

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240918004

青稞活性成分与功能作用研究进展

扎西穷达¹, 巴桑琼达², 次仁卓嘎¹, 普巴扎西¹, 尼 珍^{1*}

(1. 西藏自治区食品药品检验研究院, 西藏自治区功能食品与食品质量安全重点实验室, 拉萨 850000;
2. 日喀则市市场监督管理局质量计量特种设备监督检验检测所, 日喀则 857000)

摘 要: 青稞是广泛种植于青藏高原以及甘肃、云南和四川等地的高海拔藏区的谷类作物, 含有淀粉、蛋白质、氨基酸、脂肪、膳食纤维、维生素及微量元素等营养物质, 是藏族人民赖以生存、补充营养、维持健康的主要农作物。同时, 青稞还含有 β -葡聚糖、酚酸类化合物、黄酮类化合物和 γ -氨基丁酸等活性成分, 具有抗氧化、降血脂、降血糖、对胃肠道的调节及耐缺氧抗疲劳等功能作用, 近年来青稞因其丰富的活性成分和独特的功能作用等健康功能食品属性而受到越来越多的关注。本文从青稞的活性成分、功能作用及作用机制等 3 个方面综述青稞近年来主要研究进展, 并从基础研究、科技投入、精深加工、挖掘功能因子等方面展望了青稞产业发展前景, 以便对青稞的研究应用和产业的高质量发展提供参考依据。

关键词: 青稞; 活性成分; 功能作用; 作用机制

Research progress on the active ingredients and functional effects of *Hordeum vulgare* Linn.

ZHA Xi-Qiong-Da¹, BA Sang-Qiong-Da², CI Ren-Zhuo-Ga¹, PU Ba-Zha-Xi¹, NI Zhen^{1*}

(1. Xizang Institute for Food and Drug Control, Xizang Key Laboratory of Functional Food and Food Quality and Safety, Lhasa 850000, China; 2. Quality, Metrology and Special Equipment Supervision, Inspection and Testing Institute of Shigatse Municipal Market Supervision Administration, Shigatse 857000, China)

ABSTRACT: *Hordeum vulgare* Linn. is a cereal crop widely planted in the Qinghai-Tibet Plateau and the high-altitude Tibetan regions in Gansu, Yunnan, and Sichuan. It contains essential nutrients such as starch, protein, amino acids, fats, dietary fiber, vitamins, and trace elements, this crop serves as a primary source of sustenance for the Tibetan people, providing vital nutrition and supporting overall health. *Hordeum vulgare* Linn. contains active components such as β -glucan, phenolic acids, flavonoids, and γ -aminobutyric acid, these compounds exhibit various functional properties, including antioxidant effects, lipid-lowering, blood glucose-lowering, gastrointestinal regulation, and enhanced resistance to hypoxia and fatigue. In recent years, *Hordeum vulgare* Linn. has garnered widespread attention as a functional health food due to its rich array of bioactive compounds and unique functional properties. This article reviewed the research progress of *Hordeum vulgare* Linn. in recent years from 3 aspects: Active ingredients, functional effects, and mechanisms of action. The prospects for the development of the *Hordeum vulgare* Linn. industry had been envisioned from various aspects, including fundamental research, technological

基金项目: 西藏自治区科技计划项目(QYXTZX-RKZ2024-04-1)

Fund: Supported by the Xizang Autonomous Region Science and Technology Plan Project (QYXTZX-RKZ2024-04-1)

*通信作者: 尼珍, 硕士, 主任药师, 主要研究方向为食品药品质量控制与评价。E-mail: nizhen1221@163.com

*Corresponding author: NI Zhen, Master, Chief Pharmacist, Xizang Institute for Food and Drug Control, No.27, North Ring Road, Lhasa 850000, China. E-mail: nizhen1221@163.com

investment, deep processing, and the exploration of functional factors. This aims to provide a reference basis for the research applications and high-quality development of *Hordeum vulgare* Linn. industry.

KEY WORDS: *Hordeum vulgare* Linn.; active ingredients; functional effects; action mechanisms

0 引言

青稞(*Hordeum vulgare* Linn.)在藏语中称为“乃”, 属禾本科小麦族大麦属一年生作物, 分二棱、四棱和六棱, 是大麦的一种变种, 抗旱、抗寒、喜凉^[1], 因其籽粒内外稃与颖果分离, 籽粒裸露, 又称为裸大麦, 米麦、元麦、淮麦等^[2], 青藏高原地区称其为青稞。作为一种重要的高原谷类作物, 青稞主要产于西藏、青海、甘肃、云南和四川等地, 富含人体所需的淀粉、蛋白质、氨基酸、膳食纤维、维生素及微量元素等各种营养物质^[3-5], 符合健康膳食结构的三高两低特点, 是藏族人民补充营养、维持身体健康的主要食物。

近年来, 随着生活节奏越来越快和不良生活习惯的影响, 代谢性疾病发生率越来越高, 严重影响着人们的健康及生活质量, 同时, 随着各类科普宣传不断加强, 人们的健康素养也在不断提升, 对健康食品的研究和需求也日益增长, 青稞的营养素结构符合现代人健康需求, 富含人体有益的活性成分酚酸类化合物、黄酮类化合物、 β -葡聚糖和 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)等, 具有降血脂、降胆固醇、降血糖、抗氧化、抗疲劳、耐缺氧及对胃肠道调节等功能。本文从青稞的活性成分、功能作用和作用机制 3 个方面归纳整理青稞近年来的主要研究进展, 以便对青稞产业发展、高值利用等方面提供参考。

1 活性成分

1.1 β -葡聚糖

青稞被认为是世界上 β -葡聚糖含量最高的麦类作物^[6], 青稞 β -葡聚糖是青稞籽粒胚乳细胞壁的主要成分, 其化学名称为(1,3)(1,4)- β -D-葡聚糖, 具有一定的亲水性, 且具有高黏性、易成凝胶等特性^[7], β -葡聚糖具有降低胆固醇、提高免疫力、调控血糖和调节胃肠道健康等 4 大功能^[8]。研究发现裸大麦籽粒 β -葡聚糖含量高于皮大麦, 目前青稞品种中藏青 25 的 β -葡聚糖含量(8.62%)最高^[9]。李健^[10]测定了选自青稞主产区的 203 份青稞种质资源的 β -葡聚糖含量, 含量高于 6.00% 的青稞种质 4 份, 其中西藏 3 份, 不同区域青稞种质资源的 β -葡聚糖含量间不存在显著差异, 西藏、青海、四川、甘肃的平均含量分别为 5.23%、5.07%、5.05% 和 5.21%。 β -葡聚糖含量成因分析结果表明, 在胚乳发育中期, 非糯、糯质青稞种质 *HvCsIF6* 基因表达丰度与成熟籽粒 β -葡聚糖含量分别呈极显著正相关, 直链淀粉占比与 β -葡聚糖含量呈极显著负相关, 即“在胚乳发育中期 *HvCsIF6*

基因高表达”和“糯质”是导致青稞种质高 β -葡聚糖含量的重要因素, 且二者存在叠加效应。影响青藏高原栽培大麦 β -葡聚糖含量的首要因素是基因型, 其次是气候因素和土壤因素, 是 3 者共同作用的结果, 在糯质青稞中, 通过控制糯质性状的基因, 影响了食用纤维的合成, 使之合成了较多的 β -葡聚糖^[11]。另外, 受基因的补偿调控影响, β -葡聚糖含量在青稞高赖氨酸突变体 1ys5 等位基因作用下, 通过较高的 β -葡聚糖含量(高至 20%)补偿较低的淀粉含量(低至 30%), 使之总纤维素和多糖的含量稳定在 50%~55%^[12]。

1.2 多酚类物质

多酚类物质是广泛存在于自然界植物中的活性物质, 至今已发现多酚类物质 8000 多种^[13], 目前还没有统一的分类体系。根据化学结构分类, 多酚化合物可分为 5 类, 酚酸和黄酮是其中重要的两类^[14]。多酚类物质含有能抗氧化、抗癌、抑菌、降脂降糖以及保护心脑血管健康等的天然活性成分^[15-17]。青稞中含有花青素、黄酮和酚酸等丰富的多酚类化合物, 这些化合物大部分以游离态和结合态的形式富集在麸皮及胚芽等部位, 青稞中多酚类化合物的活性物质及功能作用与青稞种类、颜色及生长环境有关^[18]。黑青稞中总酚、总黄酮、总原花青素、总花青素的平均含量最高, 分别为(4.37 $\pm$ 0.04) mg 没食子酸当量/g 干重、(2.86 $\pm$ 0.11) mg 芦丁当量/g 干重、(2.54 $\pm$ 0.08) mg 儿茶素当量/g 干重、(9.55 $\pm$ 0.28) mg 矢车菊素-3-葡萄糖苷/100 g 干重, 其次是蓝青稞, 白青稞最低^[19]。YANG 等^[20]测得 12 种蓝青稞籽粒中游离酚酸含量 166.20~237.60 mg 没食子酸当量/100 g 干重、结合酚酸含量 170.10~240.75 mg 没食子酸当量/100 g 干重、总酚酸含量 336.29~453.94 mg 没食子酸当量/100 g 干重, 游离酚酸占总酚酸的 50.09%, 结合酚酸占总酚酸的 49.91%; 游离黄酮含量 20.61~25.59 mg 儿茶素当量/100 g 干重、结合黄酮含量 14.91~22.38 mg 儿茶素当量/100 g 干重、总黄酮含量 37.91~47.98 mg 儿茶素当量/100 g 干重, 游离黄酮占总黄酮的 55.90%, 结合黄酮占总黄酮的 44.10%, 蓝青稞中主要的酚类化合物是没食子酸、苯甲酸、丁香酸、4-香豆酸、柚皮素、橙皮苷、芦丁、儿茶素和槲皮素。阿魏酸和对香豆酸为黑青稞中主要的酚酸^[21]。不同的加工方式影响青稞中酚类物质的含量, 除炒制外, 其他热加工方式使青稞中游离多酚和游离黄酮的含量均显著降低, 蒸制和煮制方式对青稞游离多酚含量的损失高达 43.77% 和 67.85%, 这可能是由于部分可溶性游离多酚在加工过程中溶解于水中, 或由于长时间的热处理导致部分多酚被氧化, 因而游离多酚含量有所降低; 与未加工相比, 炒制、微波

和烤制处理后所得结合多酚含量分别提高 33.89%、33.73%、31.45%，可能是由于加工过程中青稞中蛋白质、纤维素的结构变化导致结合多酚的释放，且热处理时间短、温度高的加工条件更有利于多酚的保留和释放^[22]。研究发现随着萌发时间的延长，青稞中酚类物质的含量先减少后增多，其原因可能是萌动初期多酚氧化酶的活性较高，后期活性降低^[23]。

1.3 γ -氨基丁酸

GABA 分子式为 $C_4H_9NO_2$ ，GABA 作为抑制性神经递质发挥重要生理功效，具有改善大脑记忆、预防肥胖症和维持肠胃健康的功能，对焦虑、抑郁、失眠症等具有缓解作用^[24]。青藏高原地区青稞农家品种和育成品种中 GABA 含量分别为 (19.00 ± 5.90) mg/100 g 和 (18.8 ± 4.26) mg/100 g，均显著高于引进品种 (13.41 ± 5.01) mg/100 g，GABA 含量和籽粒颜色存在显著相关性，深色籽粒 GABA 含量高于浅色籽粒，紫色籽粒含量最高为 (19.62 ± 5.88) mg/100 g，黄白色籽粒含量最低为 (12.99 ± 4.87) mg/100 g^[25]。萌发可以提高青稞中 GABA 的含量，尤其在萌发中期增幅明显，萌发使青稞中 GABA 含量增加可能是因为萌发过程中蛋白质的水解形成了一定量的谷氨酸，生成的谷氨酸为谷氨酸脱羧酶提供了充足的底物，而谷氨酸脱羧酶作为 GABA 积累的关键酶，可将谷氨酸转化为 GABA^[26]。

2 功能作用

2.1 抗氧化作用

青稞具有较强的抗氧化作用，酚类化合物和 β -葡聚糖是其抗氧化的主要贡献者。朱勇^[18]评价了肚里黄、黑青稞、藏青 25 和藏青 320 4 个青稞品种的抗氧化活性，结果表明：青稞的酶提取液和化学提取物都表现出抗氧化活性，酶提取液中的多酚含量和抗氧化活性高于对应的化学提取物，且青稞提取物对人结肠癌细胞(Caco-2)、人肝癌细胞(HepG2)和人乳腺癌细胞(MDA-MB-231)均表现出抗增殖活性。黑青稞麸皮中分离纯化得到的活性物质柯伊利素和柯伊利素-7-O-葡萄糖醛酸均具有良好的体外抗氧化能力，二者清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, DPPH)自由基能力的半数抑制浓度(half-maximal inhibitory concentration, IC_{50})分别为 1.44 mg/mL、2.07 mg/mL，清除 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS]阳离子自由基能力的 IC_{50} 分别为 0.59 mg/mL、0.62 mg/mL^[27]。紫青稞麸皮提取物通过维持细胞活力、恢复细胞形态及抑制乳酸脱氢酶渗漏对氯化钴诱导的 PC12 细胞缺氧损伤表现出高抗氧化活性和潜在的神经保护作用^[28]。青海玉树囊谦黑青稞花青素抗氧化性显著优于维生素 C (vitamin C, VC)，DPPH 自由基清除能力是

VC 的 33.76 倍、ABTS 阳离子自由基清除能力是 VC 的 8.03 倍、总抗氧化能力是 VC 的 41.44 倍^[29]。蓝青稞籽粒酚类提取物相关性分析表明，2,4-羟基苯甲酸与原儿茶酸是影响游离酚提取物 DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基清除能力的主要因素，绿原酸、香草酸、阿魏酸和槲皮素是影响结合酚提取物自由基清除能力的主要因素^[20]。另外，萌发可以提高青稞籽粒的抗氧化活性，与未萌发相比，白色、黑色和蓝色 3 种青稞经萌发预处理后，清除 DPPH 自由基能力的 IC_{50} 分别降低了 52.9%、80.6%和 49.4%^[30]。

2.2 降血脂作用

青稞具有降血脂以及辅助降血脂的作用，且降血脂作用与青稞 β -葡聚糖的活性密切相关。多项研究表明，青稞 β -葡聚糖可以有效降低实验小鼠的总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglycerides, TG)及低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)水平，适当增加高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)水平，青稞 β -葡聚糖还具备良好的体外胆酸结合能力，且青稞 β -葡聚糖浓度与胆酸结合率存在良好的剂量依赖关系^[31-32]。在人体试食实验中，血脂偏高者连续服用 3 个月青稞 β -葡聚糖胶囊后，TC 下降 25%、TG 下降 138%^[9]，106 名高脂血症者连续服用青稞提取物 45 d 后，TC 和 TG 水平明显下降，下降率分别为 10.64%和 16.65%，HDL-C 水平升高 0.11 mmol/L^[33]，表明青稞 β -葡聚糖及青稞提取物对高脂血症人群具有辅助降血脂作用。不同颜色青稞品种 β -葡聚糖的胰脂肪酶抑制特性及脂肪、胆固醇、胆酸结合能力研究结果表明，青稞 β -葡聚糖具有较强的胰脂肪酶抑制作用，且有色青稞的抑制作用强于白色青稞^[34]。青稞酒糟中的可溶性膳食纤维能够降低 Caco-2 细胞中胆固醇吸收和合成相关基因的转录水平，其降胆固醇作用可能与它的抗氧化活性相关^[35]。

2.3 降血糖作用

青稞因其丰富的 β -葡聚糖含量，具有良好的血糖调控作用，被誉为营养结构健康的低血糖生成指数食品。刘佳慈^[36]使用碱提、酶解、硫酸铵沉淀和分级醇沉的方法所制备的青稞 β -葡聚糖干预 4 周后，抑制了 II 型糖尿病小鼠体重的增加，并且能够改善小鼠的血脂代谢异常、高血糖和胰岛素抵抗的情况。使用黄青稞粉、蓝青稞粉、黑青稞粉及其相应炒制粉对糖尿病模型小鼠灌胃 2 周后，小鼠的消瘦症状得到改善，持续消瘦的趋势得到遏制，体重显著增加，血糖明显降低，尤其以蓝青稞炒制粉的作用最为显著，青稞粉及其炒制粉并未对小鼠肾脏产生不良影响^[37]。5%、10%、20%发芽青稞均能降低自发性 II 型糖尿病小鼠的空腹血糖、胰岛素水平、胰岛素敏感指数、TC 和载脂蛋白 B 含量，提高载脂蛋白 A 含量和卵磷脂胆固醇酰基转移酶活性，从而缓解小鼠体内糖脂代谢紊乱^[38]。陶瑾等^[39]

使用胰蛋白酶水解青稞蛋白, 将氨基酸序列与现有研究中具有降血糖活性的氨基酸序列比较, 推断其较强的降血糖能力可能与氨基酸组成有关, 证明了青稞蛋白肽具有潜在降血糖药理价值。

2.4 对胃肠道的调节作用

胃肠道疾病是全球性的健康问题, 影响着世界上的大部分人口, 研究发现青稞提取物对于胃肠道健康具有一定的调节作用。在小鼠胃溃疡模型中, 青稞 β -葡聚糖可以减轻乙醇引起的胃病变和胃黏膜损伤, 降低胃溃疡指数, 并通过提高超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性, 降低丙二醛水平, 减轻胃氧化应激损伤, 还能降低白细胞介素-6、肿瘤坏死因子 α 水平, 提高前列腺素 E2、一氧化氮水平; 在小鼠肠道健康促进模型中, 青稞 β -葡聚糖增加了实验小鼠结肠长度以及结肠和盲肠的含水量和总短链脂肪酸浓度, 研究表明青稞 β -葡聚糖对实验啮齿动物的胃肠道具有保护作用^[40], 在小鼠高浓度乙醇急性胃损伤模型中, 青稞抗性淀粉能显著降低胃损伤程度, 改善胃黏膜的出血及糜烂状态, 对乙醇诱导的小鼠急性胃损伤有预防保护作用^[41]。青稞 β -葡聚糖能够抵抗胃消化顺利到达肠, 显著降低结肠炎小鼠的炎症水平, 调节免疫应答, 保护肠道屏障的完整性, 避免受损的肠组织与肠道有毒内容物、致病菌或条件致病菌接触^[42]。相较其他谷物, 青稞中的抗性淀粉及阿魏酸含量相对较多, 研究表明^[43], 高抗性淀粉饮食使肠道中参与脂质代谢的酶途径和代谢物同时增加, 双歧杆菌、乳酸杆菌和粪球菌的丰度增加, 摄入高抗性淀粉可通过影响肠道微生物调节脂肪代谢过程, 在消化道中, 阿魏酸对于肠道微生物的多样性有促进作用, 且存在剂量依赖。

2.5 耐缺氧抗疲劳作用

青稞主要生长于海拔 1700~4500 m 的青藏高原地区, 高海拔地区高寒、低压、低氧的气候特点使得青稞具备独特的生物活性, 为生活在青藏高原地区的人们提供对抗恶劣自然环境的必要营养元素。荣耀等^[37]研究了青稞对小鼠耐缺氧、抗疲劳功能活性的影响, 常压耐缺氧实验结果显示, 小鼠脑组织中 HIF-1 水平与蒸馏水对照组相比较, 有利于小鼠耐缺氧能力的提高, 且对小鼠心脏和脑组织不会产生毒性作用; 在负重游泳实验中, 青稞能抑制小鼠体内尿素氮和磷酸肌酸激酶的含量, 抗疲劳效果显著提高。陈潇楠等^[44]给小鼠灌胃青稞 β -葡聚糖后, 进行缺氧和疲劳试验, 在缺氧试验中低剂量组小鼠的缺氧存活时间和喘息时间均最长, 分别为(21.97 $\pm$ 4.34) min、(20.17 $\pm$ 2.78) s, 均与空白对照组(生理盐水)存在显著差异; 在疲劳试验中, 空白缺氧对照组(生理盐水, 模拟 5000 m 海拔缺氧条件)、青稞 β -葡聚糖组(青稞 β -葡聚糖, 模拟 5000 m 海拔缺氧条件)力竭距离分别为(129.54 $\pm$ 54.53) m、(257.43 $\pm$ 132.17) m, 均

与空白常氧对照组(生理盐水, 常压常氧条件)存在极显著差异; 青稞 β -葡聚糖组小鼠的肝组织丙二醛含量为(10.33 $\pm$ 1.94) nmol/mg, 与空白常氧对照组存在显著差异, 与空白缺氧对照组存在极显著差异; 青稞 β -葡聚糖组中超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶含量分别为(224.95 $\pm$ 33.12) U/mg、(184.45 $\pm$ 28.52) U/g, 与空白缺氧对照组均存在显著差异, 说明青稞 β -葡聚糖具有较好的提高小鼠耐缺氧及抗疲劳功效。

3 作用机制

青稞因其所含丰富的活性物质及功能作用, 引起越来越多科学家的关注, 对其作用机制的研究也日益增多, 目前主要集中在对其降血脂、降血糖及胃肠道调节 3 大作用机制的研究上。青稞通过提高瘦素敏感性, 下调脂肪组织抵抗素基因的表达, 上调氧化物酶体增殖物激活受体 γ (peroxisome proliferator-activated receptor γ , PPAR- γ) 基因表达, 同时激活 PPAR- γ , 促进葡萄糖载体葡萄糖转运蛋白 4 的表达, 明显改善大鼠的脂代谢紊乱、胰岛素敏感性下降和肝脏脂肪变性, 从而显著改善高脂高糖膳食诱导 SD 大鼠代谢综合征症状^[45]。青稞作用于参与脂质代谢的 4 个蛋白点, 使热休克蛋白 60 (heat shock protein60, HSP60) 和磷脂酰乙醇胺结合蛋白 1 (phosphatidylethanolamine binding rotein1, PEBP1) 的表达量下调, 使烯酰辅酶 A 水合酶 (enoyl-coenzyme A hydratase, ECH) 和过氧化物酶 6 (peroxiredoxin-6, PRDX6) 的表达量上调, HSP60 和 PEBP1 与动脉粥样硬化相关, ECH 催化脂肪酸的 β -氧化, PRDX6 具有过氧化物酶活性, 因此摄入青稞能够促进高脂膳食大鼠脂肪酸的 β -氧化, 降低体内氧化应激反应, 降低动脉粥样硬化风险^[46]。青稞提取物能可逆性抑制 α -葡萄糖苷酶活性, 且经胃肠道消化后仍具有抑制作用, 可对 Caco-2 细胞、 α -葡萄糖苷酶和细胞内葡萄糖生成产生抑制, 对 α -葡萄糖苷酶、钠钾腺嘌呤核苷三磷酸(adenosine triphosphate, ATP)酶、钠葡萄糖共转运载体、葡萄糖转运载体基因的表达产生下调, 从而发挥辅助降血糖作用^[47]。青稞中的多酚类化合物柚皮苷能够与 α -葡萄糖苷酶的部分活性氨基酸残基结合, 形成氢键和疏水键作用力, 缩减活性氨基酸残基之间的距离和活性口袋表面积, 改变 α -葡萄糖苷酶的构象, 抑制其活性, 多酚类化合物绿原酸和槲皮素与二肽基肽酶-4 的 S1、S2、S3 活性口袋中的活性氨基酸残基结合, 形成氢键和疏水键作用力, 增大活性口袋表面积, 改变二肽基肽酶-4 的构象, 使其失去活性。即青稞中的多酚类化合物通过抑制体内 α -葡萄糖苷酶和二肽基肽酶-4 的活性, 发挥降血糖功能^[48]。青稞全谷物可通过调控氧化应激、炎症、盲肠菌群紊乱、胰岛素通路(胰岛素受体底物 1/磷脂酰肌醇 3-激酶/蛋白激酶 B)、脂肪酸合成通路(腺苷酸活化蛋白激酶/甾醇调节元件结合蛋白-1c/脂肪酸合成酶)及相关

miRNAs 来维持糖脂代谢的稳态,从而改善小鼠的血脂和血糖异常^[49]。青稞的蛋氨酸限制效应参与了其对氧化应激、炎症、胰岛素分泌、葡萄糖代谢和认知功能的调节作用,并且在低蛋氨酸青稞膳食中验证了蛋氨酸限制对胰腺、骨骼肌、海马组织中 H19 表达的调节作用^[50]。青稞 β -葡聚糖能够上调构成肠道紧密连接结构不可或缺的蛋白质元件 Occludin 蛋白和 Claudin-1 蛋白在结肠炎小鼠肠道中的表达下降状态,调控小鼠 Th17/Treg 细胞平衡,改变小鼠肠道菌群组成,调整肠道菌群丰度,增加小鼠肠道菌群在碳水化合物相关代谢酶的基因表达,促进肠道干细胞增殖,从而恢复结肠炎小鼠免疫稳态,促进肠道屏障功能的恢复^[51-52]。

4 结束语

青稞是西藏的重要粮食作物,种植历史悠久,是藏区的特色优势产业,更是一种地域标志,承载着民族文化。随着现代经济社会的不断发展,民族交往交流交融的深入推进,青稞的优质健康食品属性不断被更多国内外关心健康的人们所认知,引起农业及食品科学家的持续关注。如本文所述,青稞具有高蛋白、高纤维、高维生素、低脂肪、低糖、高钾、低钠的健康食品属性,含有 β -葡聚糖、酚酸、黄酮及 GABA 等活性成分,具有抗氧化、降血脂、降血糖、胃肠道调节及耐缺氧抗疲劳等多种功能作用,青稞的这些属性使其具有较好的应用开发前景,但青稞的研究基础薄弱,科技投入不足,精深加工落后,高值化利用率低,配套设施滞后,信息化程度不高,宣传力度不足等问题制约了青稞产业向纵深发展,针对现阶段青稞产业存在的问题,应当从加强基础研究、增加科技投入、强化精深加工、加大宣传力度等方面构建青稞产业高质量发展长效机制,充分发挥青稞作为健康功能食品的特有属性,开发具有更高价值的药品、保健品、功能性食品,提升其高值化利用率。另外,不断丰富青稞研究的多样性和特色性,继续发掘新型功能因子,全面深入阐释青稞的内在价值。

参考文献

- [1] RAMAKRISHNA R, SARKAR D, SCHWARZ P, *et al.* Phenolic linked anti-hyperglycemic bioactives of barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars as nutraceuticals targeting type 2 diabetes [J]. *Ind Crop Prod*, 2017, 107: 509-517.
- [2] 冯朵, 王靖, 季晓娇, 等. 青稞功效成分和保健功能研究进展[J]. *食品科技*, 2020, 45(9): 57-61.
FENG D, WANG J, JI XJ, *et al.* Research progress on functional components and health function of highland barley [J]. *Food Sci Technol*, 2020, 45(9): 57-61.
- [3] 陆培, 安明哲, 李茂, 等. 青稞营养成分研究进展及其应用现状[J]. *酿酒科技*, 2022(7): 110-116.
LU P, AN MZ, LI M, *et al.* Research progress and application status of nutritional components in highland barley [J]. *Liquor-Mak Sci Technol*, 2022(7): 110-116.
- [4] 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, 39(9): 1249-1257.
XU F, DANG B, YANG XJ, *et al.* Nutritional quality evaluation of different highland barley varieties [J]. *J Triticeae Crop*, 2016, 39(9): 1249-1257.
- [5] 靳玉龙. 西藏不同品种青稞的氨基酸组成及营养价值评价[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(12): 125-129.
JIN YL. Evaluation of amino acid composition and nutritional value of highland barley in Xizang [J]. *Cere Oils*, 2023, 36(12): 125-129.
- [6] 吴宏亚, 陈树林, 胡俊, 等. 青稞 β -葡聚糖分子生物学相关研究进展[J]. *核农学报*, 2014, 28(3): 398-403.
WU HY, CHEN SL, HU J, *et al.* Research progress on molecular biology of highland barley β -glucan [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2014, 28(3): 398-403.
- [7] 陈晨, 何蒙蒙, 吴泽蓉, 等. 青稞 β -葡聚糖的研究现状与展望[J]. *中国食品添加剂*, 2020(2): 172-177.
CHEN C, HE MM, WU ZR, *et al.* Research status and prospect of highland barley β -glucan [J]. *China Food Addit*, 2020(2): 172-177.
- [8] 张田, 于寒松. 燕麦和大麦 β -葡聚糖的生理功能研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(3): 22-24, 29.
ZHANG T, YU HS. Advances in studies on physiological functions of β -glucan in oats and barley [J]. *Cere Oils*, 2022, 35(3): 22-24, 29.
- [9] 强小林, 顿珠次仁, 张文会, 等. 青稞 β -聚糖生理功效、提取技术及其新产品研发[J]. *西藏科技*, 2010(2): 6-10.
QIANG XL, DUN ZCR, ZHANG WH, *et al.* Physiological efficacy, extraction technology and new product development of highland barley β -glycan [J]. *Xizang Sci Technol*, 2010(2): 6-10.
- [10] 李健. 青藏高原青稞种质资源评价及高 β -葡聚糖含量成因分析[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
LI J. Evaluation of highland barley germplasm resources in Qinghai-Xizang plateau and genetic analysis of high β -glucan content [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [11] 王建林, 钟志明, 冯西博, 等. 青藏高原栽培大麦 β -葡聚糖含量空间分布特征及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1557-1562.
WANG JL, ZHONG ZM, FENG XB, *et al.* The spatial distribution characteristics of β -glucan content and its influencing factors in barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivated in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, 28(5): 1557-1562.
- [12] 牛小霞, 陈娟, 边金霞, 等. 青稞籽粒 β -葡聚糖含量影响因素研究进展[J]. *寒旱农业科学*, 2023, 2(3): 203-208.
NIU XX, CHEN J, BIAN JX, *et al.* Research progress on factors affecting β -glucan content in highland barley grain [J]. *J Cold-Arid Agric Sci*, 2023, 2(3): 203-208.
- [13] LUND MN. Reactions of plant polyphenols in foods: Impact of molecular structure [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2021, 112: 241-251.
- [14] ZHOU Y, ZHENG J, LI Y, *et al.* Natural polyphenols for prevention and treatment of cancer [J]. *Nutrients*, 2016, 8(8): 515.
- [15] KASZUBA J, KAPUSTA I, POSADZKA Z. Content of phenolic acids in the grain of selected polish triticale cultivars and its products [J]. *Molecules*, 2021, 26(3): 562.
- [16] 郝教敏, 杨文平, 靳明凯, 等. 黑麦多酚提取物对猪肉丸冷藏期间氧化稳定性和品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(9): 175-181.

- HAO JM, YANG WP, JIN MK, *et al.* Effect of rye polyphenol extract on oxidative stability and quality of pork meatballs during cold storage [J]. Food Sci, 2020, 41(9): 175–181.
- [17] DORNAN K, GUNENC A, OOMAH BD, *et al.* Odd chain fatty acids and odd chain phenolic lipids (alkylresorcinols) are essential for diet [J]. J Am Oil Chem Soc, 2021, 98(8): 813–824.
- [18] 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. Studies on the composition of phenolic compounds in highland barley and its antioxidant and anti-tumor cell proliferation activities [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [19] LIN S, GUO H, GONG BJD, *et al.* Phenolic profiles, β -glucan contents, and antioxidant capacities of colored Qingke (*Tibetan hulless barley*) cultivars [J]. J Cere Sci, 2018, 81: 69–75.
- [20] YANG XJ, DANG B, FAN MT. Free and bound phenolic compound content and antioxidant activity of different cultivated blue highland barley varieties from the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Molecules, 2018, 23: 879.
- [21] SHEN YB, ZHANG H, CHENG L, *et al.* *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of polyphenols extracted from black highland barley [J]. Food Chem, 2016, 194: 1003–1012.
- [22] 杨洋, 范蓓, 李杨, 等. 不同加工方式对青稞中酚类物质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 11–18.
- YANG Y, FAN B, LI Y, *et al.* Effects of different processing methods on phenolic compounds in highland barley [J]. Sci Technol Food Ind, 2023, 44(1): 11–18.
- [23] 邓俊琳, 朱永清, 陈建, 等. 青稞萌动过程中 β -葡聚糖、 γ -氨基丁酸和多酚的含量研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(7): 19–25.
- DENG JL, ZHU YQ, CHEN J, *et al.* Study on the contents of β -glucan, GABA and polyphenols in the germination of highland barley [J]. J Chin Cere Oils Assoc, 2018, 33(7): 19–25.
- [24] 路静, 白术群, 郑学玲. 萌芽谷物中 γ -氨基丁酸代谢及应激积累机制的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(17): 380–386.
- LU J, BAI SQ, ZHENG XL. Research progress on the mechanism of GABA metabolism and stress accumulation in budding grains [J]. Food Ferment Ind, 2024, 50(17): 380–386.
- [25] 曹斌, 潘志芬, 尼玛扎西, 等. 青藏高原和国外裸大麦 γ -氨基丁酸的含量与分布[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(3): 555–559.
- CAO B, PAN ZF, NI MZX, *et al.* Content and distribution of GABA barley in Tibetan plateau and abroad [J]. J Triticeae Crop, 2010, 30(3): 555–559.
- [26] 王波, 张文会. 3 种青稞发芽过程中营养物质的变化[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 26–30, 35.
- WANG B, ZHANG WH. The change of nutrition substance during germination of three highland barley [J]. Food Res Dev, 2019, 40(6): 26–30, 35.
- [27] 王欣, 杨开俊, 刘廷辉, 等. 黑青稞麸皮的功能因子结构解析及其抗氧化功能研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 48(7): 142–148.
- WANG X, YANG KJ, LIU TH, *et al.* Structural analysis of functional factors and antioxidant activity of black barley bran [J]. Cere Oils, 2023, 48(7): 142–148.
- [28] ZHANG YZ, YIN LQ, HUANG L, *et al.* Composition, antioxidant activity, and neuroprotective effects of anthocyanin-rich extract from purple highland barley bran and its promotion on autophagy [J]. Food Chem, 2021, 339: 127849.
- [29] 陈建国, 张露, 李金霞, 等. 囊谦黑青稞花青素含量、种类及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业, 2015, 36(12): 236–266.
- CHEN JG, ZHANG L, LI JX, *et al.* Analysis of anthocyanin content, species and antioxidant activity of black barley in Nangqian [J]. Food Ind, 2015, 36(12): 236–266.
- [30] TANG Y, XIAO L, WU XY, *et al.* Impact of germination pretreatment on the polyphenol profile, antioxidant activities, and physicochemical properties of three color cultivars of highland barley [J]. J Cere Sci, 2021, 97: 103152.
- [31] 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 YX. Studies on the preparation, structure analysis and hypolipidemic activity of highland barley β -glucan [D]. Suzhou: Suzhou University, 2018.
- [32] TONG LT, ZHONG K, LIU LY, *et al.* Effects of dietary hullless barley β -glucan on the cholesterol metabolism of hypercholesterolemic hamsters [J]. Food Chem, 2015, 169: 344–349.
- [33] 陈东方, 张聪格, 李立, 等. 青稞提取物对高脂血症人群降血脂功能研究[J]. 实用预防医学, 2011, 18(3): 527–527.
- CHEN DF, ZHANG CK, LI L, *et al.* Study on the hypolipidemic effects of highland barley extract in individuals with hyperlipidemia [J]. Pract Prev Med, 2011, 18(3): 527–527.
- [34] GUO H, LIN S, LU M, *et al.* Characterization *in vitro* binding properties and inhibitory activity on pancreatic lipase of β -glucans from different Qingke (*Tibetan hulless barley*) cultivars [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 120: 2517–2522.
- [35] ZHANG HJ, CAO XR, YIN M, *et al.* Soluble dietary fiber from Qing Ke (highland barley) brewers spent grain could alter the intestinal cholesterol efflux in Caco-2 cells [J]. J Funct Foods, 2018, 47: 100–106.
- [36] 刘佳慈. 青稞 β -葡聚糖对血糖及肠道菌群的影响研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023.
- LIU JC. Effect of highland barley β -glucan on blood glucose and intestinal microflora [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023.
- [37] 荣耀, 白鑫明, 迟明, 等. 高原谷物青稞对小鼠降糖、耐缺氧、抗疲劳功能活性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(7): 207–216.
- RONG Y, BAI XM, CHI M, *et al.* Effects of highland barley on hypoglycemic, hypoxia-resistant and anti-fatigue activities in mice [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2023, 23(7): 207–216.
- [38] 李婷玉, 杜艳, 陈正行, 等. 发芽青稞辅助降血糖和降血脂功效研究[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 114–122.
- LI TY, DU Y, CHEN ZX, *et al.* Study on the effect of germinating barley on lowering blood glucose and blood lipid [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2022, 22(9): 114–122.
- [39] 陶瑾, 张莉方, 徐宁莉, 等. 青稞蛋白降血糖肽的纯化、结构鉴定及体外降血糖和抗氧化活性[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(11): 92–99.
- TAO J, ZHANG LF, XU NL, *et al.* Purification and structure identification of hypoglycemic peptide from highland barley protein and its hypoglycemic and antioxidant activities *in vitro* [J]. J Chin Cere Oils Assoc, 2023, 38(11): 92–99.
- [40] CHEN HL, NIE QX, XIE M. Protective effects of β -glucan isolated from highland barley on ethanolinduced gastric damage in rats and its benefits

- to mice gut conditions [J]. Food Res Int, 2019, 122: 157–166.
- [41] 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 CJ. Preparation of highland barley resistant starch and its protective effect on alcoholic gastric injury [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.
- [42] 李世超. 青稞 β -葡聚糖对 DSS 诱导小鼠结肠炎的调节作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
- LI SC. The regulatory effect of highland barley β -glucan on DSS-induced colitis in mice [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021.
- [43] 张亚琨, 张美莉, 白雪. 膳食纤维及短链脂肪酸对肠道微生物组成的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 195–202.
- ZHANG YK, ZHANG ML, BAI X. Effects of dietary fibre and short-chain fatty acid on microbiome [J]. J Chin Cere Oils Assoc, 2023, 38(2): 195–202.
- [44] 陈潇楠, 李晓莉, 张恒, 等. 青稞 β -葡聚糖耐缺氧功效研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(8): 42–45.
- CHEN XN, LI XL, ZHANG H, *et al.* Study on hypoxia resistance of highland barley β -glucan [J]. Cere Oils, 2023, 36(8): 42–45.
- [45] 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, 2021.
- GONG LX. Studies on highland barley whole grains and their effects on metabolic syndrome [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [46] 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 XJ. Effect of highland barley whole grain powder on cholesterol metabolism in liver and intestine of rats fed with high fat diet [D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [47] 罗龙龙. 青稞表皮脂溶性提取物辅助降血糖效果的研究[D]. 兰州: 西北民族大学, 2022.
- LUO LL. Study on the hypoglycemic effect of fat-soluble extract from highland barley bran [D]. Lanzhou: Northwest University for Nationalities, 2022.
- [48] 托合提萨伊普·图尔荪托合提. 青稞生鲜面品质劣变及多酚类化合物生物活性作用机制研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2021.
- TUOHETISAYIPU TERSTHT. Research on the quality deterioration of fresh highland barley noodles and the mechanism of bioactive effects of polyphenolic compounds [D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2021.
- [49] 邓娜. 青稞全谷物降血糖活性及作用机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- DENG N. Studies on hypoglycemic activity and its mechanism of highland barley whole grains [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [50] 冯传兴. 蛋氨酸限制通过 H19 改善中老年小鼠糖代谢及认知能力的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- FENG CX. Methionine restriction improves glucose metabolism and cognitive function in middle-aged and aged mice through H19 [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [51] 余永康. 基于肠道类器官探究青稞 β -葡聚糖通过肠道干细胞增殖调节肠道屏障功能的机制[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- YU YK. Exploring the mechanism of highland barley β -glucan regulating intestinal barrier function through intestinal stem cell proliferation based on intestinal organoids [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [52] 余永康, 陈坤英, 冯汝婷, 等. 青稞 β -葡聚糖恢复 Th17/Treg 细胞平衡维持小鼠肠道功能[J]. 南昌大学学报(理科版), 2024, 48(3): 241–250.
- YU YK, CHEN KY, FENG RT, *et al.* The highland barley β -glucan restored Th17/Treg cell balance to maintain intestinal function in mice [J]. J Nanchang Univ (Nat Sci), 2024, 48(3): 241–250.

(责任编辑: 安香玉 于梦娇)

作者简介



扎西穷达, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全与食品理化检测。
E-mail: 271367249@qq.com



尼珍, 硕士, 主任药师, 主要研究方向为食品药品质量控制与评价。
E-mail: nizhen1221@163.com