1): 1-5.
- [50] 龚凌霄, 曹文燕, 张英, 等. 青稞麸皮提取物抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性研究及成分分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(6): 179-184.
- GONG L X, CAO W Y, ZHANG Y, et al. Anti- $\alpha$ -glucosidase activities and bioactive components of Tibetan hull-less barley bran extracts[J]. *Food Science*, 2017, 38(6): 179-184.
- [51] 钱俊伟, 蒋思萍, 苏文涛, 等. 青稞麸皮油脂脂肪酸成分分析及其对高血脂症大鼠脂质代谢的影响[J]. *四川动物*, 2009, 28(5): 739-742.
- QIAN J W, JIANG S P, SU W T, et al. Analysis of fatty acid composition of hullless barley bran oil and its effect on lipid metabolism in hyperlipidemia rats[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2009, 28(5): 739-742.
- [52] 罗龙龙, 任卫合, 王丽萍, 等. 青稞麸皮油提取工艺优化及其抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性研究[J/OL]. *中国粮油学报*, [2022-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210903.1307.002.html>.
- LUO L L, REN W H, WANG L P, et al. Optimization of the extraction process of barley bran oil and its inhibition of  $\alpha$ -glucosidase activity[J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, [2022-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210903.1307.002.html>.
- [53] 龚凌霄, 张英. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取青稞麸皮油的工艺及成分研究[C]. 北京: 第十四届国际谷物科技与面包大会暨国际油料与油脂发展论坛, 2012: 347.
- GONG L X, ZHANG Y. SFE technology of bran oil of Tibetan hull-less barley and its composition[C]. Beijing: 14th ICC Cereal and Bread Congress and Forum on Fats and Oils, 2012: 347.
- [54] 中华人民共和国卫生部; 中国国家标准化管理委员会. 食品营养成分基本术语: GB/Z 21922—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- The Ministry of Health of the P. R. China; Standardization Administration of the P. R. China. Fundamental terminology and definition of nutritional component in foods: GB/Z 21922—2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [55] 张倩芳, 李敏, 栗红瑜, 等. 不同预处理方式对青稞麸皮营养成分和理化性质的影响[J]. *农产品加工*, 2021, (18): 25-28.
- ZHANG Q F, LI M, LI H Y, et al. Effects of different pretreatment methods on nutrition composition and physicochemical properties of hullless barley bran[J]. *Farm Products Processing*, 2021, (18): 25-28.
- [56] ZHU F M, DU B, XU B J. Superfine grinding improves functional properties and antioxidant capacities of bran dietary fibre from Qingke (hull-less barley) grown in Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 65: 43-47.
- [57] 王佳欣, 黎阳, 李再贵, 等. 不同粒径对青稞麸皮结构功能特性及冲调稳定性的影响[J/OL]. *食品科学*, [2022-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20211220.1417.008.html>.
- WANG J X, LI Y, LI Z G, et al. Effects of different particle sizes on the structure, functional properties and reconstitution stability of highland barley bran[J/OL]. *Food Science*, [2022-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20211220.1417.008.html>.
- [58] PONTONIO E, DINGEO C, CAGNO R D, et al. Brans from hull-less barley, emmer and pigmented wheat varieties: From by-products to bread nutritional improvers using selected lactic acid bacteria and xylanase[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2020, 313: 108384.
- [59] 郭年红. 青稞麸皮膳食纤维的制备工艺及在肉制品中的应用[D]. 西华大学, 2021.
- GUO N H. Preparation of dietary fiber from highland barley bran and its application in meat products[D]. Xihua University, 2021.
- [60] 蒲立柠, 陈光静, 阚建全. 响应面试验优化青稞麸皮薏仁红曲霉发酵工艺[J]. *食品科学*, 2017, 38(2): 264-270.
- PU L N, CHEN G J, KAN J Q. Optimization of fermentation process of a mixture of highland barley bran and coix seed by *monascus purpureus* using response surface methodology[J]. *Food Science*, 2017, 38(2): 264-270.
- [61] 马敬. 青稞麸皮醋的抗氧化活性及风味物质分析[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(4): 134-138.
- MA J. Analyses of antioxidant activities and flavors of barley bran vinegar[J]. *Storage and Process*, 2021, 21(4): 134-138.
- [62] 黄月, 杨映津, 邱华振, 等. 脱皮与不脱皮青稞酿造营养黄酒风味差异的研究[J]. *工业微生物*, 2018, 48(3): 9-16.
- HUANG Y, YANG Y J, QIU H Z, et al. Analysis and comparison of volatile compounds from rice-wine fermented by barley and hulled barley[J]. *Industrial Microbiology*, 2018, 48(3): 9-16. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。