

夏虎, 晏熙玥, 卢利聃, 等. 青稞的营养功能及其高值化利用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 403–413. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080217

XIA Hu, YAN Xiyue, LU Lidan, et al. Progress on Nutritional Function and High-value Utilization of Hulless Barley[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 403–413. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080217

· 专题综述 ·

# 青稞的营养功能及其高值化利用研究进展

夏 虎, 晏熙玥, 卢利聃, 曹亚楠, 彭镰心, 邹 亮, 任远航\*, 赵 钢

(农业农村部杂粮加工重点实验室, 四川省杂粮产业化工程技术研究中心, 成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106)

**摘 要:**近年来, 青稞因其丰富的营养组成及独特的生物活性而受到广泛关注。青稞中抗性淀粉、Lunasin 多肽、独特的脂肪酸和非淀粉多糖组成以及丰富的酚类物质令其在抗癌、降血糖、降血脂等方面具有良好的发展潜力, 然而其加工利用程度低, 高附加值产品少, 限制了青稞产业的发展。本文从特色营养成分、生物活性、加工利用技术和高附加值产品开发现状四个方面对青稞研究进展进行了总结, 以期促进青稞的深入研究和应用, 为青稞产业持续发展提供进一步支持。

**关键词:**青稞, 营养成分, 生物活性, 加工技术, 高值化利用

中图分类号: TS213

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)20-0403-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080217



本文网刊:

## Progress on Nutritional Function and High-value Utilization of Hulless Barley

XIA Hu, YAN Xiyue, LU Lidan, CAO Yanan, PENG Lianxin, ZOU Liang, REN Yuanhang\*, ZHAO Gang

(Key Laboratory of Coarse Cereal Processing of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Sichuan Engineering and Technology Research Center of Coarse Cereal Industrialization, College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

**Abstract:** Recently, the hulless barley has drawn wide attention due to its abundant nutritional composition and unique biological activities. Resistant starch, lunasin polypeptide, unique fatty acid and non-starch polysaccharide composition and rich phenolic substances make hulless barley have good development potential in anti-cancer, hypoglycemic, hypolipidemic and other aspects. However, the low degree of processing and utilization and the rare of high value-added products hinder the development of the hulless barley industry. The components, biological activities, processing and utilization technology and high-value products of hulless barley are summarized in this paper to provide support for promoting the research and sustainable industry development of hulless barley.

**Key words:** hulless barley; nutrients; biological activity; processing technology; high-value utilization

青稞(*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook.f.), 禾本科小麦族大麦属一年生草本植物, 又称裸大麦<sup>[1]</sup>, 与大麦、小米、高粱、糜子等同属于谷类杂粮<sup>[2]</sup>。青稞主要种植于西藏、青海, 以及四川、云南等地的高海拔地区, 最高种植海拔可达 4500 米。青稞栽培品种繁多, 常依据其籽粒外形分为二棱、四棱和六棱, 我国以四棱或六棱为主, 相较于六棱青稞, 二棱青

稞的直链淀粉比例更低<sup>[3]</sup>。籽粒中直链淀粉含量很低或为零的青稞也称为糯青稞, 其  $\beta$ -葡聚糖含量相对较高, 具有易糊化、粘度高、回生慢等潜在的加工优势<sup>[4]</sup>。此外, 根据成熟时青稞是否具有特殊颜色, 又可将青稞分为普通青稞和有色青稞(黑色、蓝色、紫色等), 有色青稞含有更多的花色素和酚类物质, 具有更强的抗氧化活性<sup>[5]</sup>。青稞高蛋白、高膳食纤维、低

收稿日期: 2021-08-23

**基金项目:** 龙泉驿区科技项目(2021LQYF0026); 国家重点研发计划(2020YFD1001403); 四川省科技厅区域创新合作项目(22QYCX0077); 成都市科技局技术创新研发项目(2022-YF05-00431-SN)。

**作者简介:** 夏虎(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: xiahu5575@foxmail.com。

**\* 通信作者:** 任远航(1989-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 杂粮营养评价及精深加工, E-mail: renyuanhang@cdu.edu.cn。

脂肪的营养组成十分符合现代人的饮食结构需求,同时青稞中较高含量的 $\beta$ -葡聚糖也赋予了青稞降血糖、降血脂等多种生理功能,因此青稞具有极高的科研价值和良好的产业化开发前景。本文从特色营养成分、生物活性、加工利用技术和高附加值产品开发现状四个方面综述了青稞的特殊价值及高值化利用情况,以期促进青稞的深入研究和应用,为青稞产业持续发展提供进一步支持。

## 1 青稞的营养功能成分

现代营养学与医学研究证实,相较于常见谷类,青稞具有较高的蛋白质、膳食纤维和维生素含量,以及较低的糖类和脂肪含量(表1)。此外,青稞 $\beta$ -葡聚糖在降血糖<sup>[6]</sup>、降血脂<sup>[7]</sup>、预防或辅助改善Ⅱ型糖尿病<sup>[8]</sup>、预防结肠癌<sup>[9]</sup>等方面具有不俗的效果。青稞的

主要营养成分及功能活性物质见图1。

### 1.1 淀粉

淀粉是青稞籽粒的主要成分,其含量为49%~75%,平均含量65%左右<sup>[3,18-21]</sup>。青稞中直链淀粉和支链淀粉的比例在20:80~34:66之间<sup>[18]</sup>。与其它作物淀粉相比,青稞淀粉表现出较高的糊化温度,较好的非牛顿性质、回生能力、糊化能以及剪切稀化特性<sup>[21]</sup>。青稞淀粉中快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)、抗性淀粉(RS)占比分别为96.19%、1.54%和2.27%<sup>[22]</sup>。青稞中的RS在人体消化道内基本不被消化,主要是通过结肠内的微生物发酵,产生短链脂肪酸来发挥其生理功能<sup>[23]</sup>,因此,可避免餐后的血糖升高和胰岛素反应<sup>[24]</sup>。研究表明,抗性淀粉能够通过促进脂肪氧化,防止脂肪堆积以及减少能量摄入来控制体重<sup>[25]</sup>;

表1 常见谷类营养成分表<sup>[10-17]</sup>

Table 1 Nutritional composition of common cereals<sup>[10-17]</sup>

| 名称 | 蛋白质(%) | 脂肪(%) | 碳水化合物(%) | 膳食纤维(%) | 灰分(%) | 总V <sub>A</sub> ( $\mu$ gRAE/100 g) | 烟酸(mg/100 g) | 总V <sub>E</sub> (mg/100 g) |
|----|--------|-------|----------|---------|-------|-------------------------------------|--------------|----------------------------|
| 青稞 | 10.6   | 2.9   | 76.1     | 13.4    | 3.0   | 0                                   | 6.7          | 1.0                        |
| 小麦 | 11.9   | 1.3   | 75.2     | 11.6    | 1.6   | 0                                   | 4.0          | 1.8                        |
| 稻米 | 7.7    | 2.7   | 75.0     | 3.9     | 1.2   | —                                   | 0            | 1.3                        |
| 小米 | 9.0    | 3.1   | 75.1     | 1.1     | 1.2   | —                                   | 1.5          | 3.6                        |
| 高粱 | 10.4   | 3.1   | 74.7     | 4.0     | 1.5   | 0                                   | 1.6          | 1.9                        |
| 荞麦 | 9.5    | 1.7   | 73.0     | 4.0     | 2.4   | 2                                   | 2.2          | 4.4                        |
| 燕麦 | 10.1   | 0.2   | 77.4     | 5.3     | 2.1   | Tr                                  | -            | 0.9                        |
| 藜麦 | 14.4   | 5.8   | 66.6     | 6.6     | 2.2   | Tr                                  | 1.0          | 6.4                        |

注:—表示理论上存在一定量的该成分但实际未检测;Tr表示未检出或低于应用的检测方法的检出限。

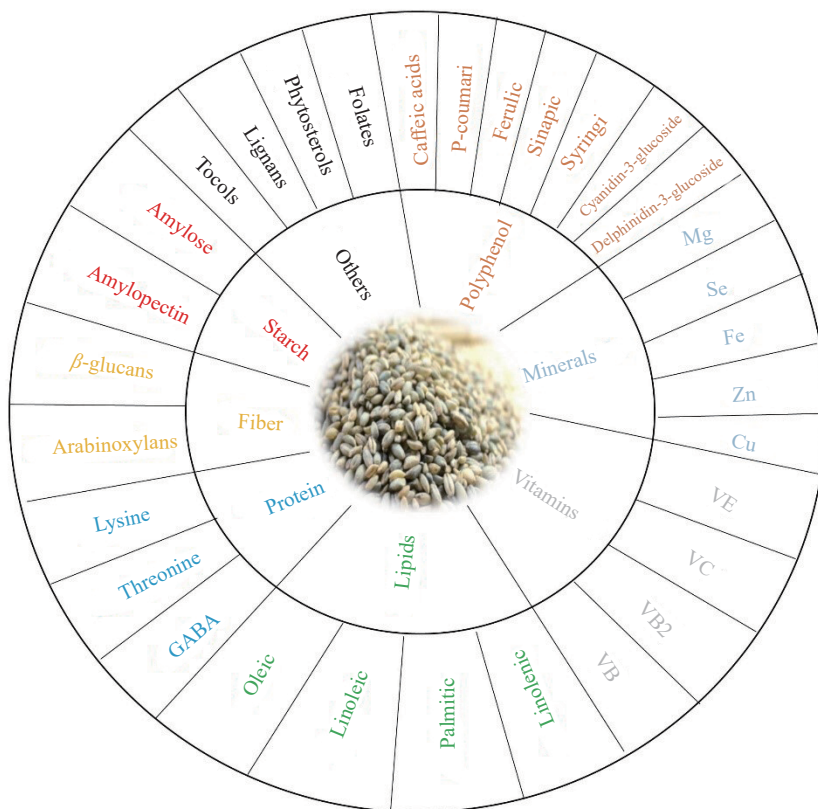


图1 青稞主要营养成分及功能活性物质

Fig.1 Main nutritional components and functional active substances of hulless barley

能够调控、重塑人体肠道菌群<sup>[26]</sup>;能够影响血液和肝脏的相关指标<sup>[27-30]</sup>以及机体的脂肪沉积<sup>[31]</sup>从而影响着脂质代谢,但其具体作用机制尚未完全揭示<sup>[32]</sup>。

## 1.2 蛋白质

蛋白质是青稞籽粒中含量仅次于淀粉的重要组成部分,其含量为 6.10%~23.4%,平均含量 11% 左右<sup>[20,33-35]</sup>。清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白是谷物中蛋白质的主要组分,在青稞蛋白质中,四种蛋白质组分较为齐全,平均含量分别为清蛋白 20.48%、球蛋白 10.99%、醇溶蛋白 21.04%、谷蛋白 31.91%,不同品种间差异显著,总体来说,谷蛋白含量最高,球蛋白含量最低。

氨基酸组成及含量是蛋白质营养价值的重要评判依据。侯殿志等<sup>[34]</sup>发现青稞中普遍存在 8 种必需氨基酸和 9 种非必需氨基酸,总氨基酸平均含量为 9.18%,平均必需氨基酸含量占总氨基酸含量的 32.21%,品种之间无显著性差异。翟会生等<sup>[36]</sup>对 72 份青稞进行了氨基酸组成和营养价值评价,认为赖氨酸是青稞的第一限制氨基酸,其含量为 3.64 mg/g DW。此外,青稞蛋白酶解后释放的生物活性多肽具有多种生理功能,在抗血小板凝集<sup>[37]</sup>、抗氧化<sup>[38]</sup>等方面具有不俗的表现,其中 Lunasin 多肽在动物实验中被证实能够有效抑制小鼠表皮细胞的增殖<sup>[39-40]</sup>。

## 1.3 脂质

在青稞中,脂肪含量变化范围为 2.44%~4.48%,平均含量 2.89%,品种之间差异显著<sup>[34]</sup>。青稞麸皮油中中性脂质含量最高(94.55%),其次为糖脂(4.20%)和磷脂(1.25%)<sup>[41]</sup>。相比于其它谷类作物的脂肪含量,如小米<sup>[42]</sup>(约 4%)、玉米<sup>[43]</sup>(约 5.0%)等,青稞的脂肪含量相对较低。

亚油酸、棕榈酸、油酸和亚麻酸为青稞中最主要的四种脂肪酸,具有较高的营养价值,其中以亚油酸(75.08%)为主的不饱和脂肪酸含量为 77.27%,棕榈酸(20.58%)为主的饱和脂肪酸含量为 22.73%<sup>[44]</sup>。青稞麸皮油中高含量的亚油酸和棕榈酸能够抑制  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的活性,有效控制餐后血糖的升高从而达到降血糖的效果,亚油酸还能够预防动脉粥样硬化的发生<sup>[45]</sup>。在动物试验中<sup>[46]</sup>,青稞麸皮油能显著降低高脂症大鼠甘油三酯水平、总胆固醇水平和动脉硬化指数,且青稞麸皮油剂量为 2.5 mL/(kg·d)时干预效果强于剂量为 0.028 g/mL 5 mL/(kg·d)的脂必妥。

## 1.4 $\beta$ -葡聚糖

青稞中  $\beta$ -葡聚糖含量在大麦中居于首位,通常为 3.66%~8.62%<sup>[7]</sup>。青稞  $\beta$ -葡聚糖主要存在于籽粒细胞壁中,形式多为(1,3)-(1,4)- $\beta$ -D-葡聚糖,其独特的分子结构让  $\beta$ -葡聚糖具有一定的亲水性,高粘性和易成凝胶等特性<sup>[47]</sup>。

研究表明,青稞  $\beta$ -葡聚糖在降血糖<sup>[6]</sup>、降血脂<sup>[7]</sup>、预防或辅助改善 II 型糖尿病<sup>[8]</sup>、预防结肠癌<sup>[9]</sup>等方面有着良好效果。青稞  $\beta$ -葡聚糖能够通过影响胆酸重

吸收、调控胆固醇代谢从而加快血清中 LDL-C 的清除,达到降低血脂的目的<sup>[7]</sup>。临床试验证明,高  $\beta$ -葡聚糖饮食可避免糖尿病患者餐后出现高血糖反应,降低血糖波动,在预防或辅助改善 II 型糖尿病上有着良好的效果<sup>[8]</sup>。另有研究表明, $\beta$ -葡聚糖能够通过降低特定的肠道菌群,减少硫化氢的产生,从而降低产生结肠癌的风险<sup>[9]</sup>。同时,利用改性青稞  $\beta$ -葡聚糖包埋的黑枸杞花青素能够显著提高试验小鼠肝糖原的储备能力,具有明显的抗疲劳效果<sup>[48]</sup>。

## 1.5 多酚

多酚类物质是一类广泛存在于自然界植物中的活性物质,具有多种生理功能。青稞籽粒中多酚类物质含量高达 1200~1500 mg/kg,包括苯甲酸类、肉桂酸类、原花青素类黄酮醇以及氨基酸等<sup>[49]</sup>。

在不同品种青稞中,多酚含量差异显著,一般来说青稞颜色越深,多酚含量越高。紫色、黑色青稞结合酚平均含量分别为 221.91 和 241.62 mg/100 g DW,显著高于蓝色青稞结合酚(207.59 mg/100 g DW)<sup>[5]</sup>。据有关报道<sup>[50]</sup>,在青稞麸皮粉中游离酚共检测出 19 种,以丁香酸、阿魏酸、苯甲酸和藜芦酸为主;结合酚共检测出 7 种,以阿魏酸、苯甲酸为主。大量研究表明,青稞中多酚的抗氧化活性与其含量呈正相关。据报道,青稞游离态提取物具有更强的 ABTS<sup>+</sup>清除能力及 FRAP 铁离子还原能力,结合态提取物的 DPPH 清除能力更强,且不同颜色的青稞多酚提取物的抗氧化活性差异显著<sup>[5]</sup>。青稞酚类提取物还具有调节糖代谢的作用,从青稞中提取的原花青素 B1 与对香豆酸协同作用,通过靶向 IR $\beta$  受体、影响 SRS-1/P13K/Akt 通路调节糖代谢,恢复葡萄糖耐受量异常小鼠的葡萄糖耐受量和胰岛素抵抗,促进糖原合成<sup>[51]</sup>。

## 2 青稞全谷物的生物活性

### 2.1 抗癌作用

大量研究表明,青稞在细胞及动物水平上表现出潜在的预防或治疗肿瘤活性。青稞中的  $\beta$ -葡聚糖能够通过改变肠道菌群,减少硫化氢的产生从而对结肠癌起到预防效果<sup>[9]</sup>。青稞多酚具有一定的抗癌功能<sup>[52]</sup>。研究表明,青稞游离态、结合态提取物通过诱导细胞周期阻滞和细胞凋亡对 HepG2、MDA-MB-231 和 Caco-2 细胞都表现出抗增殖活性,一种青稞的游离态提取物能够通过 p38/MAPK 信号转导通路诱导 Caco-2 细胞 G1/S 期阻滞,同时通过外源体死亡受体通路诱导 Caco-2 细胞凋亡<sup>[53]</sup>。另有研究表明,一种青稞水溶性多糖组分(BP-1)对于免疫抑制小鼠骨髓细胞和周围血液中白细胞数量的下降有显著的抑制作用,并且通过 TLR4、TRAF6、TAK1 和 NF- $\kappa$ B 炎症通路,促进免疫抑制小鼠体内巨噬细胞的增殖和吞噬<sup>[54]</sup>,同时抑制 NF- $\kappa$ B 从细胞质到细胞核的转移,从而诱导人结肠癌细胞凋亡<sup>[55]</sup>,起到预防结肠癌的效果。

## 2.2 抗肥胖

目前,全球已有 19 亿人超重,其中三分之一的人肥胖<sup>[56]</sup>,预防肥胖、控制体重早已成为现代人的关注热点。熊荣君等<sup>[57]</sup>通过观察 227 名高血脂患者服用青稞炒面前后血脂和体重的变化,发现 30 d 后治疗组体重平均下降 1.13 kg,对照组体重下降 0.03 kg,证实青稞能够有效降低血脂和体重。有研究表明,青稞全粉能抑制经高脂高糖饲喂大鼠体内脂肪的增加,显著改善大鼠糖脂代谢,能够有效控制大鼠的体重<sup>[58]</sup>。相比于普通青稞,有色青稞  $\beta$ -葡聚糖具有更高的分子量、粒径和粘度,更强的脂肪结合能力、胆固醇结合能力、胆酸结合能力和胰脂肪酶抑制活性<sup>[59]</sup>,在预防肥胖方面更具优势。

## 2.3 降血糖

青稞全谷物在控制血糖、调节糖代谢方面具有良好的效果。在对 100 例空腹血糖受损患者为期 3 个月的膳食干预实验中,青稞麦片显著降低了患者血糖水平,对糖脂代谢的改善作用强于燕麦片,研究人员认为青稞麦片优秀的降血糖效果应当主要归功于高含量的  $\beta$ -葡聚糖<sup>[60]</sup>。在以糖尿病小鼠为研究对象的动物实验中,青稞全粉显著降低了糖尿病小鼠的空腹血糖以及糖耐量曲线,并且进一步的粪菌移植实验证明肠道菌群的改善在糖尿病小鼠的糖代谢改善过程中起到了至关重要的作用<sup>[61]</sup>。

## 2.4 降血脂

青稞主要通过影响胆固醇代谢对机体脂代谢起到调控作用。胆酸是由胆固醇在肝脏细胞中合成的一种胆汁酸,能够通过肠道内调节脂肪酶的活性影响机体脂代谢,青稞  $\beta$ -葡聚糖能够通过影响胆酸代谢起到降低血脂的效果<sup>[7]</sup>。青稞全谷物能够显著降低高脂饮食大鼠血清中的总胆固醇、甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇水平,明显减小大鼠肝脏细胞内脂肪滴的体积<sup>[62]</sup>,其作用机理有以下几点:通过肝脏 AMPK $\alpha$ 、HMG-CoAr、LDL-R、LXR、PPAR $\alpha$ 、CYP7A1 的表达影响肝脏胆固醇代谢;上调 ECH 的表达促进脂肪酸的  $\beta$ -氧化;选择性富集细菌以增加大鼠肠道发酵活性和肠道短链脂肪酸水平,调节肠道胆固醇代谢。青稞的营养成分及其功能见表 2。

## 3 青稞营养成分的加工利用

### 3.1 淀粉的加工与利用

青稞淀粉颗粒表面光滑,形态、大小均匀,大颗粒淀粉为圆饼形,且表面附着有小颗粒淀粉,小颗粒多为圆球形<sup>[66-67]</sup>。青稞淀粉粒径都呈现双峰分布,不同品种青稞淀粉粒径分布差异显著<sup>[67]</sup>。青稞淀粉溶解度为 3.21%~7.29%,膨胀度为 5.89~8.74 g/g<sup>[66]</sup>,糊化初始温度、峰值温度和终止温度与粒径呈正相关,糊化焓与粒径呈负相关<sup>[68]</sup>。不同品种青稞淀粉粒径分布见表 3,其中藏青 320 淀粉粒径最大,为 52.29  $\mu\text{m}$ ,

表 2 青稞的营养成分及其功能

Table 2 Nutritional components and functions of hulless barley

| 类别    | 成分           | 功能            | 主要内容                                                                                                                                                     | 参考文献          |
|-------|--------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 淀粉    | RS           | 降低酒精诱导的胃损伤    | 青稞RS较低的粘度能够促进胃排空,减少乙醇在胃黏膜上的作用,并且通过调节氧化应激、炎症因子,改善中性粒细胞浸润来改善胃损伤水平。                                                                                         | [63]          |
| 蛋白质   | 赖氨酸          | 青稞蛋白质的第一限制氨基酸 | 青稞中赖氨酸含量高达0.367 g/100 g,在促进人体生长发育、增强机体免疫力、抗病毒、促进脂肪氧化、缓解焦虑情绪等方面都具有积极作用。                                                                                   | [64]          |
|       | Lunasin多肽    | 抑制皮肤癌细胞增殖     | Lunasin多肽能够抑制小鼠表皮细胞增殖。                                                                                                                                   | [39-40]       |
| 脂肪    | 脂肪酸          | 降血糖           | 亚油酸、油酸、棕榈酸、 $\alpha$ -亚麻酸是青稞最主要的脂肪酸,对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性强于阿卡波糖,在降血糖方面有着不俗的效果。                                                                           | [51]          |
|       | 麸皮油          | 降血脂、抑制动脉硬化    | 青稞麸皮油通过提高大鼠血液中TIMP-1水平,抑制MMP-9活性,在抑制炎症反应与细胞外基质降解的同时,降低TC、TG、LDL-C水平,提高HDL-C水平,通过改善脂代谢抑制动脉硬化的形成。                                                          | [65]          |
|       | $\beta$ -葡聚糖 | 降血脂           | 青稞 $\beta$ -葡聚糖可与胆酸发生有效结合,胆酸在肠道内的重吸收作用减弱,胆汁酸的分泌增加,肝脏内胆酸合成的限速酶CYP7A1表达上升,胆酸合成速率加快,胆固醇代谢增强,肝脏内胆固醇水平降低,肝细胞表面LDLR活性提高,肝细胞内LDL-C转入增加,加快了血清中LDL-C的清除速率,从而降低血脂。 | [7]           |
| 非淀粉多糖 |              | 预防结肠癌         | $\beta$ -葡聚糖通过降低特定的肠道菌群丰度,减少硫化氢的产生,从而对结肠癌起到预防作用。                                                                                                         | [9]           |
|       | 一种水溶性多糖      | 预防结肠癌         | 该多糖组分通过TLR4、TRAF6、TAK1和NF- $\kappa$ B炎症通路,促进免疫抑制小鼠体内巨噬细胞的增殖和吞噬,同时抑制NF- $\kappa$ B从细胞质到细胞核的转移,诱导人结肠癌细胞凋亡。                                                 | [54-55]       |
|       |              | 抗氧化           | 青稞游离态和结合态提取抗氧化活性差异显著,且不同提取方式对青稞多酚的组成和抗氧化活性影响较大。                                                                                                          | [5]           |
| 多酚    |              | 抗肿瘤细胞增殖       | 青稞多酚通过诱导细胞周期阻滞和细胞凋亡,从而对HepG2、MDA-MB-231和Caco-2细胞表现出抗增殖活性。                                                                                                | [53]          |
|       |              | 降血糖           | 青稞多酚通过靶向IR $\beta$ 受体、影响SRS-1/P13K/Akt通路调节糖代谢,恢复葡萄糖耐受量异常小鼠的葡萄糖耐受量和胰岛素抵抗,促进糖原合成,降低血糖。                                                                     | [51]          |
| 全谷物   |              | 具有多种生物活性      | 青稞全谷物在抗癌、抗肥胖、降血糖、降血脂、改善肠道菌群、调节胆固醇代谢等方面均有着不俗的效果。                                                                                                          | [53,57,61-62] |

表 3 不同品种青稞淀粉颗粒的粒径及糊化性质<sup>[66]</sup>

Table 3 Grain size and gelatinization properties of starch granules in different varieties of hulless barley<sup>[66]</sup>

| 青稞品种  | 体积平均粒径(μm)               | 糊化初始温度(℃)               | 糊化焓(J·g <sup>-1</sup> )     | 崩溃值(BD)                    |
|-------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 藏青320 | 52.29±0.96 <sup>a</sup>  | 41.21±0.65 <sup>b</sup> | 1196.67±153.14 <sup>c</sup> | 667.00±1.00 <sup>d</sup>   |
| 昆仑12号 | 39.30±2.83 <sup>b</sup>  | 47.98±5.10 <sup>a</sup> | 1873.13±21.39 <sup>a</sup>  | 832.67±17.04 <sup>ab</sup> |
| 肚里黄   | 37.81±1.77 <sup>bc</sup> | 41.94±6.24 <sup>b</sup> | 1908.00±90.50 <sup>a</sup>  | 849.67±34.99 <sup>a</sup>  |
| 北青3号  | 24.30±2.21 <sup>d</sup>  | 52.21±0.83 <sup>a</sup> | 1357.33±81.68 <sup>b</sup>  | 740.67±26.58 <sup>c</sup>  |
| 北青6号  | 33.60±3.38 <sup>c</sup>  | 50.81±1.62 <sup>a</sup> | 1361.47±35.06 <sup>b</sup>  | 791.00±35.93 <sup>b</sup>  |

注: 不同字母表示在0.05水平上显著。

具有最低的糊化初始温度、糊化焓和崩溃值,在 5 种青稞淀粉中最易糊化。

热处理是青稞淀粉改性最常见的方式,半熟化能够使谷物淀粉颗粒部分糊化从而改变谷物的理化性质和营养成分,令其更适宜储存或者再加工<sup>[69]</sup>。在 121℃, 0.1 MPa 的半熟化处理的过程中,青稞淀粉的  $L^*$  值随处理时间的增加而降低,  $b^*$  值随处理时间的增加而升高,淀粉颗粒在糊化后发生破碎,粒径更小且更均匀,糊化温度、糊化焓较未处理样品显著降低焓较未处理样品显著降低<sup>[70]</sup>。研究表明,半熟化处理过程中,青稞淀粉分子链断裂形成短的直接淀粉从而略微增加了直链淀粉含量,由于该过程中淀粉分子链重新排列形成更加有序的结构,具有更强的热稳定性和抗酶水解性,抗性淀粉含量得到一定程度的提高,青稞淀粉整体消化率降低<sup>[22]</sup>。

糊化特性是青稞淀粉非常重要的理化指标,对青稞淀粉的加工和应用起着决定性作用。青稞淀粉的糊化温度在 46.83~79.85 ℃ 之间,糊化程度最大时,糊化温度无显著性差异<sup>[66]</sup>。有研究表明,青稞淀粉的糊化易于小麦淀粉,难于荞麦淀粉,具有较强的耐酸碱性,且添加 NaCl 可以明显改善青稞淀粉的糊化特性以及冷稳定性<sup>[71]</sup>。直链淀粉含量不仅对淀粉的糊化特性起着决定性的作用,而且对抗性淀粉的生成率呈显著正相关<sup>[72]</sup>,与淀粉的回生值和糊化黏度呈正相关<sup>[73]</sup>,同时也是影响青稞蒸煮食品品质的重要指标<sup>[66]</sup>。半熟化处理能够提高青稞淀粉糊化温度,降低粘度,通过增加直链淀粉的含量将快消化淀粉一定程度地转化为慢消化淀粉和抗性淀粉<sup>[22]</sup>,同时,这种加工方式对于风味和香气具有一定程度的改善作用<sup>[69]</sup>。

3.2 蛋白质的加工与利用

青稞蛋白质的提取主要采用碱溶酸沉法和生物酶法。吴桂玲等<sup>[74]</sup>发现碱溶酸沉法影响青稞蛋白质提取率的因素依次为 pH、料液比、提取时间、提取温度,最佳工艺条件为:料液比 1:25(g/mL),pH11,提取温度 40 ℃,提取时间 20 min,提取率为 70.71%。为提高青稞蛋白质的提取率,杨希娟等<sup>[75]</sup>利用超声波辅助碱溶酸沉法提取蛋白质,该方法提取率达到 93.15%。微波同样能够作为碱溶酸沉法的辅助手段,使用该方法提取率可达 81.94%,同时对蛋白质的吸水性、吸油性和溶解性均有不同程度的提高,但起泡性有一定程度的降低<sup>[76]</sup>。生物酶法相对于碱溶酸

沉法耗时较长,纯度较低,但反应条件温和,不易产生有害物质,是一种绿色安全的提取方法。李涛<sup>[77]</sup>利用纤维素酶提取青稞蛋白质的最佳工艺为加酶量 10 EGU/g,酶解时间 4 h,酶解温度 45 ℃,pH 为 6.5,该条件下青稞蛋白质提取率为 69.4%。

蛋白质的功能特性主要指蛋白质的溶解性、起泡性、凝胶性和乳化性等食品加工和应用方面具有重要作用的物理化学性质。和小麦蛋白一样,青稞蛋白质的溶解度也受 pH 和温度影响。随着 pH 的增加,青稞蛋白的溶解度先降低后升高,在 45~55 ℃ 范围内,青稞蛋白的最高溶解度为 92.77%;当 pH 达到等电点时,溶解度、保留能力、乳化性和起泡性最差,但此时青稞蛋白的泡沫稳定性最强,同时,青稞蛋白的起泡性和泡沫稳定性与分子量成正相关<sup>[75]</sup>。研究表明,超声处理能够减小蛋白质粒径,从而显著提高溶解度和胶体稳定性,这种提升在碱性条件下尤其显著,并且当 pH 从碱性向中性转变时,青稞蛋白胶体稳定性显著提高,原因可能是在碱性环境中,青稞的部分蛋白质展开,随着 pH 变化,展开的蛋白质部分重新折叠,形成了更加稳定的特殊状态<sup>[78]</sup>。此外,盐的添加会使青稞蛋白的乳化性和起泡性变差,而添加蔗糖能够显著增强青稞蛋白的泡沫稳定性、乳化性和乳化稳定性,但会降低青稞蛋白的起泡性<sup>[75]</sup>。另外有研究表明<sup>[79]</sup>,当青稞蛋白质浓度为 14%,pH 超过 8 时,青稞蛋白开始形成凝胶,凝胶在 95 ℃ 加热 40 min 条件下硬度最大,且氯化钠、丙二醇或尿素的添加会影响凝胶强度和储能模量。

3.3 β-葡聚糖的加工与利用

青稞 β-葡聚糖相对分子量为 9×10<sup>3</sup>~12×10<sup>3</sup> Da,易形成凝胶,形成速度随质量分数的增加而加快。pH、蔗糖浓度及 Ca<sup>2+</sup>等的加入,会影响青稞 β-葡聚糖凝胶的质构特性<sup>[80-82]</sup>。在中性条件下,质量分数较高的青稞 β-葡聚糖所形成的凝胶具有优良的质构特性,添加蔗糖或 Ca<sup>2+</sup>可以显著增加或降低青稞 β-葡聚糖的凝胶强度。低浓度的青稞 β-葡聚糖水溶液表现出明显液态性质,三维网状结构的交联数较低;高浓度则表现出一定的固体性质,随着剪切速率的增加,其黏度相应降低,该特点令其具有较强的保湿能力,在膏霜及化妆水体系中均有广泛应用<sup>[83]</sup>。青稞 β-葡聚糖还能降低淀粉消化率<sup>[82]</sup>,随青稞 β-葡聚糖浓度的增加、分子质量的增大,其溶液黏度增加,对

表 4 以青稞为主要原料的保健食品

Table 4 Health food with hulless barley as the main raw material

| 序号 | 名称              | 主要原料                                 | 功效                   | 批准文号             |
|----|-----------------|--------------------------------------|----------------------|------------------|
| 1  | 奇正牌青稞膳食纤维水苏糖咀嚼片 | 青稞膳食纤维、水苏糖                           | 通便                   | 国食健注G20090032    |
| 2  | 奇正牌青稞紫苏油软胶囊     | —                                    | 辅助降血脂                | 国食健注G20100315    |
| 3  | 青之元牌青稞银杏叶胶囊     | —                                    | 辅助降血脂                | 国食健注G20100106    |
| 4  | 天知牌青稞红曲胶囊       | 青稞、葛根、决明子、山楂、红曲米                     | 辅助降血脂                | 国食健注G20140909    |
| 5  | 轻之®红曲植物甾醇酯八宝粥   | 红曲、植物甾醇酯、糯米、大麦仁、赤豆、黑米、花生仁、红芸豆、青稞、银耳等 | 辅助降血脂                | 国食健注G20130457    |
| 6  | 虫草青稞酒           | 青稞酒、虫草、藏红花                           | 调节体液免疫               | 卫食健字(1997)第548号  |
| 7  | 青稞鹿茸酒           | —                                    | 调节体液免疫               | 卫食健字(1997)第549号  |
| 8  | 奇正牌云山美良粉        | 青稞蛋白、大豆蛋白、乳清蛋白、乳酸锌                   | 增强免疫力                | 国食健字G20070424    |
| 9  | 英茂牌红景天胶囊        | 红景天、青稞粉                              | 提高缺氧耐受力、对辐射危害有辅助保护功能 | 国食健字G20060512    |
| 10 | 保生素片            | 低聚糖、螺旋藻、麦绿素                          | 延缓衰老、改善胃肠道功能         | 卫食健字(1997)第341号  |
| 11 | 大印象牌万康麦绿素片      | —                                    | 调节血脂、抗疲劳             | 卫食健字(1999)第137号  |
| 12 | 金巴开牌麦绿素片        | 大麦嫩叶                                 | 调节血脂、抗疲劳、抗氧化         | 卫食健字(1998)第250号  |
| 13 | 绿手指麦绿素片         | 大麦苗、麦芽糊精                             | 免疫调节、延缓衰老            | 卫食健字(2000)第0428号 |

$\alpha$ -淀粉酶活性的抑制效果越明显,青稞淀粉消化速率越慢。

$\beta$ -葡聚糖的提取主要采用碱提醇沉法,由于该法耗时长,提取率低,常用微波、超高压等作为辅助手段以缩短提取时间、提高提取率<sup>[47]</sup>。罗燕平等<sup>[84]</sup>采用微波辅助法提取 $\beta$ -葡聚糖,最佳工艺条件为:微波功率 800 W,处理时间 160 s, pH10.5,粉碎粒度 60 目,该条件下 $\beta$ -葡聚糖的得率为 5.92%。王谦等<sup>[85]</sup>采用超高压提取方法从青稞中提取 $\beta$ -葡聚糖,得出最佳工艺为压力 400 MPa、处理时间 4.5 min、固液比 1:10(g/mL)、溶液 pH10.5,该条件下 $\beta$ -葡聚糖得率为 3.72%。

### 3.4 多酚的加工与利用

多酚的抗氧化活性及抗肿瘤活性往往呈现出剂量依赖性,故多酚的加工利用很大程度上取决于提取率。不同干燥方式对青稞多酚提取率影响显著,在不同干燥方式中,微波干燥的多酚含量最高,但破坏了青稞的细胞结构,减少了其他成分的含量,冷冻干燥效果最佳,但受限于较高的成本难以适用于实际生产,热泵干燥既能较好地保留青稞的化学成分,又能减少对青稞物料的破坏,具有较高的应用价值<sup>[86]</sup>。另有研究表明,超微粉碎在一定程度上能够提高青稞麸皮中多酚含量、体外抗氧化活性及淀粉消化酶抑制率,可作为青稞麸皮食品的一种有效前处理加工手段<sup>[87]</sup>。此外,在青稞结合酚与结合黄酮的提取中,酸法提取含量高于碱法提取,因此,酸水解法更适合青稞结合态多酚及结合态黄酮的提取<sup>[88]</sup>。

## 4 青稞高附加值产品开发现状

青稞在食品方面的应用具有悠久的历史。糌粑,即青稞炒面,是藏族的传统主食,营养丰富,热量高,能够充饥御寒,携带方便,尤其适合游牧民族。以青稞酿造的青稞酒同样是藏区人民的传统饮品。随

着时代变迁以及食品加工技术的发展,目前以青稞为主要原料的食品品类繁多,如青稞麦片粥、米卷<sup>[89]</sup>、面包、鱼面<sup>[90]</sup>、脆片<sup>[91]</sup>、青稞格瓦斯<sup>[92]</sup>等。人们对青稞的认知度以及市场喜好度提升,也带动了青稞加工企业的蓬勃发展,以青海省为例,2020 年全省从事青稞加工企业 58 家,青稞加工产品包含 7 大类 30 多个品种,开发出 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -氨基丁酸、黄酮等高端保健产品,加工转化率达到 60%<sup>[93]</sup>。

除日常的大众食品外,青稞独特的功能效用也越来越受到保健食品行业的青睐。据统计,目前市面上现有以青稞或青稞提取物作为原料的保健食品有十余种,主要功效包含通便、降血脂、调节体液免疫、增强免疫力以及提高缺氧耐受力等(表 4)。

## 5 结语

我国拥有丰富的青稞种植资源,前期研究也证明青稞中丰富的营养成分及多种功能活性物质有着独特的保健功能,因此青稞具有良好的开发前景。然而为了青稞产业的持续发展,我们目前仍需关注以下几点:首先,进一步提高青稞的附加值、经济效益以及商品率,扩大青稞的接受度,大力开发青稞营养、保健、药用和工业等多种用途,向多品种、系列化、精深加工方向发展,满足多样化市场需求,最大限度地挖掘青稞的增值潜力。其次,虽然诸多现代化的加工技术已经在青稞的高值化利用中发挥重要作用,但是还需进一步研究这些加工方式对青稞营养成分影响的机制,才能充分发挥青稞的营养功能价值,促进青稞高附加值产品的开发与生产。

### 参考文献

- [1] 冯格格,余永新,洪思慧,等.青稞中主要功效成分最新研究进展[J].农产品质量与安全,2020(2):82-89. [FENG G G, YU Y X, HONG S H, et al. The latest reasearch progress of bioactive components in hulless barley[J]. Quality and Safety of Agro-Prod-

- ucts, 2020(2): 82–89. ]
- [ 2 ] 向月, 曹亚楠, 赵钢, 等. 杂粮营养功能与安全研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 362–370. [ XIANG Yue, CAO Yanan, ZHAO Gang, et al. Advances in the nutritional function and safety of coarse cereals[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 362–370. ]
- [ 3 ] 靳玉龙, 白婷, 朱明霞, 等. 西藏二棱青稞与六棱青稞品质差异分析[J]. 西藏农业科技, 2019, 41(S1): 84–87. [ JIN Yulong, BAI Ting, ZHU Mingxia, et al. Analysis of quality difference between two and six-rowed highland barley in Tibet[J]. Tibet Journal of Agricultural Sciences, 2019, 41(S1): 84–87. ]
- [ 4 ] 刘娟, 潘志芬, 李俏, 等. 糯青稞 08-1127 的品质特性[J]. 西藏农业科技, 2018, 40(S1): 3–6. [ LIU Juan, PAN Zhifen, LI Qiao, et al. Quality characteristics of waxy hull-less barley 08-1127[J]. Tibet Journal of Agricultural Sciences, 2018, 40(S1): 3–6. ]
- [ 5 ] 杨希娟, 党斌, 徐菲, 等. 不同粒色青稞酚类化合物含量与抗氧化活性的差异及评价[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 34–42. [ YANG Xijuan, DANG Bin, XU Fei, et al. Difference and evaluation of phenolics contents and antioxidant activity of colored hullless barley[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 34–42. ]
- [ 6 ] 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 Hui, LIU Peng, CHENG Peipei, 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. ]
- [ 7 ] 戎银秀. 青稞  $\beta$ -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 Yinxiu. The extraction and structural elucidation of highland barley  $\beta$ -glucan and the investigation of its antihyperlipidemic effects[D]. Suzhou: Soochow University, 2018. ]
- [ 8 ] 全海英, 王玉芬, 魏胜芳, 等. 高  $\beta$ -葡聚糖食品(青稞)对 2 型糖尿病糖代谢影响的研究[J]. 临床医药文献电子杂志, 2016, 3(57): 11288–11289. [ TONG Haiying, WANG Yufen, WEI Shengfang, et al. Study on the effect of high  $\beta$ -glucan food (highland barley) on glucose metabolism in type 2 diabetes[J]. Electronic Journal of Clinical Medical Literature, 2016, 3(57): 11288–11289. ]
- [ 9 ] 刘蓉. 两种功能性多糖对结肠炎及结肠癌的功效比较[D]. 广州: 暨南大学, 2018. [ LIU Rong. Comparative effects of two functional polysaccharides on colitis and colon cancer[D]. Guangzhou: Jinan University, 2018. ]
- [ 10 ] 鲍王璐. 整粒小麦制备全麦脆片及其营养成分变化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [ BAO Wanglu. Study on preparation of whole wheat crisps from whole wheat grains and changes of nutrients[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019. ]
- [ 11 ] 杨月欣. 中国食物成分表[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2018. [ YANG Yuexin. China food composition tables[M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2018. ]
- [ 12 ] ZHAO M, LIN Y, CHEN H. Improving nutritional quality of rice for human health[J]. Theoretical and Applied Genetics: International Journal of Plant Breeding Research, 2020, 133(5): 1397–1413. ]
- [ 13 ] 梁克红, 朱大洲, 孙君茂, 等. 有机小米与普通小米的营养物质比较[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(8): 127–130. [ LIANG K H, ZHU D Z, SUN J M, et al. Comparison of nutrients in organic millet and traditional millet[J]. Guizhou Agricultural Sciences 2016, 44(8): 127–130. ]
- [ 14 ] 吴立根, 屈凌波, 王岸娜, 等. 荞麦营养功能特性及相关食品开发研究进展[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(3): 41–44. [ WU L G, QU L B, WANG A N, et al. Research progress of functional characteristics of buckwheat and development of its products[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2018, 26(3): 41–44. ]
- [ 15 ] 崔蓉, 王艳萍. 藜麦及其他谷物的常规营养成分测定[J]. 现代食品, 2019(16): 111–113. [ CUI R, WANG Y P. Determination of conventional nutritional components of quinoa and other grains[J]. Modern Food, 2019(16): 111–113. ]
- [ 16 ] 申瑞玲, 张文杰, 董吉林, 等. 藜麦的营养成分、健康促进作用及其在食品工业中的应用[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(9): 150–155. [ SHEN R L, ZHANG W J, DONG J L, et al. Nutritional components, health-promoting effects of quinoa (*Chenopodium quinoa*) and its application in the food industry[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(9): 150–155. ]
- [ 17 ] 刘影, 董利. 燕麦的营养成分与保健作用[J]. 中国食物与营养, 2009(3): 55–57. [ LIU Y, DONG L. The nutritional composition and health function of oats[J]. Food and Nutrition in China, 2009(3): 55–57. ]
- [ 18 ] 赵波. 青稞适度加工稳定化关键技术及制品品质改良机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [ ZHAO B. Research on the key technology of hull-less barley moderate process and stabilization and mechanism for improvement of product quality[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. ]
- [ 19 ] 周红, 杨希娟, 张文刚, 等. 不同品种黑青稞籽粒营养品质的比较分析[C]. 中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集. 西安: 中国食品科学技术学会, 2020: 2. [ ZHOU H, YANG X J, ZHANG W G, et al. Comparison and analysis of the nutritional quality of different varieties of highland barley[C]. Abstracts of the 17th Annual Meeting of the Chinese Society for Food Science and Technology, Xi'an, Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020: 2. ]
- [ 20 ] 孟胜亚, 张文会, 于翠翠, 等. 西藏 12 个青稞品种(系)籽粒营养品质的比较分析[J]. 大麦与谷类科学, 2019, 36(6): 1–5. [ MENG S Y, ZHANG W H, YU C C, et al. Comparative analysis of nutritional qualities of the grains of 12 main varieties of Tibetan hull-less barley[J]. Barley and Cereal Sciences, 2019, 36(6): 1–5. ]
- [ 21 ] GUO T L, HORVATH C, CHEN L, et al. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley (Qingke): A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103: 109–117. ]
- [ 22 ] LIU K, ZHANG B J, CHEN L, et al. Hierarchical structure and physicochemical properties of highland barley starch following heat moisture treatment[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 102–108. ]
- [ 23 ] ENGLYST H N, CUMMINGS J H. Digestion of the polysac-

- charides of some cereal foods in the human small intestine[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1985, 42(5): 778-787.
- [24] GOURINENI V, STEWART M L, WILCOX M L, et al. Nutritional bar with potato-based resistant starch attenuated post-prandial glucose and insulin response in healthy adults[J]. *Foods*, 2020, 9(11).
- [25] 钟少文. 青稞粉消化性能的调控及其在面条应用的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. [ZHONG S W. Digestibility control of highland barley flour and its application to noodle processing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.]
- [26] 张蕾. 抗性淀粉对肥胖的干预效果和分子机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019. [ZHANG L. The efficacy and mechanism of resistant starch for obesity[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.]
- [27] ZHOU Z K, WANG F, REN X C, et al. Resistant starch manipulated hyperglycemia/hyperlipidemia and related genes expression in diabetic rats[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 75: 316-321.
- [28] SUN Y, YU K, ZHOU L, et al. Metabolomic and transcriptomic responses induced in the livers of pigs by the long-term intake of resistant starch[J]. *Journal of Animal Science*, 2016, 94(3): 1083-1094.
- [29] SI X, ZHOU Z K, STRAPPE P, et al. A comparison of RS4-type resistant starch to RS2-type resistant starch in suppressing oxidative stress in high-fat-diet-induced obese rats[J]. *Food & Function*, 2017, 8(1): 232-240.
- [30] LEE K Y, LEE H G. Comparative effects of slowly digestible and resistant starch from rice in high-fat diet-induced obese mice[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2016, 25(5): 1443-1448.
- [31] XIE C, LI Y J, LI J L, et al. Dietary starch types affect liver nutrient metabolism of finishing pigs[J]. *British Journal of Nutrition*, 2017, 118(5): 353-359.
- [32] 罗斌, 陈代文, 余冰. 抗性淀粉对动物脂质代谢的影响及其机制研究[J]. *饲料工业*, 2019, 40(10): 6-12. [LUO B, CEHN D W, YU B. Effects of resistant starch on lipid metabolism and its mechanism in animals[J]. *Feed Industry*, 2019, 40(10): 6-12.]
- [33] 徐菲, 党斌, 杨希娟, 等. 不同青稞品种的营养品质评价[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(9): 1249-1257. [XU F, DANG B, YAGN X J, et al. Evaluation of nutritional quality of different hulless barleys[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(9): 1249-1257.]
- [34] 侯殿志, 沈群. 我国29种青稞的营养及功能组分分析[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(2): 289-298. [HOU D Z, SHEN Q. Analysis of nutrition and functional components of 29 kinds of highland barley in China[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(2): 289-298.]
- [35] 王建林, 钟志明, 冯西博, 等. 青藏高原青稞蛋白质含量空间分异规律及其与环境因子的关系[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(6): 969-981. [WANG J L, ZHONG Z M, FENG X B, et al. Spatial distribution regulation of protein content of naked barley varieties and its relationships with environmental factors in Qinghai Tibet Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(6): 969-981.]
- [36] 翟会生, 李俏, 张玉红, 等. 72份青稞氨基酸组成与营养价值评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(1): 121-129. [ZHAI H S, LI Q, ZHANG Y H, et al. Valuation of the amino acids composition and nutrition value of 72 hulless barley[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(1): 121-129.]
- [37] YU G Y, WANG F, ZHANG B L, et al. *In vitro* inhibition of platelet aggregation by peptides derived from oat (*Avena sativa* L.), highland barley (*Hordeum vulgare* Linn. var. *nudum* Hook. f.), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) proteins[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 577-586.
- [38] 刘立品. 青稞蛋白质结构与功能特性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. [LIU L P. The studies on structural and functional properties of the hulless barley protein[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.]
- [39] JEONG H J, JEONG J B, HSIEH C C, et al. Lunasin is prevalent in barley and is bioavailable and bioactive in *in vivo* and *in vitro* studies[J]. *Nutrition and Cancer-an International Journal*, 2010, 62(8): 1113-1119.
- [40] HERNANDEZ-LEDESMA B, HSIEH C C, DE LUMEN B O. Lunasin, a novel seed peptide for cancer prevention[J]. *Peptides*, 2009, 30(2): 426-430.
- [41] QIAN J W, JIANG S P, SU W T, et al. Characteristics of oil from hulless barley (*Hordeum vulgare* L.) bran from Tibet[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2009, 86(12): 1175-1179.
- [42] 刘宇杰, 陈银焕, 杨修仕, 等. 小米营养及功能成分研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(5): 1-3. [LIU Y J, CHEN Y H, YANG X S, et al. Research progress on nutrition and functional components of millet[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(5): 1-3.]
- [43] 马尹鹏. 不同地区小麦、大麦主要营养成分差异比较及黄羽肉鸡对其代谢率研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016. [MA Y P. Difference comparison of primary nutrients and metabolic rate research of wheat and barley in yellow feather broilers[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.]
- [44] 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 hulless barley bran oil and its effect on lipid metabolism in hyperlipidemia rats[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2009, 28(5): 739-742.]
- [45] 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.]
- [46] 朱颖秋, 蒋思萍, 包善飞, 等. 超临界CO<sub>2</sub>萃取青稞麸皮油对高血脂症大鼠降脂作用研究[J]. *四川动物*, 2013, 32(2): 272-275. [ZHU Y Q, JIANG S P, BAO S F, et al. Lipid-lowering effects of supercritical CO<sub>2</sub> extraction hulless barley bran oil on the hyperlipidemia rats[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2013, 32(2):

272-275.]

[47] 陈晨,何蒙蒙,吴泽蓉,等.青稞 $\beta$ -葡聚糖的研究现状与展望[J].中国食品添加剂,2020,31(2):172-177. [CHEN C, HE M M, WU Z R, et al. Research status and prospect of highland barley beta-glucan[J]. China Food Additives, 2020, 31(2): 172-177.]

[48] 高庆超,束彤,常应九,等.改性青稞 $\beta$ -葡聚糖负载黑枸杞花青素微胶囊溶液抗疲劳功能的评价[J].食品科技,2019,44(01):316-320. [GAO Q C, SHU T, CHANG Y J, et al. The evaluation of anti-fatigue function of the solution of microencapsulation loading anthocyanidins of *Lycium ruthenicum* Murr by modified  $\beta$ -glucan from highland barley[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(01): 316-320.]

[49] 刘小娇,王姗姗,白婷,等.青稞营养及其制品研究进展[J].粮食与食品工业,2019,26(1):43-47. [LIU X J, WANG S S, BAI T, et al. Advance of hull-less barley nutrition and its product[J]. Cereal & Food Industry, 2019, 26(1): 43-47.]

[50] 赵萌萌,党斌,张文刚,等.青稞米分层碾磨中各层粉体的营养及功能成分的分布差异比较[J].食品科学技术学报,2021:1-10. [ZHAO M M, DANG B, ZHANG W G, et al. Comparison of nutrient and functional components distribution in different layers of barley rice stratified milling[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021: 1-10.]

[51] LIU Z H, LI B. Procyandin B1 and p-Coumaric Acid from highland barley grain showed synergistic effect on modulating glucose metabolism via IRS-1/PI3K/Akt pathway[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2021: 65.

[52] ROLEIRA F M F, TAVARES-DA-SILVA E J, VARELA C L, et al. Plant derived and dietary phenolic antioxidants: Anticancer properties[J]. Food Chemistry, 2015, 183: 235-258.

[53] 朱勇.青稞酚类化合物组成与抗氧化、抗肿瘤细胞增殖活性研究[D].广州:华南理工大学,2017. [ZHU Y. Phenolic Compound profile, antioxidant and antiproliferative activities of highland barley[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.]

[54] HAN L R, MENG M, GUO M Z, et al. Immunomodulatory activity of a water-soluble polysaccharide obtained from highland barley on immunosuppressive mice models[J]. Food & Function, 2019, 10(1): 304-314.

[55] CHENG D, ZHANG X Y, MENG M, et al. Inhibitory effect on HT-29 colon cancer cells of a water-soluble polysaccharide obtained from highland barley[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 88-95.

[56] 秘迎君.中国九省成人超重、肥胖的患病率及其与全死因死亡风险的关联研究[D].石家庄:河北医科大学,2017. [MI Y J. Trends in the prevalence of overweight and obesity as well as the relation in the risk of all-cause mortality[D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2017.]

[57] 熊荣君,张红霞,陈瑾.青稞降血脂、减肥的临床观察[J].中国西部科技,2005(7):45. [XIONG M J, ZHANG H X, CHEN J. Clinical observation of highland barley for lowering blood lipid and weight loss[J]. Science and Technology of West China,

2005(7):45.]

[58] 龚凌霄.青稞全谷物及其防治代谢综合征的作用研究[D].杭州:浙江大学,2013. [GONG L X. Studies on whole grain of Tibetan hull-less barley and its effect on metabolic syndrome[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.]

[59] GUO H, LIN S, LU M, et al. Characterization, invitro binding properties, and inhibitory activity on pancreatic lipase of beta-glucans from different Qingke (Tibetan hullless barley) cultivars[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 2517-2522.

[60] 毕铭鑫,牛玉存,李雪,等.青稞麦片对空腹血糖受损患者糖脂代谢的影响[J].卫生研究,2013,42(5):719-723,782. [BI M X, NIU Y C, LI X, et al. Effects of barley flake on metabolism of glucose and lipids in the patients with impaired fasting glucose[J]. Journal of Hygiene Research, 2013, 42(5): 719-723,782.]

[61] 任欣,方圆,张一,等.粪菌移植:肠道菌群在青稞改善血糖代谢中的作用[C].中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集.西安:中国食品科学技术学会,2020:2. [REN X, FANG Y, ZHANG Y, et al. Fecal microbiota transplantation: the role of gut microbiota in improving blood glucose metabolism of Qingke barley[C]. Abstracts of the 17th Annual Meeting of the Chinese Society for Food Science and Technology, Xian, Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020: 2.]

[62] 夏雪娟.青稞全谷粉对高脂膳食大鼠胆固醇肝肠代谢的影响机制研究[D].重庆:西南大学,2018. [XIA X J. Effects of whole-grain Qingke (Tibetan *Hordeum vulgare* L. Zangqing 320) on cholesterol metabolism in the liver and intestine of rats under high-fat diet and the involved mechanisms[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.]

[63] 曹承嘉.青稞抗性淀粉的制备及其对酒精性胃损伤的保护作用研究[D].上海:华东理工大学,2020. [CAO C J. Preparation of barley resistance starch and its protective effect on alcohol-induced gastric injury[D]. Shanghai: East Chian University of Science and Technology, 2020.]

[64] 刘婷婷,邢青斌,程家丽,等.青稞中氨基酸含量的测定分析及评价[J].卫生研究,2019,48(2):284-288. [LIU T T, XING Q B, CHENG J L, et al. Determination of amino acids in hullless barley[J]. Journal of Hygiene Research, 2019, 48(2): 284-288.]

[65] 李悦,刘雪梅,胡古月.青稞麸皮油联合有氧运动对高脂饮食大鼠动脉硬化脂代谢的影响[J].中国粮油学报,2020,35(11):93-97. [LI Y, LIU X M, HU G Y. Effect of highland barley bran oil combined with aerobic exercise on lipid metabolism in atherosclerotic rats fed with high fat diet[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(11): 93-97.]

[66] 任欣,孙沛然,闫淑琴,等.5种青稞淀粉的理化性质比较[J].中国食品学报,2016,16(7):268-275. [REN X, SUN P R, YAN S Q, et al. Comparison of physical and chemical properties of five highland barley starches[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(7): 268-275.]

[67] 闵晶晶,陈昕钰,王磊磊,等.四种元麦淀粉粒形态结构与理化性质的比较[J].中国粮油学报,2020,35(2):42-49. [MIN J J,

- CHEN X Y, WANG L L, et al. Morphological structures and physicochemical properties of starch grain in four varieties of naked barleys[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(2): 42-49. ]
- [ 68 ] 刘娣, 杨梦恬, 沈淑民, 等. 青稞淀粉大中小颗粒淀粉的分级及颗粒糊化特性的相关性研究[J]. *农产品加工*, 2017(19): 16-18. [ LIU D, YANG M T, SHEN S M, et al. Study on correlation between separating and granule pasting properties of granule starch in hull-less barley starch[J]. *Farm Products Processing*, 2017(19): 16-18. ]
- [ 69 ] ROCHA-VILLARREAL V, SERNA-SALDIVAR S O, GARCIA-LARA S. Effects of parboiling and other hydrothermal treatments on the physical, functional, and nutritional properties of rice and other cereals[J]. *Cereal Chemistry*, 2018, 95(1): 79-91.
- [ 70 ] ZHU Y D, WANG Z Y, WANG Y, et al. Effect on parboiling processing on structure and thermal properties of highland barley flours[J]. *Powder Technology*, 2020, 364: 145-151.
- [ 71 ] 吕元娣, 常雅宁, 戴伟, 等. 青稞淀粉的糊化特性及凝胶性能[J]. *食品与机械*, 2016, 32(3): 33-38. [ LV Y D, CHANG Y N, DAI W, et al. Pasting and gel properties of hulless barley starch[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(3): 33-38. ]
- [ 72 ] LEE S K, MUN S H. Effect of heating conditions on the resistant starch formation[J]. *Agricultural Chemistry & Biotechnology*, 1997, 40(3): 220-224.
- [ 73 ] 张根生, 孙静, 岳晓霞, 等. 马铃薯淀粉的物化性质研究[J]. *食品与机械*, 2010, 26(5): 22-25. [ ZHANG G S, SUN J, YUE X X, et al. Study on physicochemical characteristics of potato starch[J]. *Food & Machinery*, 2010, 26(5): 22-25. ]
- [ 74 ] 吴桂玲, 刘立品, 李文浩, 等. 碱溶酸沉法提取青稞蛋白质的工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(5): 19-24. [ WU G L, LIU L P, LI W H, et al. Research on technology for extraction of highland barley protein by alkaline extraction and acid precipitation method[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(5): 19-24. ]
- [ 75 ] 杨希娟, 党斌, 吴昆仑, 等. 青稞蛋白的超声波辅助提取工艺及其功能特性研究[J]. *中国食品学报*, 2013, 13(6): 48-56. [ YANG X J, DANG B, WU K L, et al. Study on functional properties and hulless barley protein by ultrasonic-assisted extraction[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2013, 13(6): 48-56. ]
- [ 76 ] 霍金杰, 肖志刚, 王娜, 等. 青稞蛋白质的微波辅助提取工艺及性质研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(21): 145-153. [ HUO J J, XIAO Z G, WANG N, et al. Study on the microwave-assisted extraction technology and properties of barley protein[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(21): 145-153. ]
- [ 77 ] 李涛. 青稞蛋白质的提取及其特性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2010. [ LI T. The studies on extraction and properties of hulless barley protein[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2010. ]
- [ 78 ] SILVENTOINEN P, SOZER N. Impact of ultrasound treatment and pH-shifting on physicochemical properties of protein-enriched barley fraction and barley protein isolate[J]. *Foods*, 2020, 9(8). DOI:10.3390/foods9081055.
- [ 79 ] 武菁菁, 李鑫磊, 张艺, 等. 青稞蛋白质凝胶特性的研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(16): 131-135. [ WU J J, LI X L, ZHANG Y, et al. Study on gelation properties of highland barley protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(16): 131-135. ]
- [ 80 ] 申瑞玲, 曹高山, 常广双, 等. 青稞 $\beta$ -葡聚糖凝胶形成及其特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(7): 55-58, 80. [ SHEN R L, CAO G S, CHANG G S, et al. Gel formation and gel property of highland barley  $\beta$ -glucans[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2009, 24(7): 55-58, 80. ]
- [ 81 ] 邵舒, 申瑞玲, 孙永敢. 青稞 $\beta$ -葡聚糖凝胶热特性、动态粘弹性及微观结构研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(3): 54-57. [ SHAO S, SHEN R L, SUN Y G. Study on the thermal property, dynamic viscoelasticity and microstructure of hulless barley  $\beta$ -glucan gel[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(3): 54-57. ]
- [ 82 ] 邓婧, 马小涵, 赵天天, 等. 青稞 $\beta$ -葡聚糖对淀粉体外消化性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(10): 106-111. [ DENG J, MA X H, ZHAO T T, et al. Effect of highland barley  $\beta$ -glucan on starch digestibility *in vitro*[J]. *Food Science*, 2018, 39(10): 106-111. ]
- [ 83 ] 董磊. 青稞 $\beta$ -葡聚糖理化性质、流变性质以及在化妆品中的应用[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2015. [ DONG L. The physicochemical and rheological property of barley  $\beta$ -glucan and its application in cosmetic[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2015. ]
- [ 84 ] 罗燕平, 李家林, 张雪飞. 微波辅助提取青稞 $\beta$ -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  $\beta$ -glucan from barleys[J]. *Farm Products Processing*, 2016(14): 35-38. ]
- [ 85 ] 王谦, 董海丽. 超高压提取青稞 $\beta$ -葡聚糖工艺优化[J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(5): 79-81. [ WANG Q, DONG H L. Optimization of  $\beta$ -glucan extraction from barleys by ultra high pressure method[J]. *Cereals & Oils*, 2016, 29(5): 79-81. ]
- [ 86 ] 廖超, 谢勇, 覃小丽, 等. 不同干燥方式对发芽青稞活性成分的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(21): 139-146. [ LIAO C, XIE Y, QIN X L, et al. Effect of different drying methods on the bioactive components of germinated highland barley[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(21): 139-146. ]
- [ 87 ] 赵萌萌, 杨希娟, 党斌, 等. 超微粉碎对青稞麸皮多酚、体外抗氧化及淀粉消化酶活性的影响[C]//中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集[A]. 西安: 中国食品科学技术学会, 2020: 2. [ ZHAO M M, YANG X J, DANG B, et al. Effects of ultrafine grinding on polyphenols, antioxidant activity and digestive enzyme activity of starch in barley bran[C]//Abstracts of the 17th Annual Meeting of the Chinese Society for Food Science and Technology [A]. Xi'an: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020: 2. ]
- [ 88 ] 杨希娟, 党斌, 樊明涛. 溶剂提取对青稞中不同形态多酚组成及抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(24): 239-248.

- [ YANG X J, DANG B, FAN M T. Effect of different extraction solvents on phenolic profiles and antioxidant activities of hulless barley[J]. *Food Science*, 2018, 39(24): 239–248. ]
- [ 89 ] 祝东品, 吕庆云, 周梦舟, 等. 低脂青稞膨化米卷加工工艺及其品质[J]. *食品工业*, 2020, 41(3): 115–121. [ ZHU D P, LV Q Y, ZHOU M Z, et al. Process technology and its quality of low-fat highland barley rice roll[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(3): 115–121. ]
- [ 90 ] 何江红, 丁捷, 黄益前, 等. 响应面法优化速冻青稞鱼面鱼糜加工工艺[J]. *美食研究*, 2017, 34(4): 42–47. [ HE J H, DING J, HUANG Y Q, et al. Using response surface methodology to optimize processing technology of surimi for quick-frozen highland barley fish noodles[J]. *Journal of Researches on Dietetic Science and Culture*, 2017, 34(4): 42–47. ]
- [ 91 ] 何伟. 青稞全粉营养成分分析及青稞脆片制备工艺优化[J]. *食品与机械*, 2020, 36(7): 201–205. [ HE W. Nutritive composition analysis of highland barley flour and optimization of processing parameters for highland barley chips[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(7): 201–205. ]
- [ 92 ] 潘云峰, 张楷正, 伍文驰, 等. 青稞-绿豆格瓦斯的制备及其抗氧化活性研究[J]. *四川理工学院学报(自然科学版)*, 2019, 32(2): 14–22. [ PAN Y F, ZHANG K Z, WU W C, et al. Study on preparation and antioxidant activity of hullessbarley-mung beans kvass[J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)*, 2019, 32(2): 14–22. ]
- [ 93 ] 央广网. 青海青稞区域公用品牌正式发布 推动青海青稞产业加快发展 [EB/OL].(2020-12-10)[2021.11.23]. [http://news.cnr.cn/native/city/20201210/t20201210\\_525358889.shtml](http://news.cnr.cn/native/city/20201210/t20201210_525358889.shtml). [ CHINA National Radio. Qinghai highland barley regional public brand officially released to promote the accelerated development of Qinghai highland barley industry[EB/OL].(2020-12-10)[2021-11-23]. [http://news.cnr.cn/native/city/20201210/t20201210\\_525358889.shtml](http://news.cnr.cn/native/city/20201210/t20201210_525358889.shtml). ]