

不同品种青稞全粉品质特性

康琳¹, 但沁¹, 季成军^{2,3}, 张建玲^{2,3}, 李婧⁴, 张海霞^{2,3}, 杨艳红⁴, 陈静仪⁴, 刘伟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 杨凌 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 杨凌 712100)

摘要: 为明确青稞全粉的营养及理化特性, 为青稞全粉的加工与利用提供依据, 该文以来自青海的6个青稞品种为研究对象, 对不同品种青稞全粉的营养成分、粒径、颗粒结构特性、水合特性、吸油性、糊化特性、热特性和抗氧化特性进行比较。结果表明, 青稞全粉颗粒为椭圆形和球形, 呈现A型和V型结晶结构。昆仑14的淀粉含量(66.53%)、直链淀粉含量(16.96%)最高, 全粉粒径(112.95 μm)、崩解值(226.00 cP)最小, 在加工贮藏中具有良好的凝胶稳定性; 昆仑15的脂肪含量(2.68%)最低, 回生值(1 214.00 cP)最大, 凝胶回生性强, 可以作凝胶类产品; 昆仑17的蛋白质含量(11.86%)、脂肪含量(3.09%)、膳食纤维含量(21.56%)最高, 水溶性指数(22.43 g/100 g)最大; 昆仑19的β-葡聚糖含量(4.36%)最高; 肚里黄吸水性(7.61 g/g)、吸油性(1.38 g/g)最强, 适合应用于油炸食品和脂肪类食品中。昆仑14的总酚含量和总黄酮含量最高, 其抗氧化能力最强, 不同品种青稞全粉的品质特性存在差异。

关键词: 青稞; 全谷物; 品种; 品质; 特性

Quality Characteristics of Whole Flour of Different Varieties of Highland Barley

KANG Lin¹, DAN Qin¹, JI Chengjun^{2,3}, ZHANG Jianling^{2,3}, LI Jing⁴, ZHANG Haixia^{2,3}, YANG Yanhong⁴, CHEN Jingyi⁴, LIU Wei⁴, DU Shuangkui^{1,5*}

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Qinghai Tianyoude Technology Investment Management Group Co., Ltd., Xining 810016, Qinghai, China; 3. Qinghai Xindingxiang Grain and Oil Co., Ltd., Xining 810016, Qinghai, China; 4. Qinghai Rural Industry Development Guidance Center, Xining 810000, Qinghai, China; 5. Engineering Research Center of Grain and Oil Functionalized Processing in Universities of Shaanxi Province, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: This study aimed to clarify the nutritional and physicochemical characteristics of whole highland barley flour, providing a basis for its processing and utilization. The nutritional properties, particle size, structural properties, hydration properties, oil absorption, pasting properties, thermal properties, and antioxidant properties of different whole flour made from six varieties of highland barley from Qinghai Province were compared. The particles of whole highland barley flour were elliptical and spherical, showing A-type and V-type crystalline structures. Kunlun 14 had the highest starch content (66.53%), amylose content (16.96%), the smallest particle size (112.95 μm), and the lowest breakdown value (226.00 cP), suitable for processing and storage with good gel stability. Kunlun 15 had the lowest fat content (2.68%) and the highest setback value (1 214.00 cP), suitable for gel products with good gel retrogradation. Kunlun 17 had the highest protein content (11.86%), fat content (3.09%), dietary fiber content (21.56%), and the highest water solubility index (22.43 g/100 g). Kunlun 19 had the highest β-glucan content (4.36%). Duli Huang had the strongest water absorption (7.61 g/g) and oil absorption (1.38 g/g), suitable for fried foods and fatty foods. Kunlun 14 had the highest content of total phenols and flavonoids and the strongest antioxidant capacity. In conclusion, there were differences in the quality characteristics of whole flour made from different varieties of highland barley.

Key words: highland barley; whole grain; variety; quality; characteristic

作者简介: 康琳(1999—), 女(汉), 硕士, 研究方向: 杂粮功能营养富集技术。

*通信作者: 杜双奎(1972—), 男(汉), 教授, 博士, 研究方向: 杂粮功能化加工与评价。

引文格式:

康琳,但沁,季成军,等.不同品种青稞全粉品质特性[J].食品研究与开发,2025,46(5):72-79.

KANG Lin, DAN Qin, JI Chengjun, et al. Quality Characteristics of Whole Flour of Different Varieties of Highland Barley[J].

Food Research and Development, 2025, 46(5): 72-79.

青稞(highland barley)是禾本科大麦属一年生草本植物,具有良好的耐寒性、生长期短、高产早熟、适应性广,主要种植于西藏、青海和云南等高寒地区,是当地居民重要的膳食作物。青稞具有“三高两低”的特点,含有丰富的 β -葡聚糖,是 β -葡聚糖的优质来源。研究表明,长期食用青稞,有利于降低胆固醇、预防冠心病、肿瘤和糖尿病等^[1]。

全谷物是指未经过精细化加工或者虽然经过碾磨、粉碎、压片等加工处理,但仍然保留了谷皮、糊粉层、胚乳、胚芽及其天然营养成分的谷物。食用全谷物比单纯摄入碳水化合物以提供能量和营养,对人体来说更加健康,因其麸皮中含有多酚、膳食纤维、生育酚等生物活性成分,可以减缓慢性疾病的发展^[2]。但全谷物产品一般硬度大、颜色深、口感粗糙、缺乏弹性,适口性差,极大地影响消费者的接受度。目前以全谷物粉加工食品的方式有传统热加工、挤压膨化、高压以及发酵、发芽、酶处理等,能够改善全谷物粉营养成分,提高其加工性能和功能活性。营养与健康食品已成为新的消费选择,对全谷物粉的品质研究与加工对未来食品的研发至关重要。

目前关于青稞的研究主要集中于营养成分、多酚类物质、抗氧化活性以及青稞产品等,对不同品种青稞全粉营养成分、结构特性和理化性质研究鲜有报道。本文以来自青海的6个青稞品种为试验材料,对全粉的营养、结构特性及其理化特性进行分析,探讨不同品种间品质的差异性,以期对青稞全粉的加工及应用提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

青稞(昆仑14、昆仑15、昆仑16、昆仑17、昆仑19、肚里黄):青海新丁香粮油有限责任公司;总淀粉试剂盒、 β -葡聚糖试剂盒:爱尔兰Megazyme公司;溴化钾(色谱纯):天津市科密欧化学试剂有限公司;大豆油(精炼一级):市售;氢氧化钠(分析纯):广东光华科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

摇摆式粉碎机(114B型):瑞安市永历制药机械有限公司;激光粒度分析仪(LS13320型):美国贝克曼库尔特;X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)仪、傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy,

FTIR)仪(vertex70型):德国布鲁克(Bruker)公司;快速黏度分析仪(RVA-Tec Master型):瑞典波通仪器公司;差示扫描量热仪(Q2000型):美国Waters公司;场发射电子显微镜(Nano SEM-450型):美国FEI公司;全自动直链淀粉分析仪(Futura3型):意大利AMS Alliance公司。

1.3 试验方法

1.3.1 青稞全粉制备

取清理干净的青稞籽粒用粉碎机多次粉碎,过60目筛,得青稞全粉,密封于自封袋中并置于4℃下贮存,备用。

1.3.2 基本营养成分测定

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》中直接干燥法进行测定;淀粉含量采用总淀粉试剂盒测定;粗蛋白含量参照GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中凯氏定氮法进行测定;粗脂肪含量参照GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中索氏抽提法测定;直链淀粉含量采用全自动直链淀粉分析仪测定;膳食纤维含量参照GB 5009.88—2023《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》进行测定; β -葡聚糖含量采用 β -葡聚糖试剂盒测定。

1.3.3 粒径测定

用激光粒度分析仪湿法模式进样,测定全粉的粒径分布。

1.3.4 形貌特征

采用扫描电子显微镜观察青稞全粉的形貌特征。将样品固定,喷金,放大3000倍观察。

1.3.5 晶体结构

采用X射线衍射仪对青稞全粉晶体特性进行分析。测定参数:电压40 kV,电流40 mA, Cu靶,测定的X衍射图谱的 2θ 范围在 $4^\circ\sim 40^\circ$ 。根据衍射峰强度计算结晶度。

1.3.6 有序结构测定

采用傅里叶变换红外光谱仪测定青稞全粉的分子有序结构。采用KBr压片法制样,青稞全粉与KBr质量比为1:150。扫描波数范围选取 $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$,分辨率 4 cm^{-1} ,扫描32次。

1.3.7 水合特性测定

水合特性根据文献[3]进行测定,准确称取1.0 g青稞全粉于离心管中,加25 mL蒸馏水,涡旋后将其沸水

浴 30 min, 冷却至室温并离心, 将上清液倒入干燥铝盒中, 铝盒在 105 °C 的烘箱中恒温干燥至恒重, 并称取沉淀物和离心管的质量。根据公式计算吸水性指数 (X , g/g)、水溶性指数 (Y , g/100 g) 与膨胀势 (Z , g/g)。

$$X = \frac{m_4 - m_1}{m_0}$$

$$Y = \frac{m_3 - m_2}{m_0} \times 100$$

$$Z = \frac{m_4 - m_1}{m_0 - (m_3 - m_2)}$$

式中: m_0 为青稞全粉质量, g; m_1 为离心管质量, g; m_2 为铝盒质量, g; m_3 为铝盒和上清液干燥恒重后质量之和, g; m_4 为离心管和沉淀物质量之和, g。

1.3.8 吸油性

根据文献[4]的方法并稍作修改, 称取 1.0 g (m_0) 青稞粉于已称重的离心管 (m_1) 中, 加入 20 mL 大豆油, 涡旋振荡均匀后, 于 37 °C 静置 1 h, 1 500×g 离心 15 min 后弃去上层油样, 称取离心管与沉淀物的质量 (m_2), 计算吸油性 (O , g/g)。

$$O = \frac{m_2 - m_1 - m_0}{m_0}$$

式中: m_0 为青稞全粉质量, g; m_1 为离心管质量, g; m_2 为离心管和沉淀物质量之和, g。

1.3.9 糊化特性

配制质量浓度为 12% (干基, 质量分数) 的青稞全

粉悬浮液, 采用快速黏度分析仪进行青稞全粉糊化特性的测定。

1.3.10 热特性测定

采用差示扫描量热仪测定青稞全粉的热特性。称取 2.0 mg 青稞全粉于铝制坩埚中, 加入 6 μL 蒸馏水, 压盖密封, 常温下平衡 24 h 后, 以空铝坩埚为对照进行测定。

1.3.11 抗氧化特性

1) 提取液的制备: 称取 0.5 g 青稞粉, 用 5 mL 70% 丙酮, 超声提取 30 min, 离心并收集上清液。重复两次, 合并提取液。-20 °C 避光保存。

2) 总酚含量: 根据文献[5]进行测定; 总黄酮含量: 根据文献[6]进行测定。

3) DPPH 自由基清除率: 根据文献[7]进行测定; ABTS⁺ 自由基清除率: 将提取液稀释 5 倍, 根据文献[7]进行测定。

1.4 数据处理

数据采用平均值±标准差表示, 用 SPSS 24 软件进行统计分析, 样品间多重比较采用 Duncan 法, $P < 0.05$ 表示存在显著性差异, 用 Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 营养成分

青稞全粉的营养成分见表 1。

表 1 青稞全粉的营养成分

Table 1 Nutrient composition of whole highland barley flour

样品	水分含量/%	淀粉含量/%	直链淀粉含量/%	粗蛋白含量/%	粗脂肪含量/%	膳食纤维含量/%	β-葡聚糖含量/%
昆仑 14	9.27±0.06 ^{cd}	66.53±2.54 ^a	16.96±0.22 ^a	11.49±0.14 ^b	2.78±0.01 ^c	11.88±0.09 ^f	3.92±0.04 ^{ab}
昆仑 15	9.31±0.05 ^{cd}	59.46±2.59 ^{bc}	15.78±0.99 ^{ab}	10.84±0.22 ^c	2.68±0.01 ^c	17.31±0.21 ^c	3.89±0.16 ^{ab}
昆仑 16	9.57±0.05 ^b	58.70±3.01 ^{bc}	15.54±0.72 ^b	10.91±0.14 ^c	2.86±0.00 ^b	18.58±0.19 ^b	3.27±0.31 ^{cd}
昆仑 17	9.85±0.13 ^a	55.09±1.05 ^c	16.59±0.19 ^{ab}	11.86±0.06 ^a	3.09±0.01 ^a	21.56±0.21 ^a	3.23±0.18 ^d
昆仑 19	9.43±0.10 ^{bc}	64.17±1.41 ^{ab}	16.01±0.28 ^{ab}	9.80±0.05 ^d	2.73±0.01 ^d	14.31±0.06 ^c	4.36±0.25 ^a
肚里黄	9.16±0.22 ^d	64.13±1.81 ^{ab}	16.21±0.04 ^{ab}	10.78±0.19 ^c	2.73±0.01 ^d	15.32±0.13 ^d	3.74±0.02 ^{bc}

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

淀粉是影响青稞粉加工和食用品质的关键组分。由表 1 可知, 不同品种青稞全粉的淀粉含量为 55.09%~66.53%, 其中, 昆仑 17 的淀粉含量最低, 昆仑 14 淀粉含量最高, 不同品种之间淀粉含量差异明显。淀粉含量主要受基因、品种和环境影响。青稞全粉的直链淀粉含量为 15.54%~16.96%。淀粉功能性质与直链淀粉含量、直链淀粉与支链淀粉的比值相关^[8]。青稞全粉中粗蛋白含量为 9.80%~11.86%, 高于玉米、燕麦和其他谷物^[9]。谷物粉中蛋白质与淀粉之间存在相互作用, 能够显著影响谷物粉的糊化、凝胶性和水合特性

等。青稞粉中粗脂肪含量为 2.68%~3.09%, 低于玉米、高粱和燕麦, 是低脂类谷物。膳食纤维为人体健康促进因子, 有助于降低心血管疾病、肥胖等风险, 调节胆固醇水平。青稞全粉中含有丰富的膳食纤维 (11.88%~21.56%), 显著高于小麦、水稻、玉米、高粱和小米^[10], 昆仑 17 的膳食纤维含量较高, 昆仑 14 含量最低。β-葡聚糖是一种非淀粉多糖, 具有降低餐后血糖和胰岛素水平的效果, 对预防心血管疾病, 糖尿病等有显著作用^[11]。不同品种青稞全粉的 β-葡聚糖含量存在差异, 其中昆仑 19 的 β-葡聚糖含量最高 (4.36%), 昆仑 17

的 β -葡聚糖含量最低(3.23%),但均低于 Dang 等^[9]的研究结果,这可能与青稞品种、基因和种植环境的不同有关。

2.2 粒径结果与分析

青稞全粉的粒径见图 1。

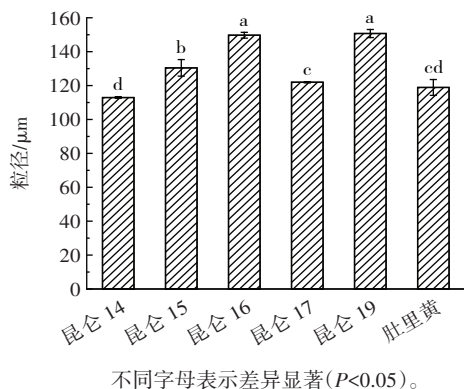


图 1 青稞全粉的粒径

Fig.1 Particle size of whole highland barley flour

粉体粒径是影响谷物粉品质的重要因素之一。由图 1 可知,青稞全粉的平均粒径为 112.95~150.70 μm 。昆仑 19 的平均粒径最大,昆仑 14 的平均粒径最小,不同品种之间差异显著。淀粉、 β -葡聚糖、蛋白质和纤维等物质的存在会影响全粉的平均粒径^[12]。有研究表明青稞大颗粒淀粉的粒径为 19.89~22.60 μm ,小部分颗粒的粒径集中在 2.58~3.33 μm ^[13],此外,平均粒径会影响直链淀粉含量,平均粒径越大,直链淀粉含量越低^[14]。

2.3 形貌特征结果与分析

青稞全粉电镜图见图 2。

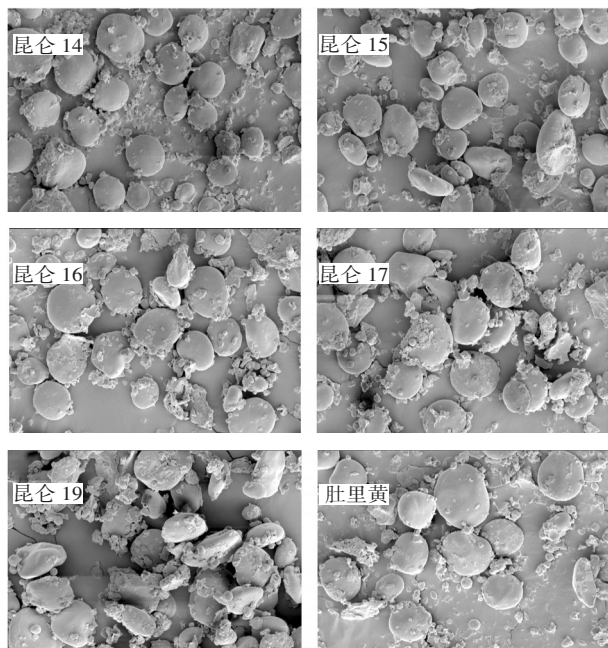


图 2 青稞全粉电镜结果

Fig.2 SEM of whole highland barley flour

由图 2 可知,不同品种青稞全粉的颗粒形貌无明显差异,青稞全粉颗粒形状大小分布较为均匀,淀粉大多数颗粒呈扁平状、扇形和椭圆形,部分小颗粒呈球形,这与 Nie 等^[13]研究结果一致。淀粉颗粒表面无裂纹,制粉时由于受到机械力的影响,全粉中的大分子纤维和蛋白质被破碎,形成不规则颗粒,大多数分散,有一部分附着在淀粉颗粒表面。

2.4 晶体结构结果与分析

青稞全粉的 X-射线衍射图见图 3。

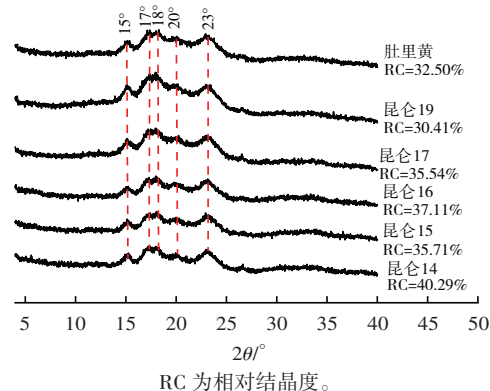


图 3 青稞全粉的 XRD 图

Fig.3 X-ray diffraction of whole highland barley flour

由图 3 可知,不同品种青稞全粉的衍射峰没有差别,均在 2θ 为 15° 、 17° 、 18° 、 20° 和 23° 处出现衍射峰,呈现 A 型和 V 型结晶特征。在 15° 和 23° 处出现单峰,在 17° 和 18° 处出现肩峰, 20° 处有小峰,呈现出 V 型衍射图谱,这与朱静等^[15]报道青稞淀粉的研究结果不同,可能与粉中存在直链淀粉-脂质复合物有关。淀粉颗粒内部结晶区的层状结构会影响衍射峰的位置和强度。相对结晶度(relative crystallinity, RC)为 32.50%~40.29%,昆仑 14 的相对结晶度最大为 40.29%,昆仑 19 的相对结晶度最小,为 30.41%。陈晓宇^[16]研究发现青稞淀粉的结晶度为 28.82%~35.17%,结晶度的差异与青稞品种有关。结晶度受到晶体大小、支链淀粉含量和链长、结晶区数目、双螺旋相互作用程度等因素的影响^[17],而结晶度会影响全粉的糊化特性和水合特性。

2.5 有序结构结果与分析

青稞全粉的傅里叶变换红外光谱见图 4,不同品种青稞全粉的有序结构见表 2。

由图 4 可知,不同品种青稞全粉的傅里叶变换红外光谱图相似,表明全粉中链构象和双螺旋结构没有差异。 $3000\sim3600\text{ cm}^{-1}$ 的宽频带是由于羟基的对称拉伸振动, 1741 cm^{-1} 处的吸收峰来自淀粉-脂质复合物的 C=O 拉伸振动。 $800\sim1200\text{ cm}^{-1}$ 波段是淀粉的图谱,反映了淀粉中 C—C、C—OH 和 C—H 键的拉伸振动。直链淀粉和支链淀粉中的短链部分可以形成双螺旋结构,即短程有序结构^[18]。对 FTIR 图谱经傅里叶去卷积后显示出有关淀粉短程有序性的 3 个特征吸收

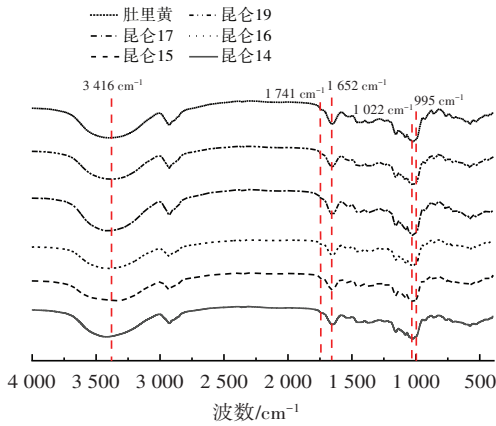


图4 青稞全粉的FTIR图

Fig.4 FTIR spectra of whole highland barley flour

表2 青稞全粉的短程有序结构

Table 2 Short-range order structures of whole highland barley flour

样品	有序度	双螺旋程度
昆仑14	1.21±0.01 ^b	1.14±0.01 ^a
昆仑15	1.34±0.01 ^a	0.92±0.00 ^b
昆仑16	1.13±0.01 ^c	1.11±0.01 ^a
昆仑17	0.98±0.01 ^d	1.08±0.01 ^a
昆仑19	1.32±0.01 ^a	1.03±0.10 ^{ab}
肚里黄	1.14±0.01 ^c	1.08±0.05 ^a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

峰,分别为波数 1 047、1 022 cm^{-1} 和 995 cm^{-1} 的吸收峰。1 047 cm^{-1} 与 1 022 cm^{-1} 处的峰强度比和 995 cm^{-1} 与 1 022 cm^{-1} 处的峰强度比分别表示淀粉结晶区域的有序度(orderliness degree, DO)和双螺旋度(double helix degree, DD)。DO 比值越大,淀粉的短程有序度越高,结晶结构越致密;DD 比值越大,淀粉的双螺旋度越高。由表 2 可知,不同品种青稞全粉的有序度为 0.98~1.34,这与 Xie 等^[19]报道的青稞淀粉的 DO (1.15)结果相近。不同品种青稞全粉的双螺旋度有差异,昆仑 14 的 DD 值最大,昆仑 15 的 DD 值最小。双螺旋结构和结晶结构受到支链淀粉链长分布、直链淀粉含量等影响^[20]。双螺旋结构会影响全粉的热特性和糊化特性,双螺旋程度越高,淀粉越难糊化,热焓值越大^[21]。

2.6 水合特性结果与分析

青稞全粉的水合特性及吸油性见表 3。

吸水性指数反映全粉的亲水性与淀粉的糊化和持水能力。由表 3 可知,不同青稞全粉的吸水性指数有明显差异,为 6.60~7.61 g/g,这与吴迪等^[3]的研究结果相近(7.26 g/g)。较小的平均粒度表明大分子纤维物质被破碎,埋藏在分子内部的氢键暴露与水发生相互作用,导致吸水性指数升高^[22]。不同品种青稞全粉的水溶性指数为 18.16~22.43 g/100 g,昆仑 17 水溶性指数最大

表3 青稞全粉的水合特性及吸油性

Table 3 Hydration properties and oil absorption of whole highland barley flour

样品	水合特性			吸油性/ (g/g)
	吸水性指数/ (g/g)	水溶性指数/ (g/100 g)	膨胀势/ (g/g)	
昆仑14	6.84±0.11 ^b	19.20±0.28 ^{bc}	8.46±0.10 ^{bc}	1.26±0.06 ^{ab}
昆仑15	6.60±0.02 ^b	18.75±0.17 ^c	8.12±0.01 ^c	1.25±0.08 ^{ab}
昆仑16	6.86±0.06 ^b	20.26±0.52 ^b	8.60±0.13 ^{bc}	1.14±0.10 ^b
昆仑17	6.70±0.33 ^b	22.43±0.05 ^a	8.64±0.41 ^b	1.31±0.11 ^{ab}
昆仑19	7.60±0.04 ^a	20.08±0.25 ^b	9.51±0.03 ^a	1.22±0.06 ^{ab}
肚里黄	7.61±0.06 ^a	18.16±0.86 ^c	10.51±0.18 ^a	1.38±0.07 ^a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

(22.43 g/100 g),肚里黄水溶性指数最小(18.16 g/100 g)。水溶性指数与粉的粒径、直链淀粉含量以及小分子糖和蛋白质等可溶性物质有关。粒径越小,可溶性物质含量越多,水溶性指数越大^[23]。膨胀势反映淀粉在高温糊化过程中的吸水特性和持水能力。不同品种青稞粉的膨胀势为 8.12~10.51 g/g,肚里黄最大(10.51 g/g),昆仑 15 最小(8.12 g/g)。膨胀势的大小与全粉中直链淀粉、 β -葡聚糖、脂肪、蛋白质含量及性质有关。膨胀势与直链淀粉含量呈负相关,而与 β -葡聚糖含量呈正相关;脂肪或蛋白质与淀粉形成复合物后,会阻止淀粉与水结合,降低膨胀势^[24]。昆仑 19 具有较大膨胀势(9.51 g/g),这与其 β -葡聚糖(4.36%)、脂肪含量高(2.73%),直链淀粉含量低(16.01%)有关。昆仑 14 膨胀势低(8.46 g/g),可能是由于其结晶度高(40.29%)。相对结晶度越大,结晶结构越致密,淀粉颗粒吸水膨胀受到抑制,膨胀势越低。

2.7 吸油性结果与分析

粉体的吸油性强能够减少食品加工过程中脂肪的流失,改善食品品质。已有研究表明全谷粉平均粒径越小,其吸油性越大^[25]。由表 3 可知,不同品种青稞全粉的吸油性有差异,为 1.14~1.38 g/g,肚里黄吸油性最大(1.38 g/g),昆仑 16 吸油性最小(1.14 g/g)。吸油性大小受粒径、淀粉、蛋白、纤维组分等因素影响。肚里黄的吸油性最大,这与其平均粒径较小、膳食纤维含量高有关。

2.8 糊化特性结果与分析

青稞全粉的糊化特性见表 4。

起糊温度表明粉样糊化的难易程度,受直链淀粉含量、结晶度的影响。直链淀粉含量高、结晶度高,起糊温度越高^[26]。由表 4 可知,不同品种青稞全粉的起糊温度为 84.28~88.35 $^{\circ}\text{C}$ 。这与郭慧珍等^[27]研究结果一致。肚里黄的起糊温度最高,这与其高的结晶度有关(40.29%)。全粉中较高的脂肪含量会抑制颗粒膨胀,从而影响淀粉的糊化特性。峰值黏度反映淀粉吸

表4 青稞全粉的糊化特性

Table 4 Pasting properties of whole highland barley flour

样品	起糊温度/°C	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	崩解值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP
昆仑14	85.90±0.00 ^{bc}	1 183.00±31.11 ^c	957.00±21.21 ^b	226.00±9.90 ^e	1 774.00±29.70 ^e	817.00±8.49 ^d
昆仑15	88.35±0.07 ^a	1 658.00±9.90 ^a	1 054.00±7.07 ^a	604.00±16.97 ^b	2 268.00±21.21 ^a	1 214.00±28.28 ^a
昆仑16	86.73±0.04 ^b	1 699.00±5.66 ^a	949.50±14.85 ^b	719.50±9.19 ^a	1 946.50±20.51 ^b	997.00±5.66 ^c
昆仑17	84.28±0.04 ^d	989.50±19.09 ^d	449.50±4.95 ^e	540.00±14.14 ^c	1 146.00±12.73 ^c	696.50±7.78 ^f
昆仑19	84.70±0.49 ^{cd}	1 016.50±17.68 ^d	632.00±19.80 ^d	384.50±2.12 ^d	1 401.00±22.63 ^d	769.00±2.83 ^e
肚里黄	86.75±1.13 ^b	1 251.00±2.83 ^b	871.00±14.14 ^c	380.00±11.31 ^d	1 950.50±17.68 ^b	1 079.50±31.82 ^b

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

水、膨胀的能力,淀粉及其直链淀粉含量会影响峰值黏度。 β -葡聚糖含量也会影响全粉糊化过程中的黏度。昆仑16的峰值黏度最高,昆仑17的峰值黏度最低。峰值黏度较高的谷物,有利于加工成面条类产品。崩解值反映全粉糊化后的热稳定性,崩解值越小,凝胶热稳定性越好。不同品种青稞全粉的崩解值差异显著,为226.00~719.50 cP。直链淀粉含量与崩解值呈负相关,直链淀粉含量越低,则吸水膨胀越快,崩解值越高^[28]。昆仑14的崩解值最小,说明其耐剪切性较强,凝胶具有较好的热稳定性。回生值反映了淀粉糊的老化程度,糊化淀粉回生过程是分子重新结合形成微晶的过程。昆仑15回生值最大,说明其淀粉糊具有强的凝胶性,易老化,适宜开发凝胶类食品。

2.9 热特性结果与分析

青稞全粉的热特性见表5。

表5 青稞全粉的热特性

Table 5 Thermal characteristics of whole highland barley flour

样品	起始温度/°C	峰值温度/°C	终止温度/°C	热焓值/(J/g)
昆仑14	57.07±0.30 ^b	58.85±0.08 ^f	70.86±0.53 ^{ab}	4.17±0.22 ^c
昆仑15	57.24±0.06 ^{ab}	61.03±0.07 ^d	70.75±0.23 ^{ab}	5.38±0.22 ^{ab}
昆仑16	57.65±0.11 ^a	61.84±0.00 ^b	70.48±0.30 ^{bc}	5.82±0.28 ^a
昆仑17	57.57±0.16 ^a	62.62±0.00 ^a	71.40±0.38 ^a	4.82±0.32 ^{bc}
昆仑19	57.25±0.21 ^{ab}	61.43±0.12 ^e	70.10±0.08 ^{bc}	5.73±0.40 ^a
肚里黄	55.40±0.08 ^c	60.37±0.00 ^e	69.83±0.00 ^c	5.57±0.13 ^a

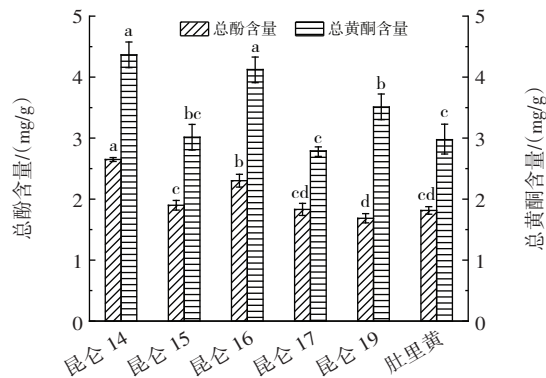
注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

热特性反映淀粉在糊化过程中有序结构的破坏过程,糊化温度可以反应淀粉的稳定性和抗凝胶化能力。糊化温度与淀粉颗粒大小、直链淀粉含量和相对结晶度等因素相关,直链淀粉含量越高,结晶度越高,破坏氢键所需的能量越高,因此糊化温度越高。由表5可知,青稞全粉的起始温度(T_0)为55.40~57.65 °C,昆仑16的 T_0 值最高,说明其稳定性最强,抗凝胶化能力也最强。昆仑14的 T_0 值最低,可能是由于其平均粒径最小,颗粒越小,破裂所需要的温度越低,更易于糊化。青稞全粉的峰值温度(T_p)为58.85~62.62 °C。 T_p 与粒径呈正相关。 T_p 越大,表明淀粉结晶区更稳定。青稞

全粉的终止温度(T_c)为69.83~71.40 °C,代表支链淀粉双螺旋解离时的温度,表明糊化已经完成。热焓值(ΔH)表示破坏双螺旋结构和颗粒内结晶度所需的能量。昆仑16的 ΔH 最大,可能与其双螺旋程度较大,有更高的结晶度有关。此外,直链淀粉含量也影响热焓值,直链淀粉含量越低,热焓值越大。

2.10 抗氧化特性结果与分析

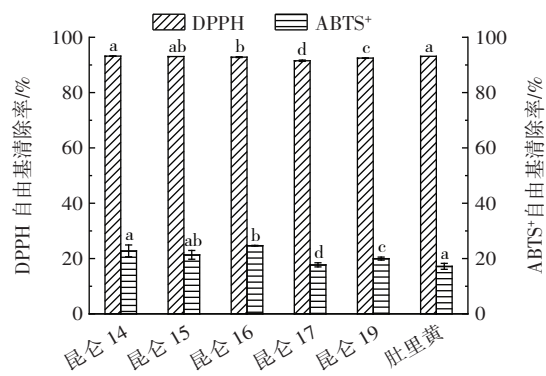
青稞全粉的总酚、总黄酮含量见图5, DPPH、ABTS⁺自由基清除率见图6。



同一指标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

图5 青稞全粉总酚、总黄酮含量

Fig.5 Total phenolic content and total flavonoid content of whole highland barley flour



同一指标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

图6 DPPH、ABTS⁺自由基清除率Fig.6 DPPH and ABTS⁺ free radical scavenging rate of whole highland barley flour

青稞富含多酚、黄酮等生物活性物质,具有较强的抗氧化能力。由图5可知,不同品种青稞全粉的总酚含量为1.69~2.65 mg/g,这与杨希娟等^[6]的研究结果相近。青稞总酚含量显著高于燕麦、小麦、水稻等谷物,是酚类物质的良好来源^[29]。青稞全粉的总黄酮含量为2.79~4.37 mg/g,这与刘露^[30]的研究结果相近。昆仑14总酚、总黄酮含量最高,可能与其粒径最小有关。粒径越小,细胞壁破裂后酚类、黄酮类物质更好地暴露,提取更充分。昆仑19总酚最低,昆仑17的总黄酮含量最低。不同品种青稞全粉总酚含量和总黄酮含量差异显著。酚类物质含量和黄酮类物质含量的差异受品种、栽培环境、提取溶剂和提取温度等因素的影响。

由图6可知,青稞全粉的DPPH自由基清除率和ABTS⁺自由基清除率分别为91.54%~93.20%和17.19%~24.66%。其中,昆仑14的DPPH自由基清除率最高,昆仑16的ABTS⁺自由基清除率最高。相关性分析表明,总酚含量($r=0.848$, $P<0.05$)、ABTS⁺自由基清除率($r=0.830$, $P<0.05$)与总黄酮含量呈现显著正相关,说明黄酮是主要的抗氧化物质,总黄酮含量越高,抗氧化能力越强。

3 结论

青稞全粉颗粒为椭圆形和球型,淀粉颗粒表面有蛋白质和纤维附着。不同品种青稞全粉的平均粒径为112.95~150.70 μm ,呈现A型和V型结晶结构。昆仑14的淀粉、蛋白质、 β -葡聚糖含量较高,脂肪含量较低,起糊温度和崩解值较低,在加工和贮藏中具有较好的凝胶稳定性。昆仑15的脂肪含量最低,黏度最高,可以作为增稠剂应用于食品工业中。昆仑17的蛋白质、脂肪、膳食纤维含量高,淀粉含量较低,具有较低的黏度,水溶性指数最大。肚里黄具有较高的吸水性和吸油性,适合用于油炸食品和脂肪类食品中。昆仑14总酚、总黄酮含量最高,DPPH自由基清除率最高,抗氧化能力最强。

全谷物食品更符合当下消费者对健康和营养的需求。目前,利用青稞加工产品还局限于青稞粉、青稞米、糌粑粉、青稞酒等传统食品,不利于青稞企业的全面发展。本文对不同品种青稞全粉的品质特性差异进行研究,为青稞全粉的开发和加工利用提供依据。

参考文献:

- [1] YU G Y, WANG F, ZHANG B L, et al. *In vitro* inhibition of platelet aggregation by peptides derived from oat (*Avena sativa* L.), highland barley (*Hordeum vulgare* Linn. var. nudum Hook. f.), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) proteins[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 577-586.
- [2] 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.

- [3] DENG Junlin, XIA Chen, YANG Kaijun, et al. Quantitative analysis and antioxidant activity of polyphenolic compounds in whole grain, rice, and bran of purple and glutinous hulless barley[J]. Science and Technology of Food Industry: 2024, 45(21): 1-16.
- [4] 吴迪,葛飞,马红,等. 不同磨粉方式对青稞全粉理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(3): 59-67.
- [5] WU Di, GE Fei, MA Hong, et al. Effects of different milling methods on physicochemical properties of highland barley whole flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(3): 59-67.
- [6] 阎莹莹,张陈,张文会. 不同稳定化处理方式对4%剥皮率青稞粉营养组分与理化特性的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(1): 25-29.
- [7] YAN Yingying, ZAHNG Chen, ZHANG Huiwen. Effects of different stabilization treatments on nutrient components and physicochemical properties of 4% peeling rate highland barley powder[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(1): 25-29.
- [8] 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.
- [9] DENG Junlin, ZHU Yongqing, CHEN Jian, et al. Contents of β -glucan, γ -aminobutyric acid and polyphenol in highland barley during germination[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils: 2018, 33(7): 19-25.
- [10] 杨希娟,党斌,徐菲,等. 不同粒色青稞酚类化合物含量与抗氧化活性的差异及评价[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 34-42.
- [11] YANG Xijuan, DANG Bin, XU Fei, et al. Difference and evaluation of phenolics contents and antioxidant activity of colored hulless barley[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 34-42.
- [12] 任妍婧,谢薇,江帆,等. 藜麦粉营养成分及抗氧化活性研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(3): 13-18.
- [13] REN Yanjing, XIE Wei, JIANG Fan, et al. Comparison on nutritional components and antioxidant activities of quinoa flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(3): 13-18.
- [14] TAO K Y, LI C, YU W W, et al. How amylose molecular fine structure of rice starch affects functional properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 204: 24-31.
- [15] DANG B, ZHANG W G, ZHANG J, et al. Evaluation of nutritional components, phenolic composition, and antioxidant capacity of highland barley with different grain colors on the Qinghai Tibet Plateau[J]. Foods, 2022, 11(14): 2025.
- [16] GAN Z C, ZHANG M, XU S Q, et al. Comparison of quinoa and highland barley derived dietary fibers influence on the physicochemical properties and digestion of rice starch[J]. Food Research International, 2023, 174(Pt 1): 113549.
- [17] 孙康娜,院珍珍,李岩,等. 青稞粉发酵工艺响应面法优化及体外降糖活性研究[J]. 中国酿造, 2024, 43(1): 230-236.
- [18] SUN Kangna, YUAN Zhenzhen, LI Yan, et al. Optimization of fermentation process of highland barley powder by response surface method and its hypoglycemic activity *in vitro*[J]. China Brewing, 2024, 43(1): 230-236.
- [19] 张翼麟,谢勇,易川虎,等. 青稞结构对淀粉体外消化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 98-103.
- [20] ZHANG Yilin, XIE Yong, YI Chuanhu, et al. Effect of structure of hull-less barley on the starch digestion *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(15): 98-103.
- [21] NIE M Z, PIAO C H, LI J X, et al. Effects of different extraction methods on the gelatinization and retrogradation properties of highland barley starch[J]. Molecules, 2022, 27(19): 6524.
- [22] XIE J J, HONG Y, GU Z B, et al. Highland barley starch: Struc-

- tures, properties, and applications[J]. *Foods*, 2023, 12(2): 387.
- [15] 朱静, 杨洁茹, 刘海波, 等. 不同提取方法对青稞淀粉结构和性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(1): 109-116.
ZHU Jing, YANG Jieru, LIU HaiBo, et al. Effects of different extraction methods on the structure and properties of highland barley starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(1): 109-116.
- [16] 陈晓宇. 产品形式对青稞中淀粉消化特性的影响及其机制分析[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
CHEN Xiaoyu. Analysis of the effect of product form on the digestive properties of starch in highland barley and its mechanism[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [17] ZAVAREZE D R E, DIAS A R G. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 83(2): 317-328.
- [18] 高丹, 敖志超, 李丰羽, 等. 萌发对薏米淀粉结构和功能特性的影响[J/OL]. *食品与发酵工业*, 1-11[2024-10-18]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.038672>.
GAO Dan, AO Zhichao, LI Fengyu, et al. Effect of germination on structure and functional properties of adlay starch[J/OL]. *Food and Fermentation Industries*: 1-11[2024-10-18]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.038672>.
- [19] XIE X Q, ZHENG M, BAI Y N, et al. Effect of *Lactiplantibacillus plantarum* and *Saccharomyces cerevisiae* fermentation on the multi-scale structure and physicochemical properties of highland barley starch[J]. *Food Bioscience*, 2023, 52: 102419.
- [20] LUO X L, CHENG B, ZHANG W, et al. Structural and functional characteristics of *Japonica* rice starches with different amylose contents[J]. *CyTA - Journal of Food*, 2021, 19(1): 532-540.
- [21] 姬艺琳, 陈文文, 董吉林, 等. 青稞全谷营养型挂面与市售挂面的营养成分及理化特性研究[J]. *轻工学报*, 2023, 38(5): 51-58.
JI Yilin, CHEN Wenwen, DONG Jilin, et al. Nutrient components and physicochemical properties of barley whole-grain nutritive noodles and commercial noodles[J]. *Journal of Light Industry*, 2023, 38(5): 51-58.
- [22] SANZ PENELLA J M, COLLAR C, HAROS M. Effect of wheat bran and enzyme addition on dough functional performance and phytic acid levels in bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48(3): 715-721.
- [23] YE G D, WU Y N, WANG L P, et al. Comparison of six modification methods on the chemical composition, functional properties and antioxidant capacity of wheat bran[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2021, 149: 111996.
- [24] 赵宁, 江帆, 解菲, 等. 糜子品种理化特性与体外抗氧化性研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(6): 91-97.
ZHAO Ning, JIANG Fan, XIE Fei, et al. Physicochemical properties and *in vitro* antioxidant activities of proso millet varieties[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(6): 91-97.
- [25] 任晓婵, 张风雪, 常婧瑶, 等. 不同粒径对超微粉碎大麦全粉品质特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(3): 227-233.
REN Xiaochan, ZHANG Fengxue, CHANG Jingyao, et al. Effects of different particle sizes on the quality characteristics of superfine barley whole flour[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(3): 227-233.
- [26] 刘爽, 王滢颖, 郭爱良, 等. 不同品种马铃薯全粉品质特性分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 59-66.
LIU Shuang, WANG Yingying, GUO Ailiang, et al. Analysis on quality properties of different varieties of potato flour[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(7): 59-66.
- [27] 郭慧珍, 杨希娟, 党斌, 等. 不同粒度青稞粉的品质特性[J]. *食品与机械*, 2023, 39(10): 150-156.
GUO Huizhen, YANG Xijuan, DANG Bin, et al. Quality characteristics of highland barley powder with different particle sizes[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(10): 150-156.
- [28] 贾靖, 孟繁港, 朱紫鑫, 等. 长期施肥对强筋专用小麦籽粒营养及磨粉品质性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(1): 190-198.
JIA Jing, MENG Fangang, ZHU Zixin, et al. Combination of high organic and low nitrogen fertilizers improves grain nutrition and grinding quality of strong gluten wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(1): 190-198.
- [29] ADOM K K, LIU R H. Antioxidant activity of grains[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(21): 6182-6187.
- [30] 刘露. 超微粉碎对青稞粉营养、理化特性的影响及其应用研究[D]. 河南: 河南工业大学, 2024.
LIU Lu. Effect of ultrafine grinding on nutritional and physicochemical properties of highland barley meal and its applications[D]. Henan: Henan University of Technology, 2024.

加工编辑: 王雪

收稿日期: 2024-07-17