

范雨婷, 王可心, 张海霞, 等. 发芽青稞营养成分及功能特性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 403–411. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020202

FAN Yuting, WANG Kexin, ZHANG Haixia, et al. Research Progress on Nutritional Components and Functional Characteristics of Sprouted Highland Barley[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 403–411. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020202

· 专题综述 ·

发芽青稞营养成分及功能特性研究进展

范雨婷¹, 王可心¹, 张海霞^{2,3}, 马 萍^{2,3}, 李 婧⁴, 吴 晶^{2,3}, 谈有金^{2,3}, 王健斌⁴, 贺晓艳⁴, 杜双奎^{1,5,*}

(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西咸阳 712100;

2.青海天佑德科技投资管理集团有限公司, 青海西宁 810016;

3.青海新丁香粮油有限责任公司, 青海西宁 810016;

4.青海省乡村产业发展指导中心, 青海西宁 810000;

5.粮油功能化加工陕西省高校工程研究中心, 陕西咸阳 712100)

摘 要: 青稞是我国主要分布于西部高原地区极具特色的优势作物, 具有耐寒、耐旱、适应性强、高产早熟等优点。发芽作为一种可以提高植物种子营养成分与生物活性成分利用度的方法, 在人民健康意识普遍提高的当下受到了越来越多的关注。相比于未发芽青稞, 发芽青稞不仅具有更高的营养价值, 也具有更良好的生物活性, 在食品、医药等相关领域具有良好的应用前景。本文综述了青稞发芽后营养组分和功能成分的变化, 发芽有效提高了青稞中的膳食纤维、多种必需氨基酸、 ω -6、 ω -3 脂肪酸、维生素、 γ -氨基丁酸等含量, 降低了淀粉、脂肪含量。重点综述了发芽青稞抗氧化、抗菌、调节血糖、调节血压等功能特性的研究进展, 旨在为发芽青稞的开发利用提供参考。

关键词: 青稞, 发芽, 营养成分, 功能特性, 应用

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)02-0403-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020202

本文网刊:



Research Progress on Nutritional Components and Functional Characteristics of Sprouted Highland Barley

FAN Yuting¹, WANG Kexin¹, ZHANG Haixia^{2,3}, MA Ping^{2,3}, LI Jing⁴, WU Jing^{2,3}, TAN Youjin^{2,3},
WANG Jianbin⁴, HE Xiaoyan⁴, DU Shuangkui^{1,5,*}

(1.College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Xianyang 712100, China;

2.Qinghai Tianyoude Technology Investment Management Group Co., Ltd., Xining 810016, China;

3.Qinghai Xindingxiang Grain and Oil Co., Ltd., Xining 810016, China;

4.Qinghai Rural Industry Development Guidance Center, Xining 810000, China;

5.Engineering Research Center of Grain and Oil Functionalized Processing in Universities of Shaanxi Province, Xianyang 712100, China)

Abstract: Highland barley, a distinctive and advantageous crop predominantly grown in the western plateau regions of China, boasts characteristics such as cold resistance, drought tolerance, strong adaptability, high yield, and early maturity. As a method to improve the utilization of nutrition and bioactive ingredients in plant seeds, germination has received increasing attention nowadays where public health awareness has generally improved. Sprouted highland barley is very promising in food and medicine related fields since it has both higher nutrition value and better biological activities comparing with raw highland barley. This paper summarizes the changes in nutrition components and functional constituents after highland barley sprouted. Germination increased the content of dietary fiber, various essential amino

收稿日期: 2024-02-27

基金项目: 青海省优势特色产业集群项目 (2023-16, 2022-Y-08)。

作者简介: 范雨婷 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 杂粮功能营养富集技术研究, E-mail: 316723067@qq.com。

* 通信作者: 杜双奎 (1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 杂粮功能化加工与评价, E-mail: dushuangkui@nwfufu.edu.cn。

acids, ω -6 fatty acids, ω -3 fatty acids, vitamins, γ -aminobutyric acid and other ingredients effectively, while reducing the content of starch and fat. The research progress of the functional properties of sprouted highland barley, such as antioxidant, antibacterial, blood glucose regulation, blood pressure regulation, are mainly reviewed, in order to provide reference for the development and utilization of sprouted highland barley.

Key words: highland barley; germination; nutritional components; functional characteristics; application

青稞(*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. F.) 是一种禾谷类作物, 因其在收获时内外颖壳分离, 又被称为裸大麦、元麦、米大麦^[1]。青稞是一种耐寒、耐旱、适应性强且稳产的高原谷物, 也是唯一可以在局部高海拔、高寒地带正常成熟的作物^[2]。我国青稞的主要分布区域为青藏高原地区, 如云南的迪庆、甘肃的甘南、青海、西藏、四川的甘孜州和阿坝州等。国家农业农村部“十四五”全国种植业发展规划中指出, “十四五”期间要着力打造青稞传统优势区, 到 2025 年, 青稞种植面积稳定在 400 万亩, 亩产达到 285 kg。经过几千年的培育和发展, 青稞不仅成为极具特色的优势作物代表, 而且对西藏等高原地区的农业、社会、经济发展起到了积极的推动作用^[3]。

据研究报道, 青稞具有很高的营养价值和药用价值, 被视为谷类作物中的佳品。青稞淀粉含量约为 60%~75%, 富含 10.0%~27.9% 膳食纤维^[4], 且青稞淀粉中抗性淀粉含量约为 2.27%^[5]。青稞蛋白质含量为 6.4%~21%, 富含人体所需的 8 种必需氨基酸, 其中赖氨酸含量高达 0.36%^[6]。青稞脂肪含量为 1.18%~3.09%, 主要以饱和脂肪酸棕榈酸(9.61%~24.58%)、不饱和脂肪酸亚油酸(14.2%~50.79%)和油酸(10.32%~15.61%)为主。相比其他谷物, 青稞含有丰富的 β -葡聚糖、 γ -氨基丁酸(GABA)与多酚类物质等生物活性成分, 具有降血糖、降血脂等功能特性活性。青稞中 β -葡聚糖有助于降低血液中的胆固醇并调节血糖, 起到预防和治疗 II 型糖尿病与心脏病的作用^[7]; GABA 有助于激发 β 细胞释放胰岛素, 并抑制血管紧张素转换酶的活性, 从而有效控制高血压等心血管疾病^[8]。多酚类物质有助于抑制脂肪氧化、清除自由基, 从而发挥其抗氧化、抗炎等作用^[9]。然而, 这些营养成分和生物活性成分的水平会受各种因素的影响, 如环境、品种、加工方式等。因此, 如何保留和提升青稞的营养物质含量和生物活性水平是研究者重点关注的问题。

有研究表明, 紫外线-B 辐射处理可以增强发芽青稞根尖中酚酸的积累, 提高其抗氧化能力^[10]; 煮沸和焙烤处理, 可以提高青稞的酚类物质含量等^[11]; 热蒸汽、远红外烘烤和微波烘烤处理可以提高青稞全粉中的粗纤维、粗脂肪及灰分含量^[12]。相比而言, 发芽作为一种非热处理方法, 具有加工温度低、操作简单、安全、绿色高效等优势, 通常用于提高植物种子营养成分与生物活性成分的利用度, 减少抗营养因子^[13]。近年来, 青稞发芽研究已有报道, 发芽能够有效提高青稞营养成分与功能成分的含量、增强青稞

生理活性^[5]。采用发芽青稞制作食品可有效提升食品的营养价值与口感。

本文综合分析了青稞在发芽过程中营养组分与功能组分的变化, 综述了目前有关发芽对青稞生物活性的影响、发芽青稞相关食品的研究进展, 以期发芽青稞在食品、医药等领域的未来应用提供参考。

1 青稞发芽过程中营养组分的变化

1.1 碳水化合物

1.1.1 淀粉 青稞中的碳水化合物主要是淀粉, 约占籽粒(干基)的 60%~75%, 主要由直链淀粉和支链淀粉组成, 其中支链淀粉含量在 74%~78% 之间, 直链淀粉含量在 25%~30% 之间。按直链淀粉含量的不同, 青稞淀粉可分为蜡质青稞淀粉(<2%)、普通青稞淀粉(约 25%)和高直链青稞淀粉(约 40%)^[14]。青稞淀粉黏度较高, 具有较好的乳化性、水油结合能力和稳定性, 可用作增稠剂, 在食品行业领域具有应用潜力^[12]。

种子/青稞在发芽过程中, 淀粉酶的相关基因表达水平逐渐提高, 胚中产生赤霉素转运至糊粉层后诱导其与幼胚中产生大量淀粉酶, 尤其是 α -淀粉酶。淀粉通过多种碳水化合物酶水解成低分子物质, 如糊精、低聚糖等。小分子量糊精在 α -葡萄糖苷酶的作用下进一步水解为麦芽糖并转化为葡萄糖, 从而导致还原糖含量增加^[15] 并为发芽提供能量。在这个过程中, α -淀粉酶活性在发芽 24~48 h 间迅速增加, 72 h 时趋于稳定, 在 72~144 h 内有升有降, 在 144 h 时又有小幅度上升^[15]。随着发芽的进行, 青稞淀粉含量在多种碳水化合物酶的水解作用下显著降低, 其中第 2~3 d 变化最大, 平均下降 3.48%, 其分解产物除为呼吸供能, 大部分供给新幼根和幼芽, 其余部分以低分子物质形式留在胚乳中^[16]。

有研究表明, 发芽青稞籽粒中直链淀粉含量下降为未发芽青稞的 13.8%^[17]。梁雨荷等^[18] 发现, 不同发芽温度下, 青稞直链淀粉含量随发芽时间的延长呈先上升后下降趋势, 22 ℃ 发芽 12 h 的青稞直链淀粉含量最高, 比发芽前提高了 9.96%, 目前发芽对青稞种子直链淀粉含量的影响规律并不明确。已有研究证明发芽会诱导高抗性淀粉水稻^[19]、扁豆^[20] 等作物中抗性淀粉发生变化, 然而关于发芽对青稞抗性淀粉含量变化的研究却鲜有报道。因此, 有必要探究青稞抗性淀粉与直链淀粉对不同发芽条件的响应规律。

1.1.2 膳食纤维 膳食纤维是一种耐消化的多糖, 可以预防便秘并增加肠道微生物的多样性^[21]。青稞是膳食纤维的优质来源, 总膳食纤维含量在 10.0%~

27.9% 之间,其中可溶性膳食纤维的含量在 1.7%~9.3% 之间^[4]。研究发现,在发芽过程中,青稞籽粒中膳食纤维的含量呈先减少后增加的趋势^[22]。在发芽初期,发芽诱导青稞中纤维素酶等相关酶活性增强,使初期膳食纤维含量降低。然而,在发芽 216 h 后,膳食纤维含量增加了约 12.2%^[22]。有关发芽青稞中膳食纤维含量增加的原因有待进一步探讨。

1.2 蛋白质和氨基酸

蛋白质是青稞的主要营养成分之一,蛋白质含量在 6.35%~21.00%,其中清蛋白、球蛋白、谷蛋白、醇溶蛋白平均占比分别为 20.48%、10.99%、21.04%、31.91%^[2]。青稞中必需氨基酸组成齐全,含量高于小麦和玉米,必需氨基酸模式接近世界卫生组织/世界粮食及农业组织(WHO/FAO)推荐值。不同品种青稞中的赖氨酸平均含量为 0.39%,高于常见谷物,可见青稞是一种优质的植物蛋白质资源^[16]。谷物发芽的过程中,蛋白酶往往会被激活,导致蛋白质与氨基酸含量发生变化。王波等^[22]的研究发现,不同品种青稞发芽过程中蛋白质含量变化略有差异,但总体变化趋势不变,均随发芽时间的延长而呈先减小后趋于稳定的趋势,且不同品种间差异不显著($P>0.05$)。魏艳^[23]的研究也证明发芽青稞蛋白质变化呈先减小后趋于稳定的趋势。发芽过程中蛋白质含量的减少是由于蛋白酶活力的显著增加,导致储存蛋白质分解,其分解产物主要为小分子肽类和氨基酸,这些分解产物再供胚胎形成新的结构蛋白,而蛋白质后期含量趋于稳定可能是由于幼苗中蛋白质的重新合成导致的^[22]。

杜艳等^[16]研究表明,青稞发芽过程中蛋白质含量随发芽时间的延长而降低,在发芽 60 h 时,蛋白质含量下降了约 1.2%,随后蛋白质含量趋于稳定。同时,由于蛋白酶活力显著增加促进了蛋白质分解,游离氨基酸释放,故随发芽时间的延长,氨基酸含量呈显著上升趋势。在发芽 12~96 h,大部分氨基酸含量均于发芽 12~48 h 呈显著上升趋势,此时,除蛋氨酸外,其余 7 种人体必需氨基酸的含量最高,非必需氨基酸脯氨酸、丙氨酸、酪氨酸也显著增加。脯氨酸可为氨基酸的合成提供氮源,促使赖氨酸含量增加,极大提高了青稞的营养价值。在发芽 48 h 后,大部分氨基酸含量呈缓慢下降趋势。

综上,发芽导致青稞中蛋白质含量减少,氨基酸含量增加,对于青稞的营养价值和食品品质会产生积极影响。

1.3 脂肪

青稞中脂肪含量在 1%~3%,主要分布于糊粉层和胚中,低于玉米和燕麦,但高于其他谷物^[18]。青稞脂肪酸中的饱和脂肪酸以棕榈酸为主,不饱和脂肪酸以亚油酸、反式油酸、顺式油酸等为主。白术群等^[24]研究发现,发芽过程中,青稞中的脂肪含量整体呈先下降后上升的趋势。在发芽初期,由于脂肪酶分

解、氧化作用、呼吸作用等,青稞中的脂肪含量随发芽时间的延长而迅速降低;在发芽后期,可能是由于根和芽的形成,青稞中的脂肪含量随时间延长而缓慢上升,但含量仍低于未发芽的青稞^[22]。此外,在青稞发芽的过程中, ω -6 与 ω -3 脂肪酸的含量会增加,而 ω -6 与 ω -3 脂肪酸在调节血压和抵抗炎症等方面发挥重要作用,表明发芽青稞在治疗高血压疾病方面具有潜在的应用前景^[16]。

1.4 维生素

青稞中含有丰富的 B 族维生素、维生素 C、维生素 E 等。在青稞发芽过程中,部分维生素的含量与温度和时间呈线性依赖性增加,发芽后维生素 B1 和维生素 C 含量增加了 3 倍,维生素 B2 含量增加了 6 倍^[25],且随着芽的长度增加而增加,但超过一定长度后下降^[26]。DABINABICKA 等^[27]研究发现维生素 E 含量在发芽第 4 d 提升 38%。张伊迪^[28]研究表明发芽对于青稞的维生素 E 含量影响较小,并且建议选择通过 27 °C/6 h 浸泡,22 °C/15~21 h 发芽,可有效提高维生素 E 含量至 0.471 mg/100 g。这可能是由于青稞在发芽过程中需要微量维生素以维持正常的代谢过程,关于维生素含量变化的原因有待进一步探究。

1.5 矿物质元素

青稞矿物质元素含量一般为 1%~4%,主要包括钾、钠、镁、铁、锌、铜、磷、锰等,且青稞籽粒中铜、铁、磷、锌和钾含量高于其他谷物。研究表明外源物质施加能够有效提升青稞芽菜矿质元素含量,例如,通过亚硒酸钠溶液浸泡青稞籽粒提升芽菜硒含量,当发芽时间小于 40 h 时,硒含量随发芽时间的延长显著增加;发芽时间大于 40 h 时,硒含量随时间延长而缓慢增加。由此可知,发芽时间显著影响富硒处理发芽青稞的硒含量^[29]。

青稞总灰分含量在品种间差异显著,主要受栽培环境、土壤成分等因素影响。发芽青稞中的灰分含量小于未发芽青稞^[30]。灰分含量的减少可能是由于青稞种子浸泡过程中某些矿物质的浸出而导致,具体原因有待探究。

综上所述,发芽对青稞营养成分有一定影响,具体变化趋势如表 1。发芽后,青稞中 7 种人体必需氨基酸、脯氨酸、丙氨酸、酪氨酸、纤维素、核黄素、维生素 C、维生素 E、饱和脂肪酸 ω -6 与 ω -3 脂肪酸含量增加,提高了青稞的营养价值。

2 青稞发芽过程中功能成分的变化

青稞包括多种生物活性成分,如 β -葡萄糖、 γ -氨基丁酸(GABA)、多酚等物质,具有抗炎、抗氧化、抗癌、降血脂、降血糖等特性。发芽会影响青稞的种子结构和化学成分,通过对青稞发芽过程的控制,可以有效定向富集青稞中的生物活性成分。

2.1 β -葡聚糖

β -葡聚糖是由葡萄糖分子通过 β -1,3-键和 β -1,6-

表 1 发芽过程中营养成分的变化

Table 1 Changes in nutritional components during germination

类别	营养成分	发芽过程中变化趋势	参考文献
碳水化合物	淀粉	淀粉含量总体呈下降趋势, 其中第2 d到第3 d变化最大, 平均下降3.48%。	[15-16]
	直链淀粉	梁雨荷等研究表明, 青稞直链淀粉含量随发芽时间的延长呈先上升后下降趋势; 刘瑞发现直链淀粉含量下降13.8%。	[17-18]
	膳食纤维	膳食纤维含量呈先下降后上升趋势, 且在发芽216 h后, 膳食纤维含量增加了约12.2%。	[22]
蛋白质与氨基酸	蛋白质	不同品种青稞蛋白质含量均呈先减小后趋于稳定的趋势, 杜艳等研究发现, 在发芽60 h时, 蛋白质含量下降约1.2%, 随后趋于稳定。	[16,22-23]
	氨基酸	大部分氨基酸含量于发芽12~48 h呈显著上升趋势, 48 h后呈缓慢下降趋势。	[16]
脂肪	脂肪	脂肪含量呈先迅速下降后缓慢上升趋势, 但总体含量低于未发芽青稞。	[22,24]
	ω -6、 ω -3脂肪酸	经发芽后, 青稞中 ω -6与 ω -3脂肪酸含量增加。	[16]
维生素	维生素	部分维生素的含量与发芽温度和时间呈线性依赖性增加。	[24]
	维生素B1、维生素C、维生素E	经发芽后, 青稞中维生素B1、维生素C、维生素E含量增加。	[25,27-28]
	维生素B2	维生素B2含量增加了6倍, 且随着芽的长度增加而增加, 但超过一定长度后下降。	[25-26]
矿物质元素	矿物质元素	发芽时间显著影响富硒处理青稞的硒含量, 对其他元素含量影响尚不明确; 灰分含量呈下降趋势。	[29-30]

键连接而成的多糖, 是一种水溶性膳食纤维。 β -葡聚糖在免疫系统中发挥着重要作用, 被认为具有免疫调节、抗氧化、抗肿瘤、抗菌、抗病毒等功效, 可以增强机体的免疫功能, 并具有促进伤口愈合和改善胃肠道健康的效果^[31]。由于其生物活性, β -葡聚糖在医药、保健品、食品等领域具有广泛的应用前景, 可以用于制备功能性食品、药物载体、抗菌剂等^[3]。

在青稞中, β -葡聚糖主要存在于其籽粒的胚乳细胞壁中, 占细胞壁干重的 75%, 但青稞糊粉层中 β -葡聚糖含量只有 26%。在发芽过程中, 青稞中 β -葡聚糖含量整体呈下降趋势, 在 12~48 h 缓慢降解, 48 h 后加快降解^[31]。这是由于青稞籽粒经浸泡膨胀吸水, 诱导 β -葡聚糖酶活性增强, 促进 β -葡聚糖的降解^[32], 也有可能是在发芽过程中, 胚乳糊粉层细胞受胚上皮层细胞分泌的赤霉素刺激, 合成一系列葡聚糖酶, 其随水分渗入胚乳内, 水解青稞细胞壁上和细胞间的葡聚糖^[33]。发芽青稞中的 β -葡聚糖减少在一定程度上对其营养价值产生不利影响。因此, 为了减少 β -葡聚糖的降解, 严格控制发芽时间是必要的, 此外, 也可以添加一些胁迫离子以抑制 β -葡聚糖降解, 譬如重金属离子、胁迫盐等, 这样可以有效地保持发芽青稞的营养价值^[34]。李婷玉等^[35]通过胁迫萌发方式, 在低温-20℃下可以抑制发芽青稞中 β -葡聚糖的降解; 廖超等^[36]采用冷冻干燥处理发芽青稞也能够有效的保护 β -葡聚糖的活性。

2.2 GABA

GABA 是一种非蛋白质氨基酸, 由谷氨酸脱羧酶(GAD)催化谷氨酸的脱羧反应而生成, 其可以通过食物摄入, 也可以由人体内部合成。它是一种神经递质和重要的生物活性分子, 不仅具有调节神经兴奋性和维持神经系统稳定的活性功能, 而且可参与情绪调节、睡眠调节、抗焦虑和抗惊厥等多个神经传递过程^[37]。

ALANSI^[38]研究确定, 发芽处理可显著提高青

稞中的 GABA 含量。然而, 青稞中的 GABA 含量在发芽过程中整体呈现先增加后减少的趋势。这是由于在青稞发芽期间, GABA 的分解与合成是一个动态平衡过程。蛋白质在蛋白酶作用下水解生成谷氨酸, 谷氨酸在谷氨酸脱羧酶(GAD)作用下转化为 GABA。GABA 的不断合成会抑制 GAD 的活性, 增强 GABA 转氨酶活性, 在 GABA 转氨酶作用下, GABA 转化为琥珀酸半醛, 从而导致 GABA 含量下降^[39]。发芽青稞中的 GABA 含量增加, 可以有效提高其营养价值。为了达到最佳发芽效果, 可通过严格控制青稞发芽时间, 有效定向地富集青稞中 GABA 成分, 有利于青稞在保健品与功能性食品中的应用。

2.3 多酚类

植物多酚是一类复杂的二级代谢产物, 广泛存在于植物中, 也被称为多酚类化合物或鞣质。谷物多酚被认为是全谷物发挥重要生理功能的主要物质基础, 具有抗氧化、抗炎、抗癌和心血管保护等功能, 在食品与医药领域具有重要价值^[40]。

相比于常见谷物, 青稞富含酚类化合物, 其占青稞籽粒干物质的 0.1%~0.3%, 主要分布于青稞表皮、糊粉层与胚乳中^[41]。青稞多酚主要分为酚酸、类黄酮、聚黄酮等, 青稞酚酸和黄酮均有游离态和结合态两类, 其中青稞中的酚酸类物质含量一般为 50~120 mg/kg。青稞多酚具有抗菌、抗逆性和防御性的功能, 可作为抗氧化剂, 抑制脂肪过氧化、激活清除自由基体系来发挥其抗氧化等作用。

有研究表明, 适度发芽可有效提高青稞中的多酚类物质含量, 发芽后的青稞总酚及总黄酮含量均大于未发芽的青稞。在发芽过程中, 青稞中的总酚、总黄酮含量均呈先上升后下降的趋势, 这是由于不溶性酚类化合物通常储存于细胞壁中, 并通过与纤维素和蛋白质等生物大分子的酯和糖苷键结合构成细胞壁成分。在萌动阶段, 籽粒吸水膨胀, 各种内源酶、水解酶被激活, 细胞壁被降解, 释放游离态和结合态的

表 2 发芽过程中功能成分变化
Table 2 Changes in functional components during germination

功能成分	发芽过程中变化趋势	参考文献
β -葡聚糖	β -葡聚糖含量整体呈下降趋势, 在 12~48 h 缓慢降解, 48 h 后加快降解。	[31-33]
GABA	GABA 含量整体呈先增加后减少的趋势, 但总体含量仍高于未发芽青稞。	[38-39]
多酚类物质	总酚、总黄酮含量均呈先较快上升后下降的趋势, 但总体含量仍高于未发芽青稞。	[42-44]

酚类化合物, 从而使总酚含量显著增加^[42]。同时, 随着发芽时间的延长, 多酚氧化酶的活力降低, 而蒽酰胺合成酶的活力升高, 有效促进了多酚类物质的合成与积累^[43]。在青稞发芽过程中, 其总酚和黄酮含量在初始阶段上升速率较快, 总酚含量在发芽 40 h 达到最高为 2.584 mg/g, 黄酮含量在萌芽 32 h 达到最大为 2.306 mg/g^[44]。因此, 可以通过控制青稞发芽时间, 有效地定向富集青稞中的总酚及总黄酮含量。

综上所述, 发芽对青稞功能成分有一定影响, 具体变化见表 2。

3 发芽青稞的功能特性

青稞的功能特性受到其内部营养成分及功能成分含量变化的影响, 发芽青稞中的 GABA、多酚类物质等功能成分含量显著提高, 使青稞在抗氧化、抗菌、抗炎、预防糖尿病、心血管疾病等方面有应用前景。

3.1 抗氧化能力

发芽可以有效提高青稞抗氧化能力。这是由于在发芽过程中, 青稞种子内部抗氧化物质含量增加, 如维生素 E、类黄酮、酚酸等, 这些物质具有清除自由基、抑制氧化反应的作用, 从而保护细胞免受氧化损伤。并且在此过程中, 青稞内部部分酶活性得到激活和增强, 如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等^[18]。这些生物酶能够帮助清除体内产生的有害自由基和过氧化物, 减轻氧化应激对细胞的损伤, 这些变化使青稞具备更好的自由基清除能力。

研究表明, 与未发芽青稞相比, 发芽青稞提取物的 DPPH $\cdot$ 、ABTS $^{+}$ 与 $\cdot$ OH 清除能力明显增强, 发芽青稞中总酚、总黄酮含量增加, 提高了发芽青稞糙米、甜醅饮料的质量^[45-46]和抗氧化活性, 发芽青稞及其衍生物的体外抗氧化活性显著高于生青稞, 而其体内的抗氧化活性变化鲜有研究。

彩色谷物作为功能性食品生产的潜在原料, 其花青素有利于人体营养和健康。研究表明, 发芽对不同颜色青稞的次生代谢产物也有一定影响^[47]。研究人员对四种有色青稞进行发芽处理, 发现发芽青稞中的花青素活性物质有所增加, 且发芽 36 h 的黄色青稞中的原花青素含量最高。但对于不同颜色青稞发芽后的花青素含量与组成及其抗氧化能力的研究鲜有报道。

3.2 抗炎/抗菌

青稞发芽处理可以有效提高其抗炎能力, 在青稞的发芽阶段, 内部生物化学过程涉及多种酶类变化, 包括淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶等, 这些酶将种子

内的淀粉、脂肪和蛋白质分解, 释放氨基酸、核酸和维生素等多种生物活性分子^[15]。这些生物活性分子对于细胞修复和免疫功能的维护产生积极影响。

孙昌武等^[31]建立炎症模型, 发现经发芽 30 h 青稞中提取的 β -葡聚糖能够有效地抑制 LPS 引起的 Caco-2 细胞炎症损伤, 提高细胞存活率, 显著抑制炎症模型中各种细胞因子的分泌, 有效改善细胞炎症期间的氧化应激水平, 即发芽青稞及其衍生物在体内比生青稞具有更强的抗菌能力。这表明食用发芽青稞或其衍生产品可有效地帮助减轻炎症相关疾病的症状和风险, 对于发芽青稞应用于预防炎症相关疾病的未来研究具有积极意义。

3.3 血糖调节

发芽青稞中的多糖、膳食纤维、植物蛋白、 β -葡聚糖等功能成分具有调节血糖的作用。多糖和膳食纤维可以延缓糖类的消化吸收速度, 降低血糖的上升速度^[48]; 植物蛋白中含有大豆异黄酮等特定组分且可以降解为生物活性多肽, 可以增加胰岛素的敏感性, 有助于调节血糖平衡^[49]; β -葡聚糖可以通过修复胰岛 B 细胞, 改善胰岛素抵抗, 增加肠胃黏度, 影响消化酶活性等途径来调节血糖^[32]。青稞是低血糖指数食物(GI), 较低的 GI 意味着该食物可延缓葡萄糖吸收, 从而降低血糖峰值, 血糖升高较小, 有助于维持更稳定的血糖水平^[50]。并且, 目前已有研究证明了青稞蛋白肽具有潜在药理价值, 陶瑾等^[51]通过将青稞中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。

李婷玉等^[52]研究表明, 发芽青稞对自发性 II 型糖尿病(T2DM)小鼠的空腹血糖指标呈阳性, 高剂量发芽青稞可以显著降低 T2DM 血清胰岛素含量, 有效提高 T2DM 的载脂蛋白 AI 水平, 降低载脂蛋白 B 水平, 增强卵磷脂胆固醇脂酰转移酶活性, 进而降低 T2DM 的血糖与血脂。因此, 发芽青稞在控制 II 型糖尿病、高血脂等相关疾病方面有十分大的可开发性, 但发芽青稞参与调节血糖的有效性和安全性尚需深入评价。

3.4 血压调节

发芽青稞含有许多天然活性物质, 如多酚类化合物、膳食纤维、GABA、 β -葡聚糖等, 对血管健康和血压调节起到积极的影响。多酚类化合物具有抗氧化和抗炎作用, 可以减少自由基的产生并降低炎症反应, 从而保护血管内皮细胞的功能, 改善血管弹性和

舒张功能,有助于降低血压水平^[16]。膳食纤维是发芽青稞中的另一个重要成分,膳食纤维可以增加肠道蠕动,促进消化系统的正常运转,并帮助排出体内多余的盐分和水分,这有助于防止体内液体滞留和血压的升高^[53]。GABA通过调节中枢神经系统作用于血管运动中枢,有效促进血管扩张^[8]。 β -葡聚糖可以有效改善冠状动脉机能,提高心肌供氧能力,改善血液循环等^[32]。李婷玉等^[52]研究表明,发芽青稞对原发性高血压大鼠的辅助降血压结果呈阳性,表明高剂量发芽青稞可以显著降低受试高血压大鼠的收缩压、舒张压及血清中血管紧张素Ⅱ(ANGⅡ)质量浓度,有效提高高血压大鼠血清中内皮源性超极化因子(EDHF)的表达^[16],其中EDHF的表达增加、ANGⅡ合成减少及血管紧张素转换酶对血清缓激肽的降解作用减弱^[54],均可导致血管舒张能力升高,有利于降低血压。

因此,发芽青稞可作为预防和治疗高血压等心血管疾病的潜在功能性食品或原料。

3.5 其他

发芽青稞中的生物活性物质还具有其他潜在功能,例如GABA具有缓解疼痛、减少焦虑、改善睡眠、调节免疫系统、抑制癌细胞增殖和抗抑郁作用等生物活性功能^[8],由于发芽导致青稞中GABA含量增加,故可认为发芽青稞有潜在的调节精神疾病作用;发芽青稞中蛋白酶活性增强,将蛋白质分解为小分子的肽和氨基酸,导致赖氨酸等氨基酸含量增加。赖氨酸有明显增强记忆、防止脑细胞衰老、增强机体抵抗力之功效^[55],即发芽青稞具有潜在的预防老年痴呆症的功能;同时,青稞中含有活性肽露那辛(Lunasin),其在阻断有丝分裂、抑制肿瘤生长等方面有显著效果,是一种新型的治疗黑素瘤的靶向药物^[56],故发芽青稞对于治疗黑素瘤有潜在的功能。

4 发芽青稞食品的开发

青稞作为藏区同胞赖以生存的谷物,富含多种营养物质,尤其表现出“三高”和“两低”的营养学特征,即高蛋白、高纤维、高维生素、低脂肪和低糖^[1]。同时,青稞也含有丰富的功能成分,如GABA、 β -葡萄糖、多酚、花青素等。这些成分对开发新型青稞健康食品与青稞保健食品方面尤为重要。目前,青稞主要用于制作传统食品、膨化食品及酒产品,如白酒、啤酒、黄酒、米酒与干酒等。然而,由于食品工业上的青稞产品开发在一定程度上受到其本身的加工特性的制约,如籽粒硬度大,口感粗糙,消化率低,故青稞加工利用仍处于初级阶段。

发芽是对谷物营养及功能成分影响最大的非热处理方法。与未发芽的青稞相比,发芽青稞具有更高的营养价值、生物活性与加工特性。目前,许多研究已通过控制青稞发芽阶段的物理条件,提高青稞中营养成分的含量与利用率,有效改善产品口感。同时,在青稞发芽过程中,还可采用辐照处理^[10]、不同浓度

微量元素处理^[30]、添加酶活性调节剂等方法,提高相关营养成分含量。目前,发芽青稞在食品工业中应用引起了广泛关注,在食品工业生产中主要应用有:青稞米产品常有口感生硬、消化性差等问题,发芽处理可有效改善这些问题;制作发芽青稞麦片,可有效改善青稞本身的不良风味,并增加麦片本身的香甜口感;制备发芽青稞粉,可以替代传统的青稞面粉,增加青稞食品的营养价值并赋予独特的口感^[33];制作青稞发芽麦茶,可改善其特殊香味和滋味等^[34];在青稞-小麦面团中添加适量发芽青稞粉可有效改善面团的稳定性,延缓淀粉的老化^[57];开发低GI值早餐粉、营养棒等发芽青稞特色休闲食品以适应糖尿病病人的日常食用需求;富集发芽青稞中的功能成分以用于未来生物医药方面。

与未发芽青稞糙米相比,青稞发芽糙米含有大量GABA^[45]。同时,经发芽处理后所制的青稞甜醅饮料的总酚、总黄酮含量均明显增加,也有效提高了其抗氧化活性^[46]。此外,添加发芽青稞粉的玫瑰绿茶,易于人体吸收利用,具有抗衰老、美容养颜、安气宁神、抗抑郁、减肥的功效^[58]。发芽青稞面粉富含膳食纤维和植物蛋白质,具有抗氧化、抗炎和血糖调节等生物活性功能,可以用于制作面包、饼干、面条等食品,有效提高产品的营养价值。

在未来研究方面,发芽青稞可以被用于加工功能性食品,如血糖调节食品、心血管健康食品等以满足不同人群的健康需求,为消费者提供更多的选择;又由于发芽青稞的低血糖指数和丰富的营养素,可应用于加工替代性食品,如发芽青稞粉代替传统面粉等,吸引追求健康食品的消费者。

然而,发芽会导致青稞中的 β -葡聚糖、矿物质等含量减少^[25-26],这在一定程度上对其营养价值产生不利影响。已有研究证明,发芽过程中部分淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶的活性被激活,导致淀粉^[15]、蛋白质^[23]、脂肪^[22]的降解或氧化哈败,从而影响发芽青稞的贮藏品质。此外,发芽青稞的水分含量比较高^[23],会增加霉菌生长的风险,导致发芽青稞变质、贮藏稳定性下降。所以在实际生产中,应严格控制发芽时间与贮藏条件,以最大程度地保留发芽青稞营养价值。

总体来说,发芽青稞及其制品是一种优良的营养和功能性食品。目前,关于发芽青稞的相关研究主要关注其营养、功能活性物质成分的变化,缺少发芽青稞中营养物质理化性质、作用机制、体内功效等方面的深入挖掘,因此后续研究可以从以下几方面入手,多层次、多角度探究发芽青稞及其制品养分物质发挥重要功能特性的作用机理:a.应该聚焦于深入了解青稞发芽过程中淀粉和蛋白质的结构变化,及其如何影响食品品质和营养特性;b.需要对发芽青稞中丰富的功能性成分进行更加全面和深入的分析,包括其单体组成和作用机制;c.可以加强优化发芽青稞制品的制备工艺,通过精准控制发芽条件、提高生物活性

物质的稳定性和保存性,可以更好地保留生物活性物质,提高食品的营养价值和功能性;d.需要探究不同制品在加工过程中对生物活性物质的影响,以确保其在制品中的最大化保留和释放。其中体内功效试验的开展将有助于全面评估发芽青稞及其制品对人体健康的潜在益处。这些深入研究可以为未来开发具有更高营养价值与健康功能的青稞制品提供科学依据。

5 结论与展望

随着社会的发展,人们对营养全面而均衡的食品需求与日俱增,青稞由于其“三高两低”等营养学特性而受到越来越多的关注。与未发芽的青稞相比,发芽青稞富含膳食纤维、脂质、核黄素、维生素 E、 ω -6 与 ω -3 不饱和脂肪酸、GABA、多酚类物质,同时含有较低水平的淀粉和脂肪。故发芽青稞及其衍生物比生青稞具有更强的抗氧化、抗炎、预防 II 型糖尿病、治疗胰岛素抵抗相关疾病及预防高血脂等心血管疾病的生物活性功能。

发芽青稞在生物与医药领域同样具有很大研究潜力,但目前关于发芽青稞保健食品的开发与应用等相关研究还较少。全面了解青稞发芽过程中的化学和生物学变化,以及这些变化对发芽青稞及其衍生产品质量和营养特性的影响,其活性成分和机制通过何种生物学途径对人体健康进行影 响,对于开发高质量、高营养、具有明确定义功能的发芽青稞制品具有重要意义,可作为未来研究方向。近年来,对发芽青稞与其相关食品的研究明显增加,但目前关于体外研究和动物模型的文献只提供了发芽青稞潜在健康益处的初步迹象,没有足够的临床试验研究来确定发芽青稞及其衍生物是否具有与生青稞相同的生物活性或优于生青稞,也可在未来进行深入研究。总体来说,应提高发芽青稞的质量控制技术和加工,保证产品的质量和安全性,同时加强与食品工业和医药领域的合作,推动发芽青稞及其制品的市场化和产业化进程。

© The Author(s) 2025. 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] 卢良恕. 中国大麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 16. [LU L S. Barley science of China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1996: 16.]
- [2] 吕远平, 熊荣君, 贾利蓉, 等. 青稞特性及在食品中的应用[J]. 食品科学, 2005, 26(7): 266–270. [LÜ Y P, XIONG M J, JIA L R, et al. Characteristics of barley and application in food industry[J]. Food Science, 2005, 26(7): 266–270.]
- [3] YU H, CHENG Y, GONG L X, et al. Physicochemical properties of Tibetan hull-less barley starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 137: 525–531.
- [4] 柏婷梅. 四种麦类膳食纤维结构与体外功能的对比研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020. [BAI T M. Comparative study on the structure and *in vitro* function of four kinds of dietary fiber[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020.]
- [5] 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.
- [6] 邓鹏, 张婷婷, 王勇, 等. 青稞的营养功能及加工应用的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(2): 46–51. [DENG P, ZHANG T T, WANG Y, et al. Research progress on nutritional function and processing application of highland barley[J]. Chinese Food and Nutrition, 2020, 26(2): 46–51.]
- [7] BAIK B K, ULLRICH S E. Barley for food: characteristics, improvement, and renewed interest[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 48(2): 233–242.
- [8] LUCIA D Z, VICENTE L S, LUIS J R, et al. Gamma-aminobutyric acid and probiotics: Multiple health benefits and their future in the global functional food and nutraceuticals market[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103669.
- [9] LIU Y, SHI Y Y, ZHANG M Q, et al. Natural polyphenols for drug delivery and tissue engineering construction: A review[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2024, 266: 116141.
- [10] YAO L, LU H J, LIAO C, et al. Influences of UV-B treatment and cooking methods on bioactive components in germinated highland barley[J]. Food Science and Technology, 2023, 186(10): 115194.
- [11] WANG B, NIE C, FAN M, et al. Effect of boiling and roasting on phenolic components and their bioaccessibilities of highland barley[J]. Food Research International, 2022, 162: 112137.
- [12] LYU Y M, MA S, LIU J K, et al. A systematic review of highland barley: Ingredients, health functions and applications[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2022, 5(1): 35–43.
- [13] ALANSI W, MAHDI A A, ALMAQTARI A Q, et al. Characterization of molecular, physicochemical, and morphological properties of starch isolated from germinated highland barley[J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101052.
- [14] 郑学玲, 张玉玉, 张杰. 青稞淀粉理化特性的研究[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(4): 30–36. [ZHENG X L, ZHANG Y Y, ZHANG J. Study on physicochemical properties of hull-less barley starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(4): 30–36.]
- [15] 张新忠. 大麦发芽过程中淀粉酶活性变化及其与麦芽品质关系研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2011. [ZHANG X Z. Study on the kinetics of barley amylase and their relationship with malt quality during germination[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2011.]
- [16] 杜艳, 梁锋, 李婷玉, 等. 发芽青稞的营养品质及降血压效果[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(7): 44–52. [DU Y, LIANG F, LI T Y, et al. Nutritional quality and antihypertensive effect of sprouted highland barley[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2023, 42(7): 44–52.]
- [17] 刘瑞. 富含 γ -氨基丁酸植物益生基料的研制[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [LIU R. Study of plant probiotic matrix ingredients rich in γ -aminobutyric acid[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [18] 梁雨荷, 党斌, 杨希娟, 等. 萌发青稞营养成分、多酚含量及抗氧化活性研究[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(2): 70–81. [LIANG Y H, DANG B, YANG X J, et al. Study on changes of nutrients, polyphenol contents, and antioxidant activities of germinated hulllessbarley[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(2): 70–81.]
- [19] LIU T, ZHOU Y F, WU D X, et al. Germinated high - resis-

- tant starch rice: A potential novel functional food[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2022, 57(8): 5439–5449.
- [20] ALDUWAYGHIRI R, M ALGHESHAIRY R. Effect of ajwa date and germinated barley on lipid profile in rats fed high-fat diet[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(10): 6043.
- [21] KOH A, DEVADDER F, KOVATCHEVA D P, et al. From dietary fiber to host physiology: short-chain fatty acids as key bacterial metabolites[J]. *Cell*, 2016, 165(6): 1332–1345.
- [22] 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. [WANG B, ZHANG W H. Nutrient changes of three species of highland barley during Germination[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(6): 26–30.]
- [23] 魏艳. 隆子黑青稞发芽过程中营养组分的变化及其分子机理研究[D]. 成都: 成都大学, 2023. [WEI Y. Study on the changes of nutritional components and its molecular mechanism during germination of Longzi black highland barley[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023.]
- [24] 白木群, 李学进, 陈兰, 等. 发芽对2种青稞营养成分及抗氧化活性的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(1): 171–176. [BAI S Q, LI X J, CHEN L, et al. Effects of germination on nutrient composition and antioxidant activity of two highland barley[J]. *Food Technology*, 2022, 47(1): 171–176.]
- [25] RICO D, PENAS E, GARCIA M C, et al. Sprouted barley flour as a nutritious and functional ingredient[J]. *Foods*, 2020, 9(3).
- [26] 彭大惠, 李绶章, 王永清. 大麦及青稞在发芽过程中胡萝卜素及核黄素含量变化的研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 1962(1): 1–5. [PENG D H, LI S Z, WANG Y Q. Study on changes in carotenoids and riboflavin content during germination of barley and highland barley[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 1962(1): 1–5.]
- [27] DABINABICKA I, KARKLINA D, KRUMA Z. Polyphenols and vitamin E as potential antioxidants in barley and malt[J]. *Agricultural and Food Sciences*, 2011: 121–126.
- [28] 张伊迪. 青稞发芽过程中营养成分含量变化的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020. [ZHANG Y D. Exploration of content change of nutritional ingredients in germination process of highland barley[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.]
- [29] 宋妍. 青稞籽粒发芽富硒和超声强化热风干燥技术研究及其乳饮料开发[D]. 南京: 南京农业大学, 2022. [SONG Y. Highland barley seeds processing: Germination for selenium enrichment, ultrasound enhanced hot air drying for dehydration and beverage development[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.]
- [30] 刘裕. 发芽绿豆和青稞宏量组分结构、理化性质及对面条品质的分析[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019. [LIU Y. Effects of sprouting on structural and physicochemical properties of macrocomponents from mung bean and highland barley and its effects on quality of wheat flour noodle[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2019.]
- [31] 孙昌武, 谢云飞, 姚卫蓉, 等. 发芽处理对青稞 β -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 β -glucan[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(17): 308–313.]
- [32] 唐珊珊, 顾楠, 潘志芬, 等. 青稞发芽过程中 β -葡聚糖含量变化及对麦芽品质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(4): 616–622. [TANG S S, GU N, PAN Z F, et al. Changes in β -glucan content of hull-less barley during germination and the effects on malt quality[J]. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, 21(4): 616–622.]
- [33] ALBERTO G. A theoretical framework for β -glucan degradation during barley malting[J]. *Theory in Biosciences*, 2009, 128(2): 97–108.
- [34] 郝静, 张国权, 杨艳红, 等. 发芽青稞营养加工特性及青稞发芽食品的研究[J]. *粮食与食品工业*, 2018, 25(6): 13–15. [HAO J, ZHANG G Q, YANG Y H, et al. Research on nutritional processing characteristics of germinated brown highland barley and the germinated food[J]. *Grain and Food Industry*, 2018, 25(6): 13–15.]
- [35] 李婷玉, 杜艳, 陈正行, 等. 胁迫萌发对青稞籽粒中 β -葡聚糖和 γ -氨基丁酸含量的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 30–35. [LI T Y, DU Y, CHEN Z X, et al. Effects of highland barley seed germination under stress on contents of β -glucan and γ -aminobutyric acid[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(6): 30–35.]
- [36] 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. Effect of different drying methods on the bioactive components of germinated highland barley[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(21): 139–146.]
- [37] 韩玲玉, 汪丽萍, 谭斌, 等. 7种杂粮抗氧化活性及其挤压杂粮粉体外消化特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(6): 45–52. [HAN L Y, WANG L P, TAN B, et al. Comparative study of 7 kinds of cereals on antioxidant activity and *in vitro* digestion characteristics of extruded cereal powders[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(6): 45–52.]
- [38] ALANSI Y A W. 发芽处理对青稞粉营养成分、面团流变和理化性质及其面包加工性能的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [ALANSI Y A W. Effects of highland barley germination on flour nutritional properties, dough rheological and physicochemical characteristics, and bread-making quality[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
- [39] KHWANCHAI P, CHINPRAHAST N, PICHYANGKURA R, et al. Gamma-aminobutyric acid and glutamic acid contents, and the GAD activity in germinated brown rice (*Oryza sativa* L.): effect of rice cultivars[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2014, 23(2): 373–379.
- [40] BORKWEI N E, SAJID L, NIDHISH F, et al. Bioaccessibility and antioxidant activity of polyphenols from pigmented barley and wheat[J]. *Foods*, 2022, 11(22): 3697–3697.
- [41] 李富华, 郭晓晖, 夏春燕, 等. 全谷物酚类化合物抗氧化活性研究进展[J]. *食品科学*, 2012, 33(13): 299–304. [LI F H, GUO X H, XIA C Y, et al. Research advance in antioxidant activity of phenolic compounds in whole grains[J]. *Food Science*, 2012, 33(13): 299–304.]
- [42] XU J G, TIAN C R, HU Q P, et al. Dynamic changes in phenolic compounds and antioxidant activity in oats (*Avena nuda* L.) during steeping and germination[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(21): 10392–10398.
- [43] KAUKOVIRTA-NORJA A, WHELMSON A, POUTANEN K. Germination: a means to improve the functionality of oat[J]. *Agricultural and Food Science*, 2008, 13(1): 100–112.
- [44] 白永亮, 凌志洲, 陈甜妹, 等. 青稞种子萌动过程中抗氧化活性的变化[J]. *广东农业科学*, 2019, 46(11): 119–126. [BAI Y L, LING Z Z, CHEN T M, et al. Changes in antioxidant activity during the germination process of highland barley seeds during germination[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2019, 46(11): 119–126.]
- [45] 卓玛次力. 青稞发芽糙米的生产工艺及其抗氧化活性的研

- 究[J]. 食品与发酵科技, 2018, 54(1): 90-95. [ZHUOMA C L. Study on the production process and antioxidant activity of germinated brown rice from *Hordeumvulgare* linn. var. nudum Hook. f.[J]. Food and Fermentation Technology, 2018, 54(1): 90-95.]
- [46] 鲍玉花, 闫世芳, 肖明, 等. 萌发对青稞甜酷饮料的活性成分及其抗氧化活性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(13): 4383-4389. [BAO Y H, YAN S F, XIAO M, et al. Effects of germination on the active components and antioxidant activity of fermented beverage from highland barley[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2022, 13(13): 4383-4389.]
- [47] 井璐珍. 不同色泽青稞及发芽青稞中酚类物质的定性定量分析及抗氧化活性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019. [JING L Z. Qualitative and quantitative analysis of phenolic compounds in different colors of highland barley and germinated highland barley and their antioxidant activity[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2019.]
- [48] 王竹, 杨月欣, 周瑞华, 等. 抗性淀粉的代谢及对血糖的调节作用[J]. 营养学报, 2003, 25(2): 190-195. [WANG Z, YANG Y X, ZHOU R H, et al. Metabolism of resistant starch and its regulatory effect on plasma glucose[J]. Journal of Nutrition, 2003, 25(2): 190-195.]
- [49] CHOI Y Y, OSADA K, ITO Y, et al. Effects of dietary protein of korean foxtail millet on plasma adiponectin, hdl cholesterol, and insulin levels in genetically type 2 diabetic mice[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2005, 69(1): 31-37.
- [50] JENKINS D J, KENDALL C W, AUGUSTIN L S, et al. Glycemic index: overview of implications in health and disease[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2002, 76: 266-273.
- [51] 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 L F, XU N L, et al. Purification and structural identification of hypoglycemic peptide from highland barley protein and hypoglycemic and antioxidant activity *in vitro*[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(11): 92-99.]
- [52] 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 T Y, DU Y, CHEN Z X, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic effect of germinated highland barley[J]. Chinese Journal of Food Science, 2022, 22(9): 114-122.]
- [53] BEHALL K M, SCHOLFIELD D J, HALLFRISHCH J. Whole-grain diets reduce blood pressure in mildly hypercholesterolemic men and women[J]. Journal of the American Dietetic Association, 2006, 106(9): 1445-1449.
- [54] 何海艳, 陈雯烨, 杨爱萍, 等. 黑加仑多酚降血压的效果研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(3): 97-103. [HE H Y, CHEN W Y, YANG A P, et al. Effect of blackcurrant polyphenols on lowering blood pressure[J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(3): 97-103.]
- [55] 吕廷梅, 卞勇, 吴丽, 等. 萌芽黑青稞对睡眠质量与免疫功能的作用研究[J]. 食品科技, 2021, 46(12): 160-165. [LÜ T M, BIAN Y, WU L, et al. Effects of germination black highland barley on sleep quality and immune function[J]. Food Technology, 2021, 46(12): 160-165.]
- [56] 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, SHE Y X, HONG S H, et al. The latest research progress of bioactive components in hullless barley[J]. Quality and Safety of Agricultural Products, 2020(2): 82-89.]
- [57] 刘亚平, 李文钊, 曾琦琦, 等. 发芽青稞粉对青稞-小麦面团特性及非油炸麻花品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 45-51. [LIU Y P, LI W Z, ZENG Q Q, et al. Effect of germinated highland barley powder on properties of highland barley-wheat dough and quality of non-fried twist[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(6): 45-51.]
- [58] 梁雨荷, 杨希娟, 党斌. 萌发青稞的研究现状及展望[J]. 青海农林科技, 2020(2): 82-89. [LIANG Y H, YANG X J, DANG B. Research progresses in germinating hullless barley[J]. Qinghai Agriculture and Forestry Science and Technology, 2020(2): 82-89.]