发芽青稞的营养品质及降血压效果

杜 艳[1,4]，梁 锋[1,4]，李婷玉[1,4]，周文菊[2,3]，陈正行[1,4]，
涂兆鑫[2,3]，杨 静[2,3]，樊梅香[2,3]，李 娟[*1,4]

（1. 江南大学 粮食发酵与食品生物制造国家工程研究中心，江苏 无锡 214122；2. 青海天佑德科技投资管理集团有限公司，青海 西宁 810016；3. 青海省青稞资源综合利用工程技术研究中心，青海 西宁 810016；4. 江南大学江苏省生物活性制品加工工程技术研究中心，江苏 无锡 214122）

摘要： 作者以发芽前后青稞中β-葡聚糖、γ-氨基丁酸、游离氨基酸、总多酚等营养成分的质量分数以及β-葡聚糖酶、蛋白酶等酶活性为指标，并结合高血压大鼠收缩压、心率等指标的变化情况，研究萌发对青稞营养品质和其降血压效果的影响。结果发现，青稞β-葡聚糖、淀粉和蛋白质质量分数随萌发时间延长而降低，γ-氨基丁酸质量分数在萌发 48 h 达到最高，总多酚、总黄酮质量分数以及β-葡聚糖酶、淀粉酶和蛋白酶的活力随萌发时间延长而增加。总游离氨基酸质量分数尤其是必需氨基酸质量分数经萌发处理后显著升高（$P<0.05$），表明发芽能提高青稞营养价值。此外，与青稞相比，发芽青稞更利于降低高血压大鼠的收缩压、心率、血管紧张素Ⅱ和血管生成素（$P<0.05$），表明发芽青稞有更好的缓解高血压作用。

关键词： 青稞；发芽；营养成分；辅助降血压

中图分类号：TS 211　**文章编号：**1673-1689(2023)07-0044-09　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.07.006

Nutritional Quality and Antihypertensive Effect of Sprouted Highland Barley

DU Yan[1,4]，*LIANG Feng*[1,4]，*LI Tingyu*[1,4]，*ZHOU Wenju*[2,3]，*CHEN Zhengxing*[1,4]，
TU Zhaoxin[2,3]，*YANG Jing*[2,3]，*FAN Meixiang*[2,3]，*LI Juan*[*1,4]

(1. National Engineering Research Center of Cereal Fermentation and Food Biomanufacturing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Qinghai Tianyoude Technology Investment Management Group Co., Ltd., Xining 810016, China; 3.Qinghai Highland Barley Resources Comprehensive Utilization Engineering Technology Research Center, Xining 810016, China; 4. Engineering Research Center for Bioactive Products Processing Technology of Jiangsu Province, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: This study investigated the effects of germination on nutritional quality and antihypertensive effect of highland barley by comparing the mass fraction of β-glucan, γ-aminobutyric acid, free amino acids, total polyphenols and other nutrients before and after the germination of highland barley, as well as the changes in enzyme activities such as β-glucanase and protease, and systolic blood pressure and heart rate of hypertensive rats. The results showed that the

收稿日期： 2021-11-18

基金项目： 青海省科技厅应用基础研究项目（2021-ZJ-712）；西宁市科技计划项目（2020-Y-15）。

作者简介： 杜　艳（1981—），女，博士，正高级工程师，主要从事青稞精深加工及应用研究。E-mail：709316091@qq.com

*** 通信作者：** 李　娟（1982—），女，博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事粮食精深加工研究。E-mail：juanli@jiangnan.edu.cn

mass fraction of β-glucan, starch and protein decreased with the prolonged germination time, while the mass fraction of γ-aminobutyric acid reached its highest value at germination for 48 h. The mass fraction of total polyphenols and total flavonoids, as well as the activities of β-glucanase, amylase and protease increased with the increasing germination time. The total mass fraction of amino acids, especially the mass fraction of essential amino acids, significantly increased after germination (P<0.05), indicating that the nutritional value of highland barley could be improved by germination. In addition, compared with the non-germinated highland barley, the germinated highland barley showed a better efficacy in reducing the systolic blood pressure, heart rate, angiotensin Ⅱ and angiopoietin in hypertensive rats (P<0.05), indicating a better effect on alleviating hypertension.
Keywords: highland barley, germination, nutritional ingredients, antihypertensive effect

青稞为禾本科大麦属的禾谷类作物，是青藏地区最主要的农作物之一，也是青藏地区人民的主粮。青稞营养丰富，具有“三高两低”的特点，即高蛋白质、高纤维素、高维生素、低脂肪和低糖[1]。高血压是最常见的心脑血管疾病之一，严重危害人类的健康与生活。我国现有高血压患者 2.5~2.7 亿，且每年增加 1 000 万人[2]。研究表明，长期食用青稞及其产品，具有预防高血糖、高血脂、高血压、癌症等作用[3]。

谷物萌发是一种有效改善和增强谷物营养价值的方法。在萌发过程中，β-葡聚糖酶、淀粉酶和谷氨酸脱羧酶(glutamic acid decarboxylase，GAD)等酶被激活，使 γ-氨基丁酸（γ-aminobutyric acid，GABA）、多酚、黄酮等生物活性成分大量富集[4-5]。研究表明，GABA 可用于预防和辅助治疗高血压[6-7]。此外，有研究报道，多酚、黄酮也具有良好的降血压作用[8-9]。作者以瓦蓝青稞为原料，以 β-葡聚糖、GABA、蛋白质、淀粉、游离氨基酸、总多酚和总黄酮质量分数及相关酶的活力为指标，探究萌发对青稞营养品质的影响；并以心率、收缩压、血管紧张素等为指标考察经过萌发处理的青稞对高血压大鼠血压的影响，为探求具有一定营养性和降血压功效的食源性物质提供科学基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

瓦蓝青稞：青海天佑德科技投资管理集团有限公司产品；β-葡聚糖混联检测试剂盒：爱尔兰 Megazyme 公司产品；SPF 级雄性 11 周龄原发性高血压大鼠（spontaneously hypertensive rats，SHR，共 60 只）：江苏集萃药康生物科技有限公司提供（许可证号：SCXK（京）2018-0008）；血管紧张素Ⅱ（angiotensin Ⅱ，ANGⅡ）、血管舒缓激肽(bradykinin，BK)、前列环素(prostacyclin 2，PGI2)、血管生成素 2(angiogenin 2，Ang2)、一氧化氮(nitric oxide，NO)、内皮源性超极化因子（endothelium-derived hyperpolarizing factor，EDHF）：南京森贝伽生物科技有限公司产品；芦丁(rutin，RU)和没食子酸(gallic acid，GA)(纯度>95%)，分析纯试剂四氢呋喃、三乙胺、盐酸、结晶乙酸钠等：国药集团化学试剂有限公司产品。

1.2 仪器与设备

BSC-250 型恒温恒湿箱：上海博讯实业有限公司医疗设备厂产品；UV-3200 型紫外分光光度计：上海美谱达仪器有限公司产品；KENT scientific CODA 无创血压仪：美国 Kent 公司产品；微孔分光光度计：梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司产品。

1.3 实验方法

1.3.1 青稞萌发处理 筛选适量饱满、完整的青稞，用体积分数 0.5%次氯酸钠溶液浸泡 15 min，然后用去离子水清洗 3~4 次。再用 2 倍体积去离子水在 15 ℃下浸泡 10 h。在托盘(40 cm×30 cm)底部铺 2 层纱布，均匀铺放青稞 200 g，再在上面盖 2 层湿纱布。在 15 ℃、相对湿度 95%的条件下萌发培养，每隔 6 h 喷洒去离子水 100 mL[10]。分别在萌发 12、24、36、48、60、72、84、96 h 取样，并用去离子水洗涤 3 次，50 ℃灭酶处理 15 min，50 ℃干燥 12 h，粉碎，过 50 目筛。

1.3.2 青稞中β-葡聚糖、蛋白质、淀粉及胚乳酶活力的测定 β-葡聚糖:按照 NY/T2006—2001《谷物及其制品中β-葡聚糖含量的测定》中的方法测定;蛋白质:按照 GB 5009.5—2016《食品中蛋白质含量的测定》中凯氏定氮法测定;淀粉:按照 GB 5009.9—2016《食品中淀粉含量的测定》中酸水解法测定;β-葡聚糖酶:采用β-葡聚糖酶活性测定试剂盒(K-MBGL)测定;GAD:参照白青云的方法[11]测定;α-淀粉酶:采用试剂盒法(T-AMZ200)并依据 Ceralpha 方法测定;β-淀粉酶:采用试剂盒法(K-BETA)并依据 Betamyl-3 方法测定;蛋白酶:按照 GB 28715—2012《饲料添加剂酸性、中性蛋白酶活性的测定》中分光光度法测定。

1.3.3 GABA 和游离氨基酸测定 供试品溶液制备[10]:称取青稞粉 1.0 g,加入适量体积分数 5%三氯乙酸混匀,再加适量体积分数 5%三氯乙酸定容至 25 mL,室温超声提取 40 min,10 000 r/min 离心 10 min。取上清液即得供试品溶液。

高效液相色谱条件[10]:色谱柱为 Agilent Hypersil ODS 柱(4.0 mm×250 mm×5 μm)。流动相 A(pH 7.2)为 27.6 mmol/L 乙酸钠-三乙胺-四氢呋喃溶液(体积比 500.00:0.11:2.50),流动相 B(pH 7.2)为 80.9 mmol/L 乙酸钠-甲醇-乙腈溶液(体积比 1:2:2),流量为1.0 mL/min。柱温为 40 ℃,检测波长为 338 nm。梯度洗脱:0 min,体积分数 8% B;17.0 min,体积分数 50% B;20.1 min,体积分数 100% B;24.0 min,体积分数 100% A。

衍生条件:将 400 μL 供试品溶液和 800 μL 衍生剂在自动衍生装置中反应 2 min。GABA 质量分数以干基质量计。

1.3.4 总多酚和总黄酮测定 供试品溶液的制备:称取青稞粉 2.0 g,加入 25 mL 体积分数 70%丙酮溶液,混匀,超声提取 120 min,4 000 r/min 离心 10 min,取上清液即得供试品溶液。

总多酚测定:吸取供试品溶液 25 μL 于 96 孔板中,加入体积分数 10%福林酚试剂 125 μL,静置 10 min,再加入 125 μL 质量分数 7.5% Na_2CO_3 溶液,避光反应 30 min,于波长 760 nm 处测定吸光度。以没食子酸为标准品绘制的标准曲线计算总多酚质量分数,结果以 mg/hg 表示[12]。

总黄酮测定:吸取供试品溶液 50 μL 于 96 孔板中,加入 20 μL 0.5 mol/L $NaNO_2$ 溶液,静置 5 min,再加入 20 μL 0.3 mol/L $AlCl_3$ 溶液,静置 6 min,再加入 200 μL 0.5 mol/L NaOH 溶液,混合均匀,静置 15 min,于波长 510 nm 处测定其吸光度。以芦丁为标准品绘制的标准曲线计算总黄酮质量分数,结果以 mg/hg 表示[13]。

1.3.5 辅助降血压活性测定

1)实验分组及饲养条件 根据青稞粉中 GABA 质量分数及人体推荐摄入量,发芽青稞(萌发 48 h)的低、中、高剂量设为人体推荐食用量的 5 倍、10 倍、20 倍,青稞组设为人体推荐摄入量的 10 倍,同时设置维持饲料为对照组。将青稞和发芽青稞添加到维持饲料中饲喂大鼠,大鼠自由采食,每 2~3 d 对饲料进行称量。实验周期为 30 d。饲料添加情况见表 1。

动物饲养管理条件:实验动物在温度为 20~26 ℃、相对湿度为 40%~70%的江南大学实验动物中心屏障设施 SYXK(苏)2016-0045 饲养。饲料(辐照灭菌)由江苏省协同医药生物工程有限责任公司提供。

表 1 实验分组信息

Table 1 Experimental grouping information

组别	动物数/只	饲料
对照组	10	维持饲料
青稞组	10	含质量分数 10%青稞粉的饲料
发芽青稞低剂量组	10	含质量分数 5%发芽青稞粉的饲料
发芽青稞中剂量组	10	含质量分数 10%发芽青稞粉的饲料
发芽青稞高剂量组	10	含质量分数 20%发芽青稞粉的饲料

注:青稞中蛋白质质量分数 11.42%、脂肪质量分数 0.98%、淀粉质量分数 77.65%、灰分质量分数 2.42%、β-葡聚糖质量分数 5.05%、GABA 9.57 mg/hg、多酚 249.99 mg/hg、黄酮 190.27 mg/hg;发芽青稞(萌发 48 h)中蛋白质质量分数 11.43%、脂肪质量分数 0.71%、淀粉质量分数 74.31%、灰分质量分数 2.43%、β-葡聚糖质量分数 4.46%、GABA 33.18 mg/hg、多酚 267.51 mg/hg、黄酮 230.18 mg/hg。

2)血压、心率测定 SHR(180~200 g)适应饲养 5 d 后,多次测量其血压,使其适应测压环境。根据测压仪的说明测定大鼠清醒和安静状态下的血压和心率。实验开始后每周测压 1 次,每次对同一只大鼠测压 10~15 次,停止给予受试样品之后,持续观察 7 d。

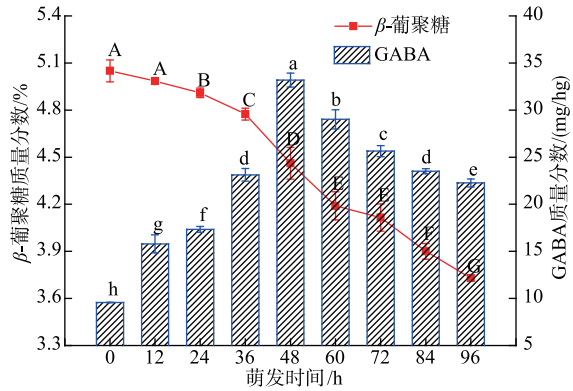
3）其他指标测定　参照试剂盒说明书测定高血压大鼠血清中 ANG Ⅱ、BK、PGI2、Ang2、NO 和 EDHF 的质量浓度。

1.3.6　数据分析　采用 SPSS 22.0 和 Excel 2019 分析处理数据并用 Origin 8.5 绘图。

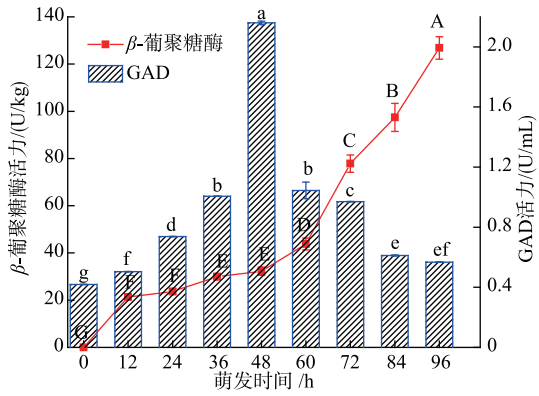
2 结果与分析

2.1　β-葡聚糖、GABA 质量分数及 β-葡聚糖酶、GAD 活力变化

由图 1 可知，青稞中 β-葡聚糖质量分数随萌发时间的延长而下降，其中 β-葡聚糖质量分数在 12~48 h 降解较慢（降解量在 15%内），48 h 后降解速率加快。这可能与青稞萌发过程中胚乳糊粉层和 β-葡聚糖酶合成的速度和活力有关[14]。萌发 0~60 h，β-葡聚糖酶的活力呈平缓的上升趋势，萌发 72~96 h，β-葡聚糖酶的活力急剧上升。随萌发时间的延长，青稞中 GABA 质量分数呈先增加后减少的趋势，其中萌发 48 h 时，GABA 质量分数最高。青稞在萌发期间，蛋白酶被激活，蛋白质水解生成了谷氨酸，谷氨酸在 GAD 作用下转化为 GABA[15]，故而青稞中 GABA 质量分数增加。此外，GABA 生成与消解是一个动态平衡的过程[16]，随着 GABA 的积累，GAD 活力被抑制，而 GABA 转氨酶的活力增强，使 GABA 转化为琥珀酸半醛，最终导致 GABA 质量分数下降[17-18]。GAD 活力变化与萌发过程中 GABA 质量分数的变化趋势一致，表明青稞中 GABA 的增加与 GAD 活力呈正相关。萌发 48 h 时，青稞中 β-葡聚糖质量分数为 4.46%，降解量为 11.68%，GABA 质量分数为 33.18 mg/hg，是原料的 3.47 倍，因此，48 h 较适合于青稞的萌发。



（a）β-葡聚糖、GABA质量分数



（b）β-葡聚糖酶、GAD活力

图 1　萌发过程中青稞 β-葡聚糖、GABA 质量分数和 β-葡聚糖酶、GAD 活力变化

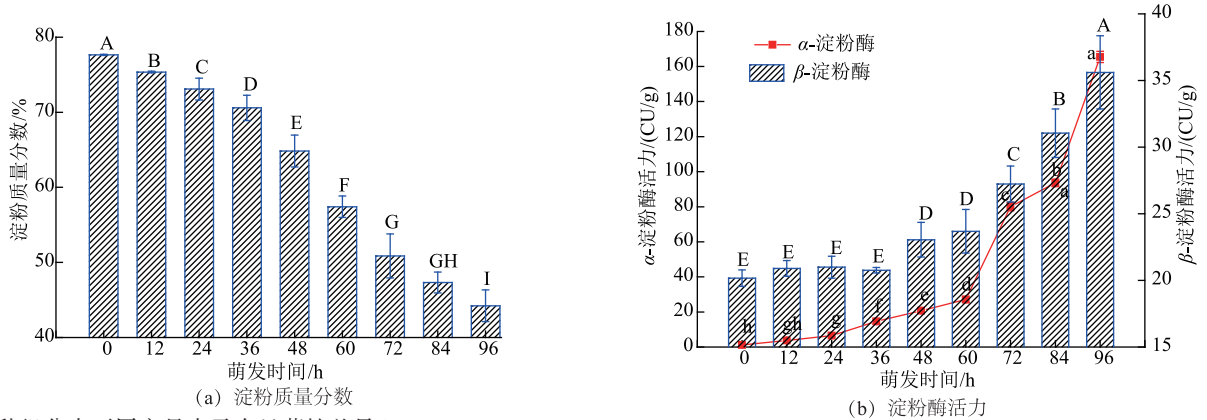
Fig. 1　Changes of the mass fraction of β-glucan and GABA and enzyme activities of β-glucanase and GAD during germination of highland barley

2.2　淀粉质量分数和淀粉酶活力变化

由图 2 可知，青稞中淀粉质量分数随萌发时间的延长而下降。萌发 12~36 h 下降趋势较小，48~96 h 降幅较大。种子在萌发初期优先利用小分子糖[19]，随萌发时间的延长，淀粉酶相关基因表达上调，受到胚中赤霉素的刺激在幼胚和糊粉层中产生大量淀粉酶，特别是 α-淀粉酶，从而将淀粉水解成可溶性糖为萌发提供能量[20-21]。萌发前期因青稞处于休眠期，α-淀粉酶活力很小（0.53 CU/g），萌发 60 h 后，α-淀粉酶的活力急剧增大。β-淀粉酶在萌发前存在一定的活力，在萌发 12~36 h 时，酶活力未发生显著变化，36 h 后酶活力显著增加。可能与结合态的 β-淀粉酶通过蛋白酶切割变为游离态而释放出来有关[22]。谷物中 α-淀粉酶主要在萌发期间合成，在种子萌发过程中起着关键作用[22]。因此，α-淀粉酶和 β-淀粉酶的活力增加均有利于促进淀粉的降解。为确保青稞中的淀粉质量分数，萌发时间不宜过长，根据 β-葡聚糖和 GABA 质量分数，萌发 48 h 较为适宜。

2.3　蛋白质质量分数和蛋白酶活力的变化

由图 3 可知，青稞中蛋白质质量分数随萌发时间增加而降低，蛋白酶活力逐渐上升。在萌发过程中蛋白质不断分解和合成，在蛋白酶的激活作用下，储存蛋白质分解为小分子肽类和氨基酸，这些小分子肽类和氨基酸再供胚胎形成新的结构蛋白[23]。

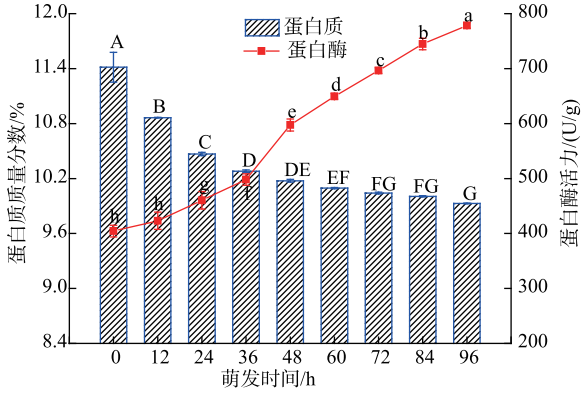


(a) 淀粉质量分数　(b) 淀粉酶活力

同种组分中不同字母表示有显著性差异(P<0.05)。

图 2　萌发过程中青稞淀粉质量分数和淀粉酶活力的变化

Fig. 2　Changes of the mass fraction of starch and enzyme activities of amylase during germination of highland barley



同种组分中不同字母表示有显著性差异(P<0.05)。

图 3　萌发过程中青稞蛋白质质量分数和蛋白酶活力的变化

Fig. 3　Changes of the mass fraction of protein and enzyme activities of protease during germination of highland barley

2.4　游离氨基酸质量分数的变化

由表 2 可知,青稞在萌发过程中,总游离氨基酸质量分数随萌发时间的延长而显著增加。萌发后总游离氨基酸质量分数的增加是由于萌发后蛋白酶的活力增加,降解蛋白质和合成新酶,这些酶有助于游离氨基酸的释放[23]。在萌发 12~96 h,除天冬氨酸、谷氨酸、丙氨酸、蛋氨酸外,其余氨基酸质量分数变化趋势基本一致,在萌发 12~48 h 显著增加,48 h 后有所下降。萌发 48 h 时,7 种人体必需氨基酸质量分数最高(蛋氨酸除外),缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸、苏氨酸和赖氨酸分别是原料的 3.59 倍、4.65 倍、6.58 倍、3.41 倍、12.75 倍、3.75 倍和 4.59 倍。非必需氨基酸中脯氨酸、丙氨酸和酪氨酸等也显著升高。脯氨酸等为合成赖氨酸和其他必需氨基酸提供氮源[24],促使必需氨基酸赖氨酸质量分数增加,改善了青稞的蛋白质质量。各种游离氨基酸均具有特殊的营养功能,青稞萌发后各种游离氨基酸质量分数显著上升,表明萌发可使青稞功能性成分增加,营养品质得到极大提高。

表 2　青稞萌发过程中游离氨基酸质量分数的变化

Table 2　Changes of the mass fraction of free amino acid during germination of highland barley

萌发阶段	游离氨基酸质量分数/(mg/hg)								
	天冬氨酸	谷氨酸	丝氨酸	组氨酸	甘氨酸	脯氨酸	精氨酸	丙氨酸	酪氨酸
原料	21.68±0.12^{a}	26.11±0.02^{bc}	1.85±0.00^{de}	2.19±0.00^{h}	3.00±0.00^{g}	8.74±0.00^{g}	5.84±0.01^{f}	9.31±0.01^{i}	2.93±0.00^{g}
萌发 12 h	17.56±0.05^{d}	24.30±0.05^{d}	2.14±0.00^{d}	3.30±0.00^{g}	5.15±0.01^{f}	12.14±0.01^{f}	8.49±0.00^{e}	20.46±0.04^{h}	5.31±0.01^{f}
萌发 24 h	19.27±0.03^{b}	22.93±0.04^{e}	3.85±0.01^{c}	4.90±0.01^{f}	6.80±0.01^{d}	17.90±0.02^{e}	13.45±0.02^{d}	29.07±0.03^{g}	7.74±0.01^{e}
萌发 36 h	17.56±0.02^{d}	21.67±0.02^{f}	4.29±0.00^{bc}	5.67±0.01^{e}	7.30±0.02^{c}	27.76±0.09^{b}	13.96±0.05^{c}	38.83±0.07^{f}	8.60±0.04^{d}
萌发 48 h	19.84±0.04^{b}	25.40±0.09^{c}	5.01±0.02^{a}	8.59±0.04^{a}	9.63±0.06^{a}	25.09±0.08^{c}	18.72±0.06^{a}	45.63±0.05^{e}	11.16±0.06^{a}

续表 2

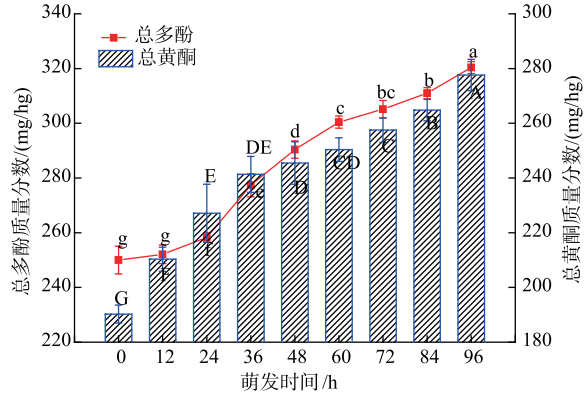
萌发阶段	游离氨基酸质量分数/(mg/hg)								
	天冬氨酸	谷氨酸	丝氨酸	组氨酸	甘氨酸	脯氨酸	精氨酸	丙氨酸	酪氨酸
萌发 60 h	19.05±0.02^{bc}	27.83±0.07^{b}	4.81±0.01^{b}	7.32±0.03^{b}	8.01±0.03^{b}	24.38±0.05^{cd}	16.83±0.04^{b}	47.01±0.04^{d}	9.31±0.03^{c}
萌发 72 h	18.65±0.03^{c}	30.20±0.04^{a}	4.14±0.02^{bc}	6.15±0.02^{d}	5.94±0.06^{e}	23.41±0.02^{d}	14.01±0.06^{c}	48.74±0.01^{c}	8.63±0.03^{d}
萌发 84 h	17.44±0.03^{d}	27.53±0.05^{b}	4.33±0.02^{bc}	6.40±0.03^{cd}	6.42±0.02^{d}	27.62±0.07^{b}	13.88±0.05^{cd}	51.85±0.06^{b}	9.53±0.02^{c}
萌发 96 h	16.57±0.02^{e}	24.91±0.03^{cd}	4.83±0.07^{b}	6.70±0.04^{c}	6.97±0.02^{cd}	31.18±0.09^{a}	13.44±0.03^{d}	55.94±0.05^{a}	10.19±0.01^{b}

萌发阶段	游离氨基酸质量分数/(mg/hg)								
	半胱氨酸	缬氨酸	异亮氨酸	亮氨酸	苯丙氨酸	蛋氨酸	苏氨酸	赖氨酸	总游离氨基酸
原料	1.86±0.00^{d}	6.55±0.02^{h}	1.93±0.05^{f}	2.48±0.03^{h}	3.27±0.01^{e}	0.24±0.00^{e}	3.18±0.00^{f}	2.30±0.00^{f}	103.46±0.27^{h}
萌发 12 h	2.01±0.00^{c}	9.67±0.04^{g}	3.42±0.02^{e}	5.62±0.02^{g}	6.01±0.03^{d}	1.33±0.01^{d}	5.23±0.01^{e}	4.03±0.01^{e}	136.17±0.31^{g}
萌发 24 h	2.14±0.00^{b}	13.77±0.01^{f}	5.96±0.02^{d}	11.50±0.03^{f}	9.13±0.01^{bc}	2.23±0.00^{c}	7.35±0.02^{d}	6.09±0.02^{de}	184.08±0.29^{f}
萌发 36 h	2.12±0.01^{b}	16.51±0.07^{e}	6.88±0.05^{c}	13.12±0.08^{d}	10.00±0.02^{b}	2.52±0.01^{c}	8.77±0.01^{c}	6.59±0.01^{d}	212.15±0.58^{e}
萌发 48 h	2.38±0.04^{a}	23.51±0.02^{a}	8.97±0.03^{a}	16.32±0.04^{a}	11.16±0.02^{a}	3.06±0.03^{b}	11.92±0.02^{a}	10.56±0.05^{a}	256.95±0.80^{a}
萌发 60 h	2.02±0.01^{c}	21.39±0.00^{b}	7.82±0.04^{b}	14.39±0.02^{c}	9.62±0.06^{b}	3.51±0.04^{b}	9.72±0.03^{b}	8.73±0.00^{b}	241.75±0.53^{b}
萌发 72 h	1.85±0.01^{d}	18.96±0.05^{d}	6.80±0.02^{c}	12.48±0.05^{e}	8.76±0.04^{c}	4.14±0.02^{a}	8.74±0.02^{c}	7.27±0.01^{b}	228.87±0.51^{d}
萌发 84 h	1.86±0.05^{d}	19.94±0.04^{c}	7.22±0.02^{bc}	13.75±0.03^{cd}	9.25±0.03^{bc}	4.20±0.01^{a}	9.21±0.00^{bc}	7.19±0.04^{b}	237.62±0.57^{c}
萌发 96 h	1.87±0.01^{d}	21.17±0.03^{b}	7.69±0.04^{b}	15.00±0.04^{b}	9.82±0.04^{b}	4.24±0.03^{a}	9.86±0.10^{b}	7.09±0.04	247.47±0.69^{b}

注：同一氨基酸肩标的不同字母表示有显著性差异（P<0.05）。

2.5　总多酚和总黄酮质量分数变化

由图 4 可知，总多酚和总黄酮质量分数随萌发时间的增加呈上升趋势。研究发现，种子萌发过程中水解酶的激活会降解其细胞壁，释放游离态和结合态的酚类化合物，从而使总多酚质量分数明显增加[25]。此外，在萌发过程中，可通过激活莽草酸和苯丙烷途径重新合成酚类化合物[26]，即随萌发时间延长，多酚氧化酶的活力降低，而蒽酰胺合成酶的活力升高，促进了多酚类物质的合成[26]。



同种组分中不同字母表示有显著性差异（P<0.05）。

图 4　青稞萌发过程中总多酚和总黄酮质量分数的变化

Fig. 4　Changes of the mass fraction of total polyphenol and flavone during germination of highland barley

2.6　发芽青稞降血压功效分析

2.6.1　发芽青稞对 SHR 体质量影响　由表 3 可知，给予受试物前后，SHR 体质量均无显著性变化（P>0.05），表明青稞和发芽青稞受试样品对 SHR 体质量无不良影响。

表 3　青稞对 SHR 体质量的影响

Table 3　Effects of highland barley on the body weight of SHR

组别	初始体质量/g	终期体质量/g
对照组	262.4±8.0[a]	329.2±15.0[a]
青稞组	254.8±12.4[a]	322.4±7.9[a]
发芽青稞组(低)	250.0±8.9[a]	328.6±14.2[a]
发芽青稞组(中)	263.6±9.7[a]	319.9±9.2[a]
发芽青稞组(高)	249.5±11.8[a]	330.7±19.1[a]

注:同一列数据中不同字母表示有显著性差异(P<0.05)。

2.6.2　发芽青稞对 SHR 血压和心率的影响　由表4可知,实验前,对照组、青稞组和发芽青稞组 SHR 的收缩压和舒张压均无显著差异。饲养 30 d 后,与对照组相比,发芽青稞高剂量组 SHR 的收缩压和舒张压显著降低(P<0.05),心率无显著差异。表明高剂量发芽青稞具有降血压作用,可能与青稞中 GABA、总多酚和总黄酮质量分数有关[6-9]。青稞萌发后 GABA 质量分数显著提高,与青稞组相比,发芽青稞对 SHR 降压效果更显著。

表 4　青稞对高血压模型大鼠血压的影响

Table 4　Effects of highland barley on blood pressure of SHR

组别	实验前		实验后		
	收缩压/mmHg	舒张压/mmHg	收缩压/mmHg	舒张压/mmHg	心率/(次/min)
对照组	183.37±47.34[a]	159.20±47.64[a]	196.73±6.20[a]	162.29±20.86[a]	308.37±98.87[a]
青稞组	191.07±16.38[a]	159.20±20.20[a]	182.56±16.26[b]	154.47±22.61[ab]	386.90±70.68[a]
发芽青稞组(低)	177.96±13.75[a]	137.31±23.29[ab]	176.18±26.94[b]	146.70±26.84[b]	283.71±106.28[ab]
发芽青稞组(中)	177.28±13.25[a]	122.20±35.13[ab]	174.25±31.36[b]	145.81±30.09[b]	268.74±81.04[ab]
发芽青稞组(高)	170.91±28.13[a]	131.34±52.35[ab]	139.27±50.53[c]	106.62±41.85[c]	265.63±140.37[ab]

注:同一列数据中不同字母表示有显著性差异(P<0.05)。

2.6.3　发芽青稞对 SHR 血清中 ANGⅡ和 BK 质量浓度的影响　由表 5 可知,与对照组相比,发芽青稞中、高剂量组的 SHR 血清中 ANGⅡ质量浓度显著降低(P<0.05),分别下降 19.75%、21.22%。青稞组、发芽青稞低、中、高剂量组 BK 质量浓度显著升高(P<0.05),分别提高 11.48%、8.82%、10.66%、12.85%,可能与血管紧张素转换酶活性降低有关[8]。ANGⅡ合成减少,血管紧张素转换酶对 BK 的降解作用减弱,血管扩张均有利于降低血压[8]。表明一定剂量的发芽青稞能缓解大鼠高血压症状。

表 5　青稞对 SHR 血清中 ANGⅡ和 BK 质量浓度的影响

Table 5　Effects of highland barley on the mass concentration of ANGⅡ and BK in serum of SHR

组别	ANGⅡ质量浓度/(ng/L)	BK 质量浓度/(ng/L)
对照组	397.01±43.47[a]	70.74±4.71[b]
青稞组	356.42±15.55[ab]	78.86±5.12[ab]
萌发青稞组(低)	334.63±43.32[ab]	76.98±4.25[ab]
萌发青稞组(中)	318.60±40.75[b]	78.28±4.30[ab]
萌发青稞组(高)	312.78±58.64[b]	79.83±7.80[ab]

注:同一列数据中不同字母表示有显著性差异(P<0.05)。

2.6.4　发芽青稞对 SHR 血清中 Ang2、PGI2、NO 和 EDHF 质量浓度的影响　Ang2 在炎症刺激下能迅速从内皮细胞释放,从而引发血管效应[27]。Fiedler 等报道,原发性高血压患者 Ang2 水平升高,其值可作为高血压患者心血管疾病的一个预测指标[28]。由表 6 可知,与对照组相比,发芽青稞低、中、高剂量组 Ang2 水平显著降低(P<0.05),表明发芽青稞在一定剂量下能通过降低 Ang2 水平来缓解大鼠高血压症状。

PGI2 是血管壁中花生四烯酸代谢的主要产物。PGI2 的合成与释放会引起血管舒张并抑制血小板聚集[29]。由表 6 可知,青稞组和发芽青稞低、中、高剂量组的 SHR 血清中 PGI2 质量浓度显著高于对照组(P<0.05),表明青稞和发芽青稞在一定剂量下可通过增加 PGI2 的表达进而发挥降压功效。

NO 是一种强效的内源性血管舒张因子,可诱导血管舒张[30]。研究报道,内源性 NO 生成减少可能是高血压持续进行的原因之一[31]。由表 6 可知,青稞组的 SHR 血清中 NO 质量浓度与对照组无明显差异,发芽青稞低、中、高剂量组的 SHR 血清中 NO 质量浓度显著高于对照组,表明发芽青稞在一定剂量下可通过增加 NO 的表达进而发挥降压功效。

表 6　青稞对 SHR 血清中 Ang2、PGI2、NO 和 EDHF 质量浓度的影响

Table 6　Effects of highland barley on the mass concentration of Ang2, PGI2, NO and EDHF in serum of SHR

组别	Ang2 质量浓度/(ng/L)	PGI2 质量浓度/(ng/L)	NO 质量浓度/(ng/L)	EDHF 质量浓度/(ng/L)
对照组	1 008.68±65.53^{a}	178.29±28.61^{b}	40.41±2.77^{ab}	92.39±6.10^{b}
青稞组	953.29±57.86^{ab}	210.97±21.18^{a}	43.71±3.26^{ab}	101.23±9.67^{ab}
发芽青稞组(低)	913.39±67.00^{b}	223.33±13.16^{a}	44.61±2.46^{a}	103.39±7.40^{a}
发芽青稞组(中)	914.54±44.26^{b}	216.65±24.96^{a}	43.94±2.59^{a}	102.47±6.47^{a}
发芽青稞组(高)	873.62±74.09^{b}	212.78±22.85^{a}	43.45±2.44^{a}	100.84±9.35^{a}

注：同一列数据中不同字母表示有显著性差异(P<0.05)。

在某些情况下，内皮功能障碍与舒张过程中 EDHF 质量浓度的降低相关，EDHF 的表达减少可导致血管舒张能力下降[32]。由表 6 可知，发芽青稞低、中、高剂量组的 SHR 血清中 EDHF 的表达显著高于对照组（P<0.05），分别提高 11.91%、10.91%、9.15%，血管舒张能力增强，有助于缓解 SHR 高血压症状。

3 结　语

青稞在萌发过程中，β-葡聚糖酶、淀粉酶、蛋白酶和 GAD 活力的变化，尤其是酶活力的加强刺激了大量酶促反应进行生物转化，使 β-葡聚糖、淀粉和蛋白质质量分数降低，GABA、游离氨基酸、总多酚和总黄酮质量分数显著增加，尤其在发芽 48 h 时，青稞中 GABA 质量分数高达 33.18 mg/hg，是青稞原料的 3.47 倍，即发芽提高了青稞的营养价值。此外，青稞和发芽青稞都具有一定的降血压效果，且发芽青稞的降血压效果优于未发芽青稞。因此，发芽青稞在青稞保健功能食品的研究与开发方面更具发展前景。

参考文献：

[1] OBADI M, SUN J, XU B. Highland barley: chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications[J]. **Food Research International**, 2021, 140: 1-9.

[2] 潘锋. 一级预防是我国心血管病防控的重点和难点：访中国科学院院士、中国医学科学院阜外医院顾东风教授[J]. 中国医药导报, 2019, 16(35): 1-3.

[3] 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]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2018, 120: 2517-2522.

[4] ZHANG Q, XIANG J, ZHANG L Z, et al. Optimizing soaking and germination conditions to improve gamma-aminobutyric acid content in japonica and indica germinated brown rice[J]. **Journal of Functional Foods**, 2014, 10: 283-291.

[5] TANG Y, XIAO L, WU X Y, et al. Impact of germination pretreatment on the polyphenol profile, antioxidant activities, and physicochemical properties of three color cultivars of highland barley[J]. **Journal of Cereal Science**, 2021, 97: 1-8.

[6] 林智, 大森正司. γ- 氨基丁酸茶(Gabaron Tea)降血压机理的研究[J]. 茶叶科学, 2001, 21(2): 153-156.

[7] 郭晓蒙, 赵富士, 冶晓惠, 等. 响应面法优化柠檬酸胁迫藜麦富集 γ- 氨基丁酸的培养条件及体外降血压活性研究[J]. 食品科学, 2017, 38(14): 221-226.

[8] 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.

[9] 雷燕妮, 张小斌. 杜仲叶总黄酮降血压作用的研究[J]. 陕西农业科学, 2016, 62(5): 6-8.

[10] 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.

[11] 白青云. 低氧胁迫和盐胁迫下发芽粟谷 γ-氨基丁酸富集机理及抗氧化性研究[D]. 南京：南京农业大学, 2009.

[12] SINGLETON V L, ORTHOFER R, LAMUELA-RAVENTÓS R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent[J]. **Methods in Enzymology**, 1999, 299: 152-178.

[13] 袁旭, 伍小宇, 李伟丽, 等. 郫县豆瓣的营养、多酚含量与抗氧化活性评价[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(9): 270-274.

[14] GIANINETTI A. A theoretical framework for β-glucan degradation during barley malting[J]. **Theory in Biosciences**, 2009, 128

(2):97-108.
[15] 于晓晓. 糙米在发芽过程中营养成分和理化特性的变化[D]. 邯郸:河北工程大学,2015.
[16] 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.
[17] 张颖,何健,王涛,等. 通气和金属离子双重胁迫对糙米萌发富集γ-氨基丁酸的影响[J]. 食品与机械,2019,35(5):55-60.
[18] 宁亚维,刘祥贵,王志新,等. 小米糙米发芽富集γ-氨基丁酸[J].食品与生物技术学报,2019,38(1):53-57.
[19] CHI H,XU K,WU X L,et al. Effect of acetylation on the properties of corn starch[J]. **Food Chemistry**,2008,106(3):923-928.
[20] HE D L,HAN C,YAO J L,et al. Constructing the metabolic and regulatory pathways in germinating rice seeds through proteomic approach[J]. **Proteomics**,2011,11(13):2693-2713.
[21] 来吉祥,魏少敏,方云,等. 谷豆萌芽过程中成分变化、生物活性及应用研究进展[J].食品与生物技术学报,2013,32(10):1016-1024.
[22] 李利霞. 制麦工艺对燕麦麦芽品质的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
[23] 张端莉,桂余,方国珊,等. 大麦在发芽过程中营养物质的变化及其营养评价[J]. 食品科学,2014,35(1):229-233.
[24] 郑艺梅,何瑞国,郑琳,等. 糙米发芽过程中营养成分及植酸含量变化的研究[J]. 中国粮油学报,2006,21(5):1-4.
[25] 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.
[26] KAUKOVIRTA-NORJA A,WIHELMSON A,POUTANEN K. Germination:a means to improve the functionality of oat[J]. **Agricultural and Food Science**,2008,13(1):100-112.
[27] MELGAR-LESMES P,TUGUES S,ROS J,et al. Vascular endothelial growth factor and angiopoietin-2 play a major role in the pathogenesis of vascular leakage in cirrhotic rats[J]. **Gut**,2009,58(2):285-292.
[28] FIEDLER U,AUGUSTIN H G. Angiopoietins:a link between angiogenesis and inflammation[J]. **Trends in Immunology**,2006,27(12):552-558.
[29] ASSUNCAO H C R,CRUZ Y M C,BERTOLINO J S,et al. Protective effects of luteolin on the venous endothelium[J]. **Molecular and Cellular Biochemistry**,2021,476(4):1849-1859.
[30] ASHIGAI H,IKESHIMA E,KOIZUMI K,et al. 2-Ethylpyrazine induces vasodilatation by releasing nitric oxide in the endothelium[J]. **Biological and Pharmaceutical Bulletin**,2017,40(12):2153-2157.
[31] KOMJATI K,GREENBERG J H,REIVICH M,et al. Interactions between the endothelium-derived relaxing factor/nitric oxide system and the endogenous opiate system in the modulation of cerebral and spinal vascular CO_2 responsiveness[J]. **Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism**,2001,21(8):937-944.
[32] STOCLET J C,CHATAIGNEAU T,NDIAYE M,et al. Vascular protection by dietary polyphenols[J]. **European Journal of Pharmacology**,2004,500(1):299-313.