

李崇瑜, 党斌, 张发林, 等. 青稞分级粉的营养及活性成分比较 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(16): 335–343. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090331

LI Chongyu, DANG Bin, ZHANG Falin, et al. Comparison of Nutritional and Bioactive Component in Graded Highland Barley Flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(16): 335–343. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090331

· 分析检测 ·

青稞分级粉的营养及活性成分比较

李崇瑜¹, 党斌^{1,2}, 张发林³, 杨希娟^{1,2,*}

(1. 青海大学青海省青藏高原农产品加工重点实验室, 青海西宁 810016;

2. 青海大学农林科学院青藏高原种质资源研究与利用实验室, 青海西宁 810016;

3. 青海华实青稞生物科技开发有限公司, 青海西宁 810016)

摘要: 为明确青稞磨制面粉中产生的 3 种粉体的化学组成差异及加工用途, 本文对其营养、功能成分含量进行了比较分析。结果表明, 青稞 3 种分级粉的营养功能成分含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。其中, 青稞粗麸粉蛋白质 (11.24%)、总膳食纤维 (39.72%)、阿拉伯木聚糖 (16.95%)、总氨基酸 (14.62%) 含量相对最高, 同时富含钾、镁、钙等矿物质及酚类物质; 青稞细麸粉脂肪 (3.68%) 和 β -葡聚糖 (4.92%) 含量相对最高; 青稞面粉总淀粉 (80.40%) 含量最高。谷氨酸为 3 种分级粉中含量最高的氨基酸。粗麸粉和面粉第一限制性氨基酸均为赖氨酸, 而细麸粉为苏氨酸。3 种粉体共检出 13 种酚酸和 8 种黄酮, 其中青稞粗麸粉和细麸粉多酚以结合态的邻香豆酸和橙皮苷为主, 面粉多酚则以结合态没食子酸和芦丁为主。综上所述, 3 种青稞分级粉具有不同的营养物质构成, 这将影响它们潜在的应用途径。青稞粗麸可用于开发富含膳食纤维、氨基酸、矿物质及多酚类物质食品, 细麸可作为 β -葡聚糖提取原料, 研究可为青稞分级粉的加工利用提供一定的理论支持。

关键词: 青稞麸皮, 分级粉, 营养成分, 功能性成分, 多酚组成

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)16-0335-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090331

本文网刊:



Comparison of Nutritional and Bioactive Component in Graded Highland Barley Flour

LI Chongyu¹, DANG Bin^{1,2}, ZHANG Falin³, YANG Xijuan^{1,2,*}

(1. Qinghai Key Laboratory of Agricultural Product Processing on the Tibetan Plateau, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Laboratory of Tibetan Plateau Germplasm Resources Research and Utilization, College of Agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China;

3. Qinghai Huashi Barley Bio-technology Development Co., Ltd., Xining 810016, China)

Abstract: To elucidate the chemical composition differences and processing applications of three types flour fractions produced in highland barley milling, a comparative analysis of their nutritional and functional components was conducted in this study. The results showed that there were significant differences ($P < 0.05$) in the content of nutritional and functional components among the three graded flours of highland barley. Among them, the protein (11.24%), total dietary fiber (39.72%), arabinoxylan (16.95%), and total amino acids (14.62%) levels of highland barley coarse bran powder were relatively the highest. Additionally, the highland barley coarse bran powder was also rich in minerals such as potassium, magnesium, calcium, and phenolic substances. The content of fat (3.68%) and β -glucan (4.92%) in highland barley fine bran powder was relatively the highest, while the content of total starch (80.40%) in highland barley flour was the highest. Glutamic acid was the amino acid with the highest content among the three graded flours. The primary limiting amino acid

收稿日期: 2024-09-25

基金项目: 青海省中央引导地方科技发展资金项目 (2024ZY031); 青海省重点研发与转化计划项目 (2025-NK-122)。

作者简介: 李崇瑜 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品精深加工, E-mail: 2640231731@qq.com。

* 通信作者: 杨希娟 (1980-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品品质评价及精深加工技术, E-mail: 156044169@qq.com。

for coarse bran powder and flour was lysine, while for fine bran powder it was threonine. A total of 13 phenolic acids and 8 flavonoids were detected across the three graded flours. The polyphenols in highland barley coarse and fine bran powder were mainly composed of bound coumaric acid and hesperidin, while the polyphenols in flour were mainly composed of bound gallic acid and rutin. In summary, the three types flour fractions had different nutritional compositions, which would effect their potential applications. Overall, coarse bran of highland barley could be utilized for the development of foods rich in dietary fiber, amino acids, minerals, and polyphenolic compounds, while fine bran can serve as a source material for β -glucan extraction. This research can provide a theoretical basis for the processing and utilization of graded highland barley flour.

Key words: barley bran; graded powder; nutritional composition; functional composition; polyphenol composition

青稞(*Hordeum vulgare* L.), 又称裸大麦, 属禾本科大麦属, 是青藏高原上极具特色的农作物。研究表明, 青稞籽粒含有丰富的营养功能成分, 包括蛋白质、膳食纤维、 β -葡聚糖、阿拉伯木聚糖、 γ -氨基丁酸及多种矿物质元素^[1], 是一种具有广阔开发前景的杂粮。青稞米和面粉是青稞最主要的两种初加工产品。由于独特的碾磨工艺, 在两种产品的加工过程中通常会产生具有不同化学组成和营养特征的分级粉。赵萌萌等^[1]、杜艳等^[2]发现青稞糊粉层营养价值最高, β -葡聚糖、阿拉伯木聚糖及多酚物质最丰富; LI 等^[3]和 GU 等^[4]发现青稞米分层碾磨的分级粉中总酚、总黄酮和氨基丁酸含量在最外层最高, 而 β -葡聚糖含量在最内层最高; 邓俊琳等^[5]比较了青稞米和青稞麸皮中多酚物质含量差异, 证明青稞多酚与花青素主要富集于麸皮中。然而, 已有研究主要关注青稞米碾磨加工过程中所得分级粉的营养功能成分分析, 缺少针对青稞面粉磨制过程中分级粉营养功能成分差异的研究。

事实上, 青稞磨粉的出粉率仅约 51.31%, 这使得青稞面粉加工过程中将产生大量青稞麸皮粉, 而它们常被作为饲料利用, 造成资源浪费。研究显示, 青稞麸皮粉中富集了大量的蛋白质、膳食纤维、 β -葡聚糖、酚类化合物等营养功能成分^[1,6], 具有发展功能性食品加工原辅料的巨大潜力。为改善青稞麸皮粉的适口性, 部分学者已采用超微粉碎^[7-8]和高压微射流技术^[9]对其进行进一步改性处理, 从而拓宽其在食品工业领域的应用途径。当前, 以青稞麸皮粉作为整体进行营养评价和加工利用的研究仍然较少, 尤其未见针对青稞面粉加工副产品—麸皮分级粉中营养功能成分分布及含量差异的报道, 这限制了青稞麸皮粉的精细化开发利用。

为使谷物健康效益最大化, 研究人员对小麦^[10]、荞麦^[11]等不同谷物来源的粗麸粉、细麸粉及精粉中营养活性成分的分布及含量进行了研究, 并将其制成不同用途的分级粉添加到各种食品中, 以满足消费者健康食品的需求。本研究立足于青稞麸皮分级粉的高效利用, 以青稞面粉制备产生的粗麸粉、细麸粉和面粉为研究对象, 通过检测青稞营养和功能成分在不同分级粉中的含量, 明确其分布和加工用途, 为提升青稞制粉中副产物的加工利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

昆仑 17 号青稞(黑色) 由青海省农林科学院提供; 间苯三酚 山东科源生化有限公司; 硫酸、盐酸、无水碳酸钠 均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 酚酸标准品 纯度 $\geq 98.0\%$, 上海源叶生物科技有限公司; 总淀粉试剂盒、直链淀粉试剂盒、 β -葡聚糖试剂盒 爱尔兰 Megazyme 公司; 福林酚分析纯, 北京诺博莱德有限公司。

LabMill 全自动实验磨粉机 法国肖邦科技公司; TGL-20M 高速冷冻离心机 湖南长沙湘仪离心机仪器有限公司; KQ-500DE 数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司; S433D 氨基酸分析仪 德国赛卡姆公司; Vapodest50s 全自动凯氏定氮仪、SOX412Macro 全自动脂肪抽提仪 德国格哈特仪器公司; RetavaporR-215 旋转蒸发仪 瑞士布奇有限公司; N4S 紫外可见分光光度计 上海仪电分析仪器有限公司; LC-20/40D 3C 型液相色谱系统 岛津企业管理(中国)有限公司; DIONEX Ulti Mate 3000 超高效液相色谱-Orbitrap 质谱联用仪 (UHPLC-MS) Thermo Fisher Scientific 公司; ETHOS900 微波消解系统 意大利 Milestone 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 不同青稞分级粉制备 不同青稞分级粉制备: 参照周娇等^[12]的方法, 用 LabMill 全自动实验磨粉机按“一皮二心”法磨制。样品粗麸、细麸和面粉出粉率分别为 24.72%、18.90% 和 46.66%。

1.2.2 营养成分测定与分析 水分含量参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行测定; 脂肪含量参照 GB/T 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》进行测定; 灰分含量参照 GB 5009.4-2010《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》进行测定; 蛋白质含量参照国标 NY/T 3-1982《谷物、豆类作物种子粗蛋白质测定方法》进行测定; 氨基酸含量参照 GB 5009.124-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》进行测定; 矿物质含量参照 GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第二法测定; β -葡聚糖含量 β -葡聚糖试剂盒(K-BGLU02/17)进行测定; 总淀粉含量采用总淀粉试剂盒进行测定; 直链淀粉含量

采用直链淀粉试剂盒进行测定。

1.2.3 膳食纤维含量的测定

1.2.3.1 总膳食纤维(TDF)的测定 参考文献[13],取 3.0 g 样品溶于 50 mL 蒸馏水中,沸水浴 15 min 后于 55 ℃ 水浴中酶解,酶解液用 4 倍无水乙醇沉淀 1 h,过滤,残渣于 105 ℃ 下干燥,称重即为 TDF 质量。

1.2.3.2 可溶性膳食纤维(SDF)的测定 参考文献[13]的方法略作修改进行,取 3.0 g 样品溶于 50 mL 蒸馏水中,沸水浴 15 min 后以 2060 ×g(RCF)离心 10 min 取上清液,于 55 ℃ 水浴中酶解,酶解液用 4 倍无水乙醇沉淀 1 h,过滤,残渣于 105 ℃ 下干燥,称重即为 SDF 质量。

1.2.4 阿拉伯木聚糖含量的测定 阿拉伯木聚糖含量参考文献[14]进行测定,于 552 和 510 nm 处测定样品吸光值,据标准曲线计算样品中阿拉伯木聚糖含量。木糖标准曲线方程为 $Y=1.1744X-0.0776$, $R^2=0.9990$,计算公式如下:

$$\text{阿拉伯木聚糖含量(g/100 g)} = \frac{(A_{552} - A_{510} - I) \times V \times D \times 0.88}{S \times 1000 \times F} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: $A_{552}-A_{510}$ 为样品阿拉伯木聚糖溶液在 552 和 510 nm 处的吸光值之差; I 为 D-木糖标准曲线截距; V 为样品提取液体积, mL; D 为稀释因子; S 为 D-木糖标准曲线斜率; F 为原料质量(干基, g)。

1.2.5 氨基酸品质评价 参考文献[15]的方法进行氨基酸评分(Amino acid score, AAS)、必需氨基酸指数(Essential amino acid index, EAAI)、生物价(Biological value, BV)、氨基酸比值系数分(Score of RC, SRC)、营养指数(Nutritional index, NI)、氨基酸化学评分(Chemical score, CS)的计算与分析。

1.2.6 酚类物质的提取 游离酚提取参照 Jin 等[16]的方法进行:取 1.0 g 样品,加入 80% 的丙酮 25 mL,超声(100 Hz)30 min,以 1628 ×g(RCF)离心 10 min,收集上清液。残渣以同样方法重复,合并上清液,45 ℃ 旋转蒸干,甲醇定容至 10 mL,0.45 μm 有机滤膜过滤,得游离态酚类物质提取液。

结合酚的提取参考文献[16]略作修改:向提取游离酚后的残渣中加入 20 mL 正己烷,以 916 ×g(RCF)离心 5 min,弃去上清液。向沉淀物中加入 17 mL 体积分数为 11% 的盐酸-甲醇溶液,75 ℃ 水浴 1 h,加入 20 mL 乙酸乙酯萃取,以 3000 r/min 离心 5 min,收集上清液,重复 2 次,合并乙酸乙酯萃取相,45 ℃ 旋转蒸干,甲醇定容至 10 mL,0.45 μm 有机滤头过滤,得结合态酚类物质提取液。

1.2.7 总酚和总黄酮含量测定 多酚含量参考文献[17]方法进行测定,以没食子酸为标准计算总酚含量,结果以每 100 g 样品中所含的没食子酸质量表示(mg/100 g),以干基计。标准曲线为: $Y=0.0042X+0.0124$, $R^2=0.9990$ 。

黄酮含量参考文献[17]方法进行测定,以芦丁为标准计算黄酮含量,结果以每 100 g 样品中所含芦丁质量表示(mg/100 g),以干基计。标准曲线为: $Y=0.0055X-0.0047$, $R^2=0.9947$ 。

1.2.8 酚类物质组成测定 采用 HPLC 法对青稞分级粉游离酚与结合酚提取液进行分析,色谱条件参考杨希娟[18]的方法进行,通过峰面积计算酚类物质含量,结果以 μg/g DW 表示。

1.3 数据处理

试验中每个指标重复测定 3 次,结果采用平均值±标准差表示,采用单因素方差分析,SPSS 软件进行 LSD 检验,统计结果 $P<0.05$ 认为差异显著,采用 Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 青稞籽粒分级粉营养成分成分分析

参试青稞分级粉见图 1,其营养成分成分含量如表 1 所示,本研究测定的营养成分成分在青稞不同分级粉中含量存在显著差异($P<0.05$)。膳食纤维是指不能被人体消化吸收而被大肠内物质利用的多糖类和木质素的统称,作为膳食纤维的主要构成部分,阿拉伯木聚糖和 β-葡聚糖已被大量研究证实具有良好的降血糖、降血脂功能[19]。总膳食纤维在三种青稞分级粉中含量均较高,且其在两种麸皮粉中的含量显著高于面粉,说明青稞中的膳食纤维主要存在籽粒外部,这与现有报道一致[20]。但面粉中的可溶性膳食纤维高于细麸层,这与阎莹莹等[21]报道的青稞内部可溶性膳食纤维含量低于外部的研究结果不同,这可能是因为磨粉过程中高温、高压作用破坏了膳食纤

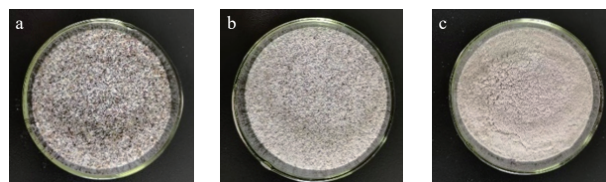


图 1 青稞不同分级粉

Fig.1 Different graded powders of highland barley

注: a 粗麸粉; b 细麸粉; c 面粉。

表 1 青稞不同分级粉营养成分成分含量(干基, %)

Table 1 Nutritional functional composition content of highland barley graded powders (dry basis, %)

理化指标	粗麸	细麸	面粉
灰分	2.84±0.20 ^a	2.1±0.07 ^b	0.93±0.05 ^c
蛋白质	11.24±0.27 ^a	9.76±0.2 ^b	7.64±0.22 ^c
脂肪	2.63±0.23 ^b	3.68±0.14 ^a	1.63±0.09 ^c
总淀粉	36.28±0.31 ^c	50.37±0.87 ^b	80.4±1.11 ^a
直链淀粉	15.61±0.05 ^c	17.46±0.28 ^b	24.49±0.23 ^a
β-葡聚糖	4.36±0.13 ^a	4.92±0.8 ^a	1.94±0.06 ^b
阿拉伯木聚糖	16.95±0.26 ^a	13.41±0.43 ^b	4.8±0.62 ^c
总膳食纤维	39.72±0.12 ^a	24.69±0.11 ^b	16.48±0.20 ^c
可溶性膳食纤维	5.19±0.04 ^a	3.7±0.23 ^c	4.47±0.10 ^b

注: 同行不同字母表示差异显著($P<0.05$), 表 3 同。

表 2 青稞分级粉矿物质含量(mg/kg)

Table 2 Mineral content of highland barley graded powders (mg/kg)

样品	钙	铜	铁	钾	镁	锰	钠	锌
粗麸	622.85±10.11 ^a	6.44±0.3 ^a	91.72±2.15 ^a	8322.05±172.6 ^a	2376.01±90.52 ^a	25.79±0.69 ^a	103.75±0.77 ^a	53.83±0.53 ^a
细麸	419.48±13.7 ^b	4.63±1.95 ^b	57.8±0.56 ^b	5482.05±87.75 ^b	1397.51±103.96 ^b	21.76±0.62 ^b	57.08±0.96 ^b	31.8±2.26 ^b
面粉	300.10±4.1 ^c	3.95±0.07 ^c	44.15±0.50 ^c	2778.55±81.38 ^c	450.06±14.06 ^c	10.97±0.74 ^c	24.17±0.86 ^c	15.91±0.94 ^c

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$); 表3、表5同。

维分子间的糖苷键, 导致面粉中膳食纤维中的大分子不溶性物质转化为小分子可溶性物质, 从而增加了可溶性膳食纤维含量^[22]。细麸中的脂肪、 β -葡聚糖含量显著高于其他两种粉体, 可能是青稞籽粒中的脂肪和 β -葡聚糖主要存在于糊粉层细胞壁与胚部中^[2,23-24], 而本研究采用的磨粉方法可能使青稞糊粉层部分大量富集于细麸中。同时, 本试验制备的青稞细麸中的 β -葡聚糖含量显著高于青稞制米过程中产生的麸皮^[1,4]。GB 28050-2011《食品安全国家标准预包装食品营养标签通则》规定, 每 100 g 固体食品中膳食纤维含量大于等于 3 g/100 g 的食品可认定为高膳食纤维食品。因此, 青稞粗麸可作为膳食纤维的理想来源之一。综合来看, 青稞麸皮中富含丰富的营养成分, 可作为潜在的一种功能性食品原料。

2.2 青稞籽粒不同分级粉粉体矿物质含量分析

矿物质对调节人体健康意义重大。由表 2 知, 不同分级粉中矿物质含量差异显著($P<0.05$)。3 种青稞分级粉中均富含常量元素钾、钙、镁、钠, 它们对人体对骨骼发育、调节酸碱平衡、促进骨骼发育方面具有重要意义^[25]。除此之外, 铜、铁、锰、锌等微量元素也较为丰富。青稞粗麸粉中的钙、铜、铁、钾、镁、锰、钠、锌的含量均最高, 其次为细麸粉, 而面粉中矿物质元素含量相对最低。该结果说明青稞中的矿物质主要集中于麸皮层中, 这与杨应亮等^[26]报道的青稞麸皮中的矿物质含量高于青稞米的结论一致, 且青稞粗麸中的锌含量显著高于赵萌萌等^[1]报道的青稞制米过程中产生的外层麸皮。面粉矿物质含量虽显著低于两种麸皮粉($P<0.05$), 但其铁(44.15 mg/kg)、铜(3.95 mg/kg)、锌(15.91 mg/kg)含量仍然优于小麦中的铁(20.54 mg/kg)、铜(3.66 mg/kg)、锌(15.00 mg/kg)含量^[27]。因此, 青稞各分级粉可以作为铁、钙、镁、钾等矿物质元素的良好补充来源。GB 28050-2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》规定, 每 100 g 固体食品中某矿物质含量 $\geq 30\%$ NRV(NRV 值为食品中某营养素的含量除以该营养素的营养素参考值乘 100%)则可称该物质富含这种矿物质。青稞粗麸中钾、镁元素 NRV 值分别为 41.6% 和 79.2%, 故青稞粗麸粉或可作为开发高钾高镁食品的基础原料。

2.3 青稞籽粒分级粉氨基酸含量及评价

2.3.1 青稞籽粒不同粉层氨基酸含量分析 参试青稞分级粉氨基酸含量如表 3 所示。由表 3 可知, 参

试青稞不同分级粉中均检测出 17 种氨基酸, 其中包括 7 种必需氨基酸。3 种分级粉氨基酸含量存在显著差异($P<0.05$)。3 种粉体总氨基酸含量与必需氨基酸含量趋势一致, 由高到低依次为粗麸粉>细麸粉>面粉。谷氨酸为所有粉体中含量最高的氨基酸, 其在粗麸粉中含量可达 3.39%, 此外, 天冬氨酸、脯氨酸、亮氨酸也为参试粉体中主要的氨基酸。赖氨酸是青稞中的限制性氨基酸, 其在细麸粉中含量最高为 0.43%, 高于小麦^[28](0.38%)和绝大多数品种的燕麦^[29](0.32%~0.41%)。除此之外, 天冬氨酸、谷氨酸、苏氨酸、丙氨酸、脯氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、精氨酸、胱氨酸含量均随青稞磨粉精度的提高而减少, 而酪氨酸则主要存在于细麸粉中。上述结果表明, 3 种青稞分级粉氨基酸种类齐全且富含必需氨基酸, 其中粗麸粉中总氨基酸、必需氨基酸含量均最高, 同时总氨基酸含量优于青稞制米过程中产生的麸皮^[1], 因此可考虑作为氨基酸强化剂应用于营养健康食品开发。

表 3 青稞不同分级粉氨基酸含量(干基, %)

Table 3 Amino acid content of highland barley graded powders (dry basis, %)

游离氨基酸	昆仑17号		
	粗麸	细麸	面粉
天冬氨酸	1.27±0.01 ^a	0.89±0.02 ^b	0.49±0.4 ^c
谷氨酸	3.39±0.02 ^a	2.81±0.01 ^b	1.99±0.04 ^c
苏氨酸	0.46±0.04 ^a	0.28±0.02 ^b	0.18±0.13 ^c
丝氨酸	0.64±0.01 ^a	0.41±0.03 ^b	0.27±0.02 ^c
甘氨酸	0.64±0.06 ^a	0.46±0.02 ^b	0.27±0.04 ^c
丙氨酸	0.89±0.02 ^a	0.68±0.01 ^b	0.30±0.20 ^c
脯氨酸	2.49±0.12 ^a	2.05±0.14 ^b	1.49±0.52 ^c
缬氨酸	0.61±0.08 ^a	0.47±0.02 ^b	0.32±0.13 ^c
蛋氨酸	0.19±0.01 ^a	0.18±0.01 ^b	0.11±0.22 ^c
异亮氨酸	0.45±0.02 ^a	0.37±0.01 ^b	0.23±0.01 ^c
亮氨酸	0.98±0.13 ^a	0.79±0.08 ^b	0.55±0.13 ^c
苯丙氨酸	0.64±0.08 ^a	0.52±0.05 ^b	0.39±0.02 ^c
组氨酸	0.41±0.03 ^a	0.3±0.03 ^b	0.2±0.07 ^c
精氨酸	0.52±0.02 ^a	0.45±0.06 ^b	0.24±0.02 ^c
半胱氨酸	0.35±0.01 ^a	0.3±0.01 ^b	0.14±0.05 ^c
酪氨酸	0.36±0.04 ^b	0.39±0.02 ^a	0.3±0.02 ^c
赖氨酸	0.35±0.01 ^a	0.43±0.01 ^b	0.24±0.06 ^c
必需氨基酸	3.673 ^a	3.069 ^b	2.01 ^c
总氨基酸	14.624 ^a	11.807 ^b	7.692 ^c

2.3.2 青稞籽粒分级粉氨基酸组成与质量评价 从

表 4 青稞不同分级粉必需氨基酸比较

Table 4 Comparison of essential amino acids of highland barley graded powders

项目	平均值(mg·g ⁻¹)			WHO/FAO推荐值(mg·g ⁻¹)	全鸡蛋蛋白(mg·g ⁻¹)	EAA			RC		
	粗麸	细麸	面粉			粗麸	细麸	面粉	粗麸	细麸	面粉
异亮氨酸	39.06	32.03	20.31	40	54	1.09	0.89	0.56	0.90	0.88	0.87
亮氨酸	84.90	68.14	47.48	70	86	2.36	1.89	1.32	1.12	1.06	1.16
赖氨酸	30.03	37.33	20.66	55	70	0.83	1.04	0.57	0.51	0.74	0.64
苏氨酸	39.84	24.65	15.54	40	47	1.11	0.68	0.43	0.92	0.67	0.66
缬氨酸	53.13	40.97	27.52	50	66	1.48	1.14	0.76	0.98	0.90	0.94
甲硫氨酸+半胱氨酸	46.61	42.53	21.88	35	57	1.29	1.18	0.61	1.23	1.33	1.06
苯丙氨酸+酪氨酸	86.63	78.39	59.03	60	93	2.41	2.18	1.64	1.34	1.43	1.68
必需氨基酸总和	424.2	324.05	212.41	360	473	—	—	—	—	—	—

表 5 青稞不同分级粉必需氨基酸品质评价

Table 5 Evaluation of essential amino acid quality of highland barley graded powders

粉层	赖氨酸(%)	CS(%)	AAS(%)	EAAI(%)	BV(%)	NI(%)
粗麸	0.35 ^b	53.41 ^c	54.61 ^b	104.00 ^a	101.66 ^a	11.98 ^a
细麸	0.43 ^a	77.84 ^a	67.87 ^a	88.47 ^b	84.73 ^b	8.63 ^b
面粉	0.24 ^c	65.72 ^b	37.56 ^c	55.88 ^c	49.21 ^c	4.18 ^c

表 4 可知,青稞粗麸粉、细麸粉、面粉中的必需氨基酸分别为 424.21、324.05 和 212.41 mg/g,均低于全鸡蛋蛋白(473 mg/g),但高于 WHO/FAO 推荐值(360 mg/g)。RC 表示一份食物氨基酸相当于模式氨基酸的比例,RC 的比例越接近 1,说明食物的蛋白质营养价值越高^[30]。与 WHO/FAO 模式相比,青稞各分级粉必需氨基酸含量均有所偏离标准氨基酸比例,其中异亮氨酸、赖氨酸、苏氨酸、缬氨酸均相对不足(RC<1),亮氨酸、甲硫氨酸+半胱氨酸、苯丙氨酸+酪氨酸相对过剩(RC>1)。RC 值最小表明该氨基酸为第一限制性氨基酸。赖氨酸在粗麸粉和面粉中 RC 值均为最低,即赖氨酸是青稞蛋白的第一限制性氨基酸,这与文献^[31]报道基本一致。苏氨酸在细麸粉中 RC 值最低,即其为细麸粉中的第一限制性氨基酸。因此,研制基于青稞面粉的相关产品时,可以适当添加部分青稞麸皮以达到均衡产品必需氨基酸比例和强化氨基酸水平的目的。

不同青稞分级粉的 CS、AAS、EAAI、BV、NI 见表 5。由表 5 可知,以赖氨酸含量为评价指标,细麸粉中赖氨酸含量最高(0.43%),这与张东等^[32]报道的小麦粗麸粉中氨基酸含量差异规律一致。以 CS 为评价标准,各粉体的 CS 按照含量高低依次为粗麸粉、细麸粉、面粉,说明青稞粗麸粉中蛋白质的氨基酸含量与组成与 WHO/FAO 推荐的人体氨基酸模式最为相近,必需氨基酸组成比例相对更加合理。以 AAS 为评价依据,由高到低同样为粗麸粉、细麸粉、面粉,说明青稞粗麸粉蛋白中必需氨基酸比例最高。以 EAAI、BV 和 NI 为评价依据,青稞不同分级粉蛋白质评分由高到低依次为粗麸粉、细麸粉、面粉。综上所述,青稞粗麸粉蛋白质品质相对最优,可作为一种潜在高营养价值的蛋白食品辅料。

2.4 青稞籽粒分级粉中多酚组成及含量分析

2.4.1 青稞籽粒不同分级粉粉体多酚含量 参试青稞分级粉中游离酚和结合酚提取物中总酚及总黄酮含量见图 2。由图 2 可知,青稞不同分级粉总酚、总黄酮及酚类物质总量差异显著($P<0.05$)。粗麸粉中游离型酚酸、结合型酚酸、游离型黄酮、结合型酚酸含量均为最高。3 种青稞分级粉结合酚含量均高于游离酚,而游离黄酮含量均高于结合黄酮,说明青稞

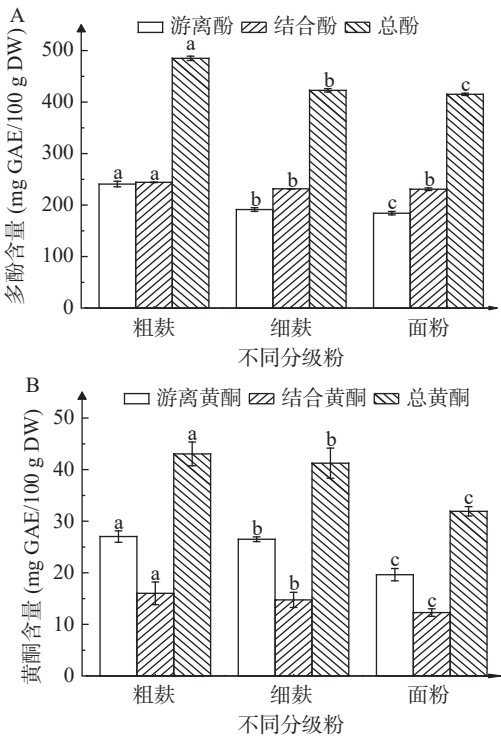


图 2 青稞分级粉酚类物质含量

Fig.2 Free and bound phenolic extracts of highland barley graded powders

注:不同小写字母表示有显著性差异($P<0.05$)。

酚酸主要以结合形式存在,而黄酮主要以游离形式存在。参试青稞分级粉中游离酚、结合酚、结合黄酮、游离黄酮含量由高到低的顺序依次均为粗麸粉>细麸粉>面粉,表明参试青稞的酚类物质主要集中在麸皮层,且粗麸比细麸含有更多的酚类物质,这与Gong等^[33]报道的青稞籽粒可溶性酚类物质含量呈从内向外依次递增的变化趋势相一致。本研究中青稞粗麸粉和细麸粉的总酚含量分别为484.97 mg/100 g和422.82 mg/100 g,明显高于赵萌萌等^[1]报道的青稞米分层制粉所得分级粉中的总酚含量(332.73 g/100 g)和杨应亮等^[26]报道的碾磨后青稞米的总酚含量(204.08 mg/100 g)。顾启新等^[34]分析热处理对燕麦麸皮消化特性及抗氧化性影响时发现,燕麦麸皮总多酚含量为226.68±9.67 mg/100 g。本研究中青稞粗麸粉和细麸粉总酚含量显著高于燕麦麸皮。上述结果说明,青稞麸皮粉作为面粉加工副产物在提供膳食多酚方面具有较明显优势,而青稞籽粒加工过程中适当保留部分青稞麸皮有助于酚类水平的提升。综上所述,富含多酚的青稞麸皮粉可作为富集多酚物质的原料,用于制备多酚较为丰富的青稞健康产品。

2.4.2 青稞籽粒分级粉多酚组成分析 通过HPLC法检测分析青稞分级粉中游离酚与结合酚组成与含量,其结果如表6所示,共检测到13种酚酸和8种黄酮(酚酸物质标准品图见图3)。绝大多数的单体酚含量呈现由籽粒外部向内部逐渐降低的趋势,与现有研究报道一致^[35]。游离型酚酸主要存在于参试青稞粗麸粉中,结合型酚酸则主要集中于细麸粉中;游离态与结合态黄酮均集中于青稞细麸粉中。该结果与化学法测定的多酚物质在青稞分级粉中的含量有所不同,可能的原因是化学法是以没食子酸和儿茶素

为标准品进行的测定,而液相法则主要对青稞分级粉中的主要多酚进行定量,因此造成了两种方法之间结果存在差异^[36]。青稞不同分级粉中游离酚以绿原酸和儿茶素为主,结合酚以没食子酸和橙皮苷为主,这与Yang等^[17]关于12种蓝色青稞多酚分析的结果类似,但与Shen等^[37]报道的黑青稞中酚类物质以阿魏酸和香豆酸为主不同。造成该差异的原因可能与不同青稞收获和种植技术、生长条件、品种、成熟过程、储存以及多酚提取方法等多种因素有关^[38],也可能与磨粉过程中青稞籽粒外层多酚的损失有关^[39]。

羟基苯甲酸类物质是参试青稞粗麸粉和面粉中主要的酚酸物质,其中主要以结合形态存在的丁香酸是粗麸粉中含量最高的羟基苯甲酸物质(1043.33 μg/g DW)。除丁香酸外,青稞粗麸粉中还含有丰富的没食子酸、原儿茶酸和藜芦酸,其总和占羟基苯甲酸类总量的96.03%,这与小麦麸皮^[40]、甜荞粉^[41]中的主要酚酸为阿魏酸、P-香豆酸和香草酸不同。没食子酸是面粉中含量最高的羟基苯甲酸物质(含量为266.64 μg/g DW),其以结合态形式存在。除没食子酸外,面粉同样含有丰富的原儿茶酸和藜芦酸,其总和占羟基肉桂酸类总量的87.41%,但面粉中未检出香草酸和丁香酸。相较于其他两种粉体,细麸粉中的羟基苯甲酸类物质相对含量较低,未检出丁香酸和原儿茶酸。然而,细麸粉中的香草酸和2,4-二羟基苯甲酸的含量显著高于粗麸粉和面粉($P<0.05$),其中香草酸含量为粗麸粉的2.29倍,2,4-二羟基苯甲酸的含量分别为粗麸粉和面粉的2.66倍和1.14倍。羟基肉桂酸类物质是参试细麸粉中主要的酚酸物质,其中邻香豆酸为含量最高为1984.18 μg/g DW,占羟基肉桂酸类物质总量的87.40%。同时,粗麸粉和面粉中主要的羟基肉桂酸类物质也为邻香豆酸,其含量分别占总量的87.83%和45.08%。除此之外,粗麸粉和细麸粉中还含有大量的P-香豆酸,面粉中则含有大量的绿原酸。研究报道,阿魏酸为谷物中主要的单体酚^[42]。本研究中3种分级粉中阿魏酸含量并不突出,且细麸粉中含量最高,这与Chen等^[35]报道的青稞中的阿魏酸主要存在于青稞最外层麸皮的结论不同,这可能因为青稞品种差异及检测方法不同所造成的差异。根皮酚在两种麸皮粉中均大量存在,且细麸粉中含量显著高于粗麸粉,但在面粉中未检出。总体来看,酚酸物质在青稞不同分级粉中分布不同,其中羟基苯甲酸类物质主要以结合态形式存在于青稞粗麸中,羟基肉桂酸类物质在青稞粗麸与细麸粉中含量较为接近。

比较青稞不同分级粉中黄酮类物质组成及含量可知(表6),黄酮醇类物质是粗麸粉、细麸粉及面粉中主要的黄酮物质。其中,山柰酚为粗麸粉和细麸粉中含量最高的黄酮醇物质,含量分别为61.29 μg/g DW和67.55 μg/g DW。芦丁为面粉中主要的黄酮醇类物质(195.52 μg/g DW),其以结合形态存在,且

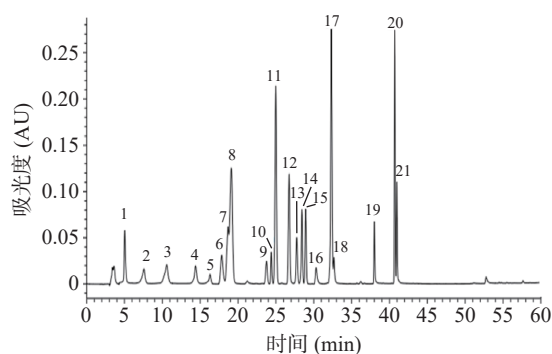


图3 酚类物质标准品

Fig.3 Phenolics standards

注: 1-根皮酚 phloroglucinol; 2-没食子酸 gallic acid; 3-原儿茶酸 protocatechuic acid; 4-绿原酸 chlorogenic acid; 5-儿茶素 catechin; 6- 2,4-二羟基苯甲酸 2,4-dihydroxybenzoic acid; 7-香草酸 vanillic; 8-丁香酸 syringic acid; 9- p-香豆酸 p-coumaric; 10-芦丁 rutin; 11-阿魏酸 ferulic acid; 12-水杨酸 salicylic acid; 13-柚皮苷 naringin; 14-橙皮 hesperidin; 15-苯甲酸 benzoic acid; 16-邻香豆酸 o-coumaric acid; 17-杨梅素 myricetin; 18-槲皮素 quercetin; 19-藜芦酸 3,4-dimethoxybenzoic; 20-柚皮素 naringenin; 21-山柰酚 kaempferol。

表 6 青稞不同分级粉游离酚与结合酚平均含量(μg/g DW)
Table 6 Mean content of free and bound phenols in different milling fractions of highland barley (μg/g DW)

酚酸	粗麸			细麸			面粉		
	游离酚	结合酚	总酚	游离酚	结合酚	总酚	游离酚	结合酚	总酚
羟基苯甲酸类									
没食子酸	29.15±0.21 ^b	930.88±0.14 ^{Ab}	960.03±0.32 ^{Ab}	nd	355.63±0.24 ^{Ba}	355.63±0.24 ^{Ba}	nd	266.64±9.08 ^{Ca}	266.64±9.08 ^{Ca}
苯甲酸	11.79±0.31 ^{Ce}	18.32±5.78 ^{Ac}	30.12±5.84 ^{AF}	12.15±0.46 ^{Bb}	13.7±0.37 ^{Bf}	25.85±0.95 ^{Bc}	13.94±2.95 ^{Ad}	10.69±0.84 ^{Cd}	24.63±3.96 ^{Cc}
香草酸	nd	15.78±0.12 ^{Bh}	15.78±0.12 ^{Bh}	nd	36.26±0.4 ^{Ad}	36.26±0.4 ^{Ad}	nd	nd	nd
丁香酸	11.42±0.05 ^f	1031.9±7.22 ^a	1043.33±7.23 ^a	nd	nd	nd	nd	nd	nd
2,4-二羟基苯甲酸	11.95±5.35 ^{Bd}	18.81±1.08 ^{Cd}	30.76±6.43 ^{Cc}	nd	50.13±0.11 ^{Ac}	50.13±0.11 ^{Ac}	18.16±3.52 ^{Ab}	25.81±2.87 ^{Cc}	43.97±7.14 ^{Bd}
原儿茶酸	235.3±3.43 ^{Aa}	17.44±0.18 ^f	252.74±3.52 ^{Ac}	nd	nd	nd	201.73±0.08 ^{Ba}	nd	201.73±0.08 ^{Bb}
水杨酸	7.43±0.17 ^{Bg}	16.14±13 ^{Ag}	23.57±13.65 ^{Ag}	7.42±0.07 ^{Bc}	15.43±4.47 ^{Be}	22.86±4.97 ^{Bf}	7.47±0.21 ^{Ac}	9.18±0.95 ^{Cc}	16.65±1.26 ^{Cf}
藜芦酸	18.1±0.12 ^{Ac}	175.68±21.48 ^{Ac}	193.78±21.55 ^{Ad}	17.83±0.07 ^{Ba}	91.66±3.51 ^{Bb}	109.49±3.84 ^{Bb}	17.95±0.04 ^{ABc}	84.85±1.55 ^{Cb}	102.81±1.75 ^{Cc}
羟基苯甲酸总量	325.97±5.17 ^A	2224.96±10.23 ^A	2550.93±15.26 ^A	37.4±2.56 ^C	562.82±3.21 ^B	600.22±6.12 ^C	256.26±0.00 ^B	397.17±2.8 ^C	653.43±2.8 ^B
羟基肉桂酸类									
阿魏酸	nd	14.97±10.47 ^{Bd}	14.97±10.47 ^{Ad}	nd	17.96±12.13 ^{Ac}	17.96±12.13 ^{Bd}	6.03±0.04 ^b	8.82±1.63 ^{Cd}	14.84±1.97 ^{Ad}
邻香豆酸	nd	1875.04±6.71 ^{Ca}	1875.04±6.71 ^{Ba}	nd	1984.18±2.27 ^{Aa}	1984.18±2.27 ^{Aa}	nd	38.79±0.91 ^{Ba}	38.79±0.91 ^{Cb}
绿原酸	31.14±1.52 ^C	35.99±0.14 ^{Ac}	67.13±1.81 ^{Ac}	42.76±6.22 ^A	15.91±0.97 ^{Cd}	58.67±7.46 ^{Bc}	34.61±0.02 ^{Ba}	21.14±0.19 ^{Bb}	55.74±0.27 ^{Ca}
P-香豆酸	nd	177.7±0.03 ^{Bb}	177.7±0.03 ^{Bb}	nd	210.35±2.47 ^{Ab}	210.35±2.47 ^{Ab}	nd	17.3±0.51 ^{Cc}	17.3±0.51 ^{Cc}
羟基肉桂酸总量	31.14±1.21 ^C	2103.7±11.98 ^A	2134.84±13.25 ^A	42.76±6.22 ^A	2002.13±10.07 ^B	2270.9±17.19 ^B	40.63±0.00 ^B	86.04±12.87 ^C	126.67±12.87 ^C
间苯三酚类									
根皮酚	10.82±0.05 ^B	13.83±0.05 ^A	24.65±0.94 ^B	403.3±0.07 ^A	10.72±0.86 ^B	414.02±1.37 ^A	nd	nd	nd
间苯三酚总量	10.82±0.05 ^B	13.83±0.05 ^A	24.65±0.13 ^B	403.3±0.07 ^A	10.72±0.86 ^B	414.02±0.96 ^A	nd	nd	nd
黄酮醇类									
杨梅素	nd	8.48±1.49 ^{Bd}	8.48±1.49 ^{Bd}	nd	8.44±2.34 ^{Bd}	8.44±2.34 ^{Bd}	nd	9.58±0.06 ^{Ad}	9.58±0.06 ^{Ad}
槲皮素	nd	38.92±2.21 ^{Cb}	38.92±2.21 ^{Bb}	nd	47.8±19.64 ^{Bb}	47.8±19.64 ^{Bb}	nd	71.87±1.32 ^{Ab}	71.87±1.32 ^{Ab}
山柰酚	13.78±0.32 ^A	47.51±4.63 ^{Ba}	61.29±4.86 ^{Ba}	13.44±0.22 ^{Bb}	54.1±3.46 ^{Aa}	67.55±3.75 ^{Aa}	13.98±0.26 ^A	41.65±14.27 ^{Cc}	55.63±14.73 ^{Cc}
芦丁	nd	27.94±9.34 ^{Bc}	27.94±9.34 ^{Cc}	16.4±0.01 ^a	19.36±0.64 ^{Cc}	35.76±0.79 ^{Bc}	nd	195.52±0.01 ^{Aa}	195.52±0.01 ^{Aa}
黄酮醇总量	13.78±0.32 ^B	122.85±2.15 ^C	136.64±2.48 ^C	29.84±0.73 ^A	129.7±3.76 ^B	159.54±4.91 ^B	13.98±0.26 ^B	318.56±7.37 ^A	332.54±7.67 ^A
黄烷醇类									
儿茶素	62.05±5.97 ^A	31.55±1.65 ^C	93.6±6.54 ^B	47.6±1.03 ^B	57.1±36.46 ^A	104.7±38.09 ^A	44.55±6.73 ^C	37.34±6.4 ^B	81.89±14.17 ^C
黄烷醇总量	62.05±5.97 ^A	31.55±1.65 ^C	93.6±6.54 ^B	47.6±1.03 ^B	57.1±36.46 ^A	104.7±38.09 ^A	44.55±6.73 ^C	37.34±6.4 ^B	81.89±14.17 ^C
黄烷酮类									
柚皮素	9.15±0.26 ^{AB}	49.1±6.85 ^{Ab}	58.25±7.14 ^{Aa}	9.26±0.24 ^{Aa}	48.11±12.54 ^{Bb}	57.37±12.83 ^{Bb}	8.94±0.3 ^B	42.83±9.2 ^{Ca}	51.77±9.41 ^{Ca}
柚皮苷	nd	56.55±0.34 ^{Aa}	56.55±0.34 ^{Bb}	7.27±0.05 ^b	52.5±0.24 ^{Ba}	59.77±0.38 ^{Aa}	nd	8.8±1.49 ^{Cb}	8.8±1.49 ^{Cb}
黄烷酮类总量	9.15±0.26 ^B	105.65±2.47 ^A	114.8±2.78 ^A	16.53±0 ^A	60.66±3.21 ^B	77.19±3.21 ^B	8.94±0.3 ^C	51.63±2.97 ^C	60.57±3.37 ^C
二氢黄酮类									
橙皮苷	nd	117.36±1.3 ^A	117.36±1.3 ^A	nd	105.18±2.05 ^B	105.18±2.05 ^B	nd	84.88±1.6 ^C	84.88±1.6 ^C
二氢黄酮类总量	nd	117.36±1.3 ^A	117.36±1.3 ^A	nd	105.18±2.05 ^B	105.18±2.05 ^B	nd	84.88±1.6 ^C	84.88±1.6 ^C
总酚酸	367.1±15.96 ^B	4342.48±56.7 ^A	4709.58±72.46 ^A	483.46±5.68 ^A	2801.93±1.47 ^B	3285.39±7.31 ^B	299.89±6.79 ^C	483.21±4.78 ^C	783.1±11.58 ^C
总黄酮	84.98±7.44 ^B	377.41±12.23 ^C	462.39±20.17 ^C	93.97±1.1 ^A	392.59±7.61 ^B	486.56±8.93 ^B	67.47±6.17 ^C	492.47±14.35 ^A	559.94±21.09 ^A
总酚化合物	452.08±26.44 ^B	4719.89±89.52 ^A	5171.98±127.35 ^A	577.43±4.59 ^A	3194.52±29.07 ^B	3771.95±35.07 ^B	367.36±0.63 ^C	975.68±11.16 ^C	1343.04±11.94 ^C

注: nd表示未检出; 大写字母表示青稞不同分级粉酚酸含量差异显著性($P<0.05$), 小写字母表示同一样品酚酸组成之间的差异显著性($P<0.05$)。

含量显著高于其余两种麸皮粉。3 种分级粉中均检测出黄烷酮类物质, 且粗麸粉中含量最高(114.8 μg/g DW)。由此可知, 青稞不同分级粉之间的黄酮类物质组成差异明显, 黄酮醇类物质主要以结合态形式存在于青稞面粉中, 而黄烷醇、黄烷酮和二氢黄酮类物质更多地分布于青稞粗麸粉和细麸粉中。由于不同种类酚类物质具有不同的生理活性和健康作用, 在实际应用中可以根据酚类物质的富集情况选择性地收集青稞籽粒的不同磨粉部位, 从而在改良青稞口感的同时能保留更多的酚类物质, 发挥出青稞在健康食品中的重要应用价值。

3 结论

本文比较分析了青稞面粉制备过程中产生的三

种分级粉的化学成分含量及分布差异。灰分、蛋白质、阿拉伯木聚糖、总膳食纤维、可溶性膳食纤维、游离酚酸、结合酚酸、游离黄酮、结合黄酮均在青稞粗麸粉中含量较高; 脂肪、β-葡聚糖在青稞细麸粉中含量较高; 总淀粉、直链淀粉则在面粉中含量较高。青稞粗麸粉和细麸粉相比面粉含有更加丰富的钾、镁、钙等矿物质元素。3 种青稞分级粉具有较高的谷氨酸含量, 且必需氨基酸丰富。青稞粗麸粉和面粉的限制性氨基酸均为赖氨酸, 而细麸粉的限制性氨基酸为苏氨酸。粗麸粉、面粉中的酚酸主要为羟基苯甲酸类物质, 细麸中的主要酚酸为羟基肉桂酸类物质。青稞粗麸粉、细麸粉和面粉中均含有丰富的黄酮醇类物质, 其中粗麸粉和细麸粉中是柚皮苷和橙皮苷的

主要分布部位,面粉则是芦丁主要分布部位。青稞面粉磨制过程中产生的2种麸皮粉中含有丰富的化学成分,但其组成和含量差异显著,在实际开发利用中可根据健康产品营养强化需求进行选择。本研究中仅基于基础功能性成分含量及分布对青稞面粉磨制过程中产生的分级粉进行了评价,尚未对其粉体特征及其体外生物活性进行系统研究。后续研究中有必要进一步明晰不同分级粉的粉体特征,并通过体外模拟消化等手段探究不同粉体的生物活性,以期对青稞麸皮粉资源的高效开发利用提供理论支撑。

© 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] 赵萌萌,党斌,张文刚,等.青稞分层碾磨中各层粉体的营养及功能成分的分布差异[J].食品科学技术学报,2021,39(6): 98-107. [ZHAO M M, DANG B, ZHANG W G, et al. Differences in the distribution of nutritional and functional components among layers of barley powder in layered milling[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(6): 98-107.]
- [2] 杜艳,李娟,陈正行,等.不同品种青稞籽粒不同部位粉营养价值综合评价[J].中国粮油学报,2021,36(10): 50-56. [DU Y, LI J, CHEN Z X, et al. Comprehensive evaluation of the nutritional value of flour from different parts of barley kernels[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2021, 36(10): 50-56.]
- [3] LI Y, YOU M L, LIU H B, et al. Comparison of distribution and physicochemical properties of β -glucan extracted from different fractions of highland barley grains[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 189: 91-99.
- [4] GU Y, DENG N, ZHENG B, et al. Effects of milling behavior on the distribution of nutrients and storage properties of highland barley graded powder[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 111: 103675.
- [5] 邓俊琳,夏陈,杨开俊,等.青稞全谷物、青稞米和青稞麸皮中多酚化合物的定量分析及抗氧化活性评价[J].食品工业科技, 2024, 45(21): 246-253. [DENG J L, XIA C, YANG K J, et al. Quantitative analysis and antioxidant activity evaluation of polyphenolic compounds in barley whole grain, barley rice and barley bran [J]. Food Industry Science and Technology, 2024, 45(21): 246-253.]
- [6] 顾英婕.青稞分级粉的贮藏特性及酶法改性研究[D].广州:华南理工大学,2024. [GU Y J. Research on storage characteristics and enzymatic modification of graded barley flour[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024.]
- [7] 王佳欣,黎阳,李再贵,等.不同粒径对青稞麸皮结构与功能特性及冲调稳定性的影响[J].食品科学,2022,43(3): 54-61. [WANG J X, LI Y, LI Z G, et al. Effects of different particle sizes on the structural and functional properties and brewing stability of barley bran[J]. Food Science, 2022, 43(3): 54-61.]
- [8] 赵萌萌,张文刚,党斌,等.超微粉碎对青稞麸皮粉多酚组成及抗氧化活性的影响[J].农业工程学报,2020,36(15): 291-298. [ZHAO M M, ZHANG W G, DANG B, et al. Effects of ultrafine milling on polyphenol composition and antioxidant activity of barley bran powder[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 291-298.]
- [9] LIU H L, CHEN X M, ZHANG D W, et al. Effects of highland barley bran extract rich in phenolic acids on the formation of N^ε-carboxymethyllysine in a biscuit model[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(8): 1916-1922.
- [10] 陈薇,郑学玲,牛磊,等.不同品种小麦麸皮、次粉组分分析研究[J].粮油加工,2007(6): 97-100. [CHEN W, ZHENG X L, NIU L, et al. Analysis of bran and flour fractions of different wheat varieties[J]. Grain and Oil Processing, 2007(6): 97-100.]
- [11] 国旭丹.苦荞多酚及其改善内皮胰岛素抵抗的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014. [GUO X D. Research on buckwheat polyphenols and their improvement of endothelial insulin resistance[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.]
- [12] 周娇,党斌,张杰,等.不同品种青稞面粉品质评价及面条加工适宜性研究[J].粮油食品科技,2024,32(3): 84-92. [ZHOU J, DANG B, ZHANG J, et al. Evaluation of the quality of different varieties of barley flour and its suitability for noodle processing[J]. Grain, Oil and Food Science and Technology, 2024, 32(3): 84-92.]
- [13] 党斌,杨希娟,张国权.黑小麦麸皮超微粉配粉对黑小麦加工品质的影响[J].粮油加工,2010(11): 59-63. [DANG B, YANG X J, ZHANG G Q. Influence of black wheat bran ultrafine flour on the processing quality of black wheat[J]. Grain and Oil Processing, 2010(11): 59-63.]
- [14] 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,2019. [XIA X J. Mechanism study on the effect of barley whole grain flour on hepatic and intestinal metabolism of cholesterol in rats with high-fat diet[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.]
- [15] 徐向英.燕麦蛋白提取、性质以及降血脂活性研究[D].郑州:河南工业大学,2013. [XU X Y. Study on the extraction, properties and hypolipidemic activity of oat protein[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.]
- [16] JIN H M, DANG B, ZHANG W G, et al. Polyphenol and anthocyanin composition and activity of highland barley with different colors[J]. Molecules, 2022, 27(11): 3411.
- [17] YANG X J, DANG B, FAN M T. Free and bound phenolic compound content and antioxidant activity of different cultivated blue highland barley varieties from the qinghai-Tibet plateau[J]. 2018, 23(4): 879.
- [18] 杨希娟.不同粒色青稞品质评价及酚类物质组成与生物活性研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2024. [YANG X J. Quality evaluation of barley with different grain color and research on phenolic composition and biological activity[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2024.]
- [19] LU Z X, WALKER K Z, MUIR J G, et al. Arabinoxylan fibre improves metabolic control in people with Type II diabetes[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2004, 58(4): 621-628.
- [20] IRAKLI M, LAZARIDOU A, MYLONAS I, et al. Bioactive components and antioxidant activity distribution in pearling fractions of different greek Barley Cultivars[J]. 2020, 9(6): 783.
- [21] 阎莹莹,张文会.不同剥皮率对两个品种青稞粉营养品质及其产品的影响[J].食品研究与开发,2023(15): 30-36. [YAN Y Y, ZHANG W H. Effects of different peeling rates on the nutritional quality of two varieties of barley flour and their products[J]. Food Research and Development, 2023(15): 30-36.]
- [22] 代国信,魏永忠,李鹏飞,等.同向双螺杆挤压改性对米糠可溶性膳食纤维及营养物质的影响[J].保鲜与加工,2024,24(8): 33-43. [DAI G X, WEI Y Z, LI P F, et al. Effect of coaxial twin-screw extrusion modification on soluble dietary fiber and nutrients

- of rice bran[J]. *Freshness and Processing*, 2024, 24(8): 33–43.]
- [23] JÄÄSKELÄINEN A S, HOLOPAINEN-MANTILA U, TAMMINEN T, et al. Endosperm and aleurone cell structure in barley and wheat as studied by optical and Raman microscopy[J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 57(3): 543–550.]
- [24] LIMBERGER-BAYER V M, DE FRANCISCO A, CHAN A, et al. Barley β -glucans extraction and partial characterization[J]. *Food Chemistry*, 2014, 154: 84–89.]
- [25] 文莉芳, 杨超, 张学俭, 等. 不同产地白色藜麦营养成分及氨基酸含量评价[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(19): 257–264.]
- [WEN L F, YANG C, ZHANG X J, et al. Evaluation of nutrient composition and amino acid content of white quinoa from different origins[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2024, 50(19): 257–264.]
- [26] 杨应亮, 杨希娟. 碾减率对青稞米营养品质的影响[J]. *青海农林科技*, 2024(2): 68–77.]
- [YANG Y L, YANG X J. Effect of milling reduction rate on the nutritional quality of barley rice[J]. *Qinghai Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2024(2): 68–77.]
- [27] 王怡斌, 姬汉轩, 孙晓涵, 等. 制粉工艺和加工方式对彩色小麦矿物质的影响[J]. *粮食与油脂*, 2023(5): 71–74.]
- [WANG Y B, JI H X, SUN X H, et al. Effects of milling process and processing method on minerals of colored wheat[J]. *Grain and Fats*, 2023(5): 71–74.]
- [28] 李小东, 李倩, 张悦瑶, 等. 发芽对黑小麦营养成分的影响[J]. *中国粮油学报*, 2025, 40(2): 58–67.]
- [LI X D, LI Q, ZHANG Y, H, et al. Effect of germination on the nutrient composition of black wheat[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2025, 40(2): 58–67.]
- [29] 范昱, 冯亮, 王俊珍, 等. 不同品种燕麦的营养成分分析[J]. *作物杂志*, 2024(4): 71–81.]
- [FAN Y, FENG L, WANG J Z, et al. Nutrient analysis of different varieties of oats[J]. *Journal of Crops*, 2024(4): 71–81.]
- [30] 李兴艳, 王炎, 张瑞霞, 等. 基于统计学和营养学的三种藻粉蛋白质营养价值评价与方法分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(17): 322–329.]
- [LI X Y, WANG Y, ZHANG R X, et al. Evaluation of protein nutritional value of three algal powders based on statistics and nutrition and method analysis[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2022, 43(17): 322–329.]
- [31] 杨希娟. 不同粒色青稞营养品质评价[J]. *青海农林科技*, 2023(4): 58–64.]
- [YANG X J. Evaluation of nutritional quality of barley with different grain colors[J]. *Qinghai Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2023(4): 58–64.]
- [32] 张东, 薛雅琳, 林家永. 小麦中氨基酸组成及含量分析[J]. *农业机械*, 2012(6): 71–75.]
- [ZHANG D, XUE Y L, LIN J Y. Analysis of amino acid composition and content in wheat[J]. *Agricultural Machinery*, 2012(6): 71–75.]
- [33] GONG L, JIN C, WU L, et al. Tibetan Hull-less Barley (*Hordeum vulgare* L.) as a potential source of antioxidants[J]. *Cereal Chemistry*, 2012, 89(6): 290–295.]
- [34] 顾启新, 苗颖, 付媛, 等. 热处理对燕麦麸皮的消化特性及抗氧化特性的影响[J/OL]. *食品与发酵工业*, 2024: 1–9 [2024-11-03]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.038647>.]
- [GU Q X, MIAO Y, FU Y, et al. Effects of heat treatment on the digestive and antioxidant properties of oat bran[J/OL]. *Food and Fermentation Industry*, 2024: 1–9 [2024-11-03]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.038647>.]
- [35] CHEN X, YANG K J, ZHU Y Q, et al. Distribution of free and bound phenolic compounds, β -glucan, and araboxylan in fractions of milled hullless barley[J]. *LWT*, 2022, 169: 113935.]
- [36] ZHAO Y H, YANG X J, LIU Y, et al. Enhanced phenolic content and antioxidant activity of broad bean natto following simulated *in vitro* digestion[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2024, 59(5): 2873–2883.]
- [37] SHEN Y B, ZHANG H, CHENG L L, et al. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of polyphenols extracted from black highland barley[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 1003–1012.]
- [38] GE X Z, JING L Z, ZHAO K, et al. The phenolic compounds profile, quantitative analysis and antioxidant activity of four naked barley grains with different color[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127655.]
- [39] STUPER-SZABLEWSKA K, PERKOWSKI J. Phenolic acids in cereal grain: Occurrence, biosynthesis, metabolism and role in living organisms[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(4): 664–675.]
- [40] HOSSEINIAN F S, MAZZA G. Triticale bran and straw: Potential new sources of phenolic acids, proanthocyanidins, and lignans[J]. *Journal of Functional Foods*, 2009, 1(1): 57–64.]
- [41] HUNG P V, MORITA N. Distribution of phenolic compounds in the graded flours milled from whole buckwheat grains and their antioxidant capacities[J]. *Food Chemistry*, 2008, 109(2): 325–331.]
- [42] MARTÍNEZ M, MOTILVA M J, LÓPEZ DE LAS HAZAS M C, et al. Phytochemical composition and β -glucan content of barley genotypes from two different geographic origins for human health food production[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 61–70.]