

王倩, 童亚男, 王丽丽, 等. 青海、西藏主栽青稞品种营养品质及其淀粉糊化特性 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 333–342. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020156

WANG Qian, TONG Yanan, WANG Lili, et al. Nutritional Quality and Starch Gelatinization Characteristics of Main Highland Barley Cultivars from Qinghai and Tibet[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 333–342. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020156

· 分析检测 ·

青海、西藏主栽青稞品种营养品质 及其淀粉糊化特性

王倩¹, 童亚男¹, 王丽丽¹, 党斌², 吴昆仑², 杨希娟², 王凤忠^{1,*}, 刘丽娅^{1,*}

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193;

2. 青海省农林科学院, 青海西宁 810016)

摘要: 青稞是开发营养健康食品的优质原料, 为研究品种、产地等因素对青稞营养品质和加工特性的影响, 本文收集我国青稞主产区青海和西藏的 30 个主栽品种, 比较主要营养成分及其淀粉糊化特性差异。结果表明: 不同青稞营养成分差异较大, 重要功能因子 β -葡聚糖、阿拉伯木聚糖 (arabinoxylan, AX)、总酚介于 3.74%~6.54%、5.63%~11.51% 和 1.90~4.24 mg/g; 同时发现青稞 β -葡聚糖含量与总酚含量呈极显著负相关 ($P<0.01$)。品种亦显著影响淀粉糊化特性 ($P<0.05$), 样品间淀粉峰值黏度介于 468.67~4844.67 cP, 糊化温度介于 66.30~86.85 °C。主成分分析将营养成分、糊化性质共 15 个指标降维得到 5 个主成分, 发现糊化性质及非淀粉多糖、AX、淀粉、 β -葡聚糖含量在青稞品质评价中具有重要作用。经聚类分析, 筛选出 12 个高 β -葡聚糖 (5.62%~6.54%)、11 个高 AX (10.37%~11.51%)、1 个高总酚 (4.24 mg/g)、10 个高糊化温度 (81.05~86.85 °C) 青稞品种。西宁柴青 1 号兼具高 β -葡聚糖、高 AX、高糊化温度的特点, 同时总酚含量适中, 可能在高活性、低升糖指数 (GI) 青稞功能食品开发领域具有优势。

关键词: 青稞, 营养品质, 糊化特性, 主成分分析, 聚类分析

中图分类号: TS231

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)01-0333-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020156



本文网刊:

Nutritional Quality and Starch Gelatinization Characteristics of Main Highland Barley Cultivars from Qinghai and Tibet

WANG Qian¹, TONG Yanan¹, WANG Lili¹, DANG Bin², WU Kunlun²,
YANG Xijuan², WANG Fengzhong^{1,*}, LIU Liya^{1,*}

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-product Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China;

2. Qinghai Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Xining 810016, China)

Abstract: Highland barley is a high-quality raw material for developing nutritious and healthy foods. In order to study the influence of various factors such as cultivars and origin on the nutritional quality and processing characteristics of highland barley, this paper collected 30 highland barley cultivars from Qinghai and Tibet, the primary producing areas of highland barley in China, to explore the variations in main nutritional composition and starch gelatinization characteristics. The results revealed significant variations in the nutritional composition of different highland barley samples. The contents of vital functional factors such as β -glucan, arabinoxylan (AX), and total phenols ranged from 3.74% to 6.54%, 5.63% to

收稿日期: 2024-02-21

基金项目: 国家重点研发计划子课题 (2022YFF1100501-5); 青海省重大科技专项 (2021-NK-A3); 山西省重点研发计划项目课题 (202102140601016-2); 国家重点研发计划子课题 (2021YFD1600100-403); 云南省科技计划项目 (202204BI090012)。

作者简介: 王倩 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮油化学与营养学, E-mail: w15235949630@163.com。

*** 通信作者:** 王凤忠 (1972-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 功能食品与生物活性物质, E-mail: wangfengzhong@sina.com。

刘丽娅 (1982-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 全谷物与植物蛋白功能食品, 食品胶体与界面化学, E-mail: liuliya1218@163.com。

11.51%, and 1.90 to 4.24 mg/g, respectively. Additionally, a highly significant negative correlation ($P<0.01$) was observed between the content of β -glucan and the total phenols. Furthermore, the cultivars also significantly influenced the starch gelatinization characteristics ($P<0.05$), with the peak viscosity of starch ranging from 468.67 to 4844.67 cP and the gelatinization temperature ranging from 66.30 to 86.85 °C. The principal component analysis reduced the 15 indicators of nutritional components and pasting properties to 5 principal components, revealing that pasting properties, non-starch polysaccharides, AX, starch, and β -glucan played important roles in the quality evaluation of highland barley. Cluster analysis identified 12 highland barley varieties with high β -glucan (ranging from 5.62% to 6.54%), 11 with high AX (ranging from 10.37% to 11.51%), 1 with high total phenol (4.24 mg/g), and 10 with high pasting temperature (ranging from 81.05 to 86.85 °C). Xining Chaiqing No.1 with the characteristics of high β -glucan, high AX, high gelatinization temperature, and moderate total phenolic content, may have advantages in the development of functional food with high activity and low glycemic index (GI).

Key words: highland barley; nutritional quality; gelatinization characteristics; principal component analysis; cluster analysis

青稞俗称裸大麦,是我国特有的大麦品种,主要分布在西藏自治区和青海、四川、甘肃、云南四省藏区,是青藏高原藏族聚集地区的第一大粮食作物。青稞具有“三高两低”,即高蛋白、高膳食纤维、高维生素和低脂肪、低糖的特点。研究表明,青稞中的 β -葡聚糖、阿拉伯木聚糖(arabinoxylan, AX)、酚酸等有益成分赋予青稞食品调节血糖、降血脂、预防心血管疾病、提高免疫力等生物活性^[1-3]。已证实 β -葡聚糖和酚酸协同作用可以调节肠道菌群,提高有益菌群的相对丰度^[4],二者含量较高的大麦具有较低的淀粉水解率^[5],适合低升糖指数(GI)食品的研发。随着国人健康意识的增强,青稞营养价值及其保健作用已被广泛认可,消费者对多样化的青稞营养健康功能食品需求日益增加。

青稞营养品质和加工特性与产地、品种等因素密切相关。研究表明青稞面条黏弹性和食味品质、青稞蛋糕的比容和感官评分^[6],青稞面包比容、硬度^[7]、黏结性、淀粉消化率^[8]均受到青稞原料的影响。黑、白两种不同的青稞炒制的糌粑粉的风味物质同样存在很大差异^[9]。因此,不同来源青稞品种品质差异成为青稞育种和加工领域关注的重点。迄今为止,关于不同来源青稞品质的研究多集中于营养成分的定量分析。例如周红等^[10]基于12种青海黑青稞,分析了蛋白质(12.19%~14.07%)、 β -葡聚糖(3.91%~7.50%)、直链淀粉(18.96%~25.94%)的含量,发现 β -葡聚糖、灰分、粗纤维等品种间差异较大。也有研究报道了西藏、青海、四川具代表性的8个地区15个青稞主栽品种的营养成分,发现支链淀粉、直链淀粉、总黄酮、 β -葡聚糖和总多酚含量为对青稞综合品质影响最大的指标^[11]。淀粉是青稞的主要成分,结构和性质差异会表现出不同的加工特性^[12]。糊化特性作为淀粉的一种重要理化性质,与食物增稠或胶凝行为模式直接相关^[13],对面制品的加工及食用品质均有显著影响^[14]。前人研究表明峰值黏度与面制品的弹性呈负相关,崩解值与面制品比容、黏性、弹性、总分呈负相关^[15]。糊化特性也会影响淀粉的消化性,通常来说,较高的糊化温度,意味着其较难被酶解,消化率低,在低GI食品中具有应

用潜力^[16]。

然而,目前针对青海、西藏两大主产区不同品种以及不同产区相同品种的营养品质的研究数据仍较为匮乏,同时,针对两大产地不同来源青稞淀粉糊化性质的差异尚不完全清楚。目前食品加工中更倾向于利用生物活性物质含量高^[17]且糊化温度较高的青稞品种,用于低GI食品研发^[18]。基于此,本研究采集青海、西藏30种青稞主栽品种,全面分析其营养品质和淀粉糊化特性,通过主成分分析、聚类分析获得青稞品质特性综合评价结果,并筛选活性物质含量高及具有慢消化潜力的青稞品种,为青稞食品的优质加工原料筛选提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

青海、西藏30份青稞参试样品(表1) 青海省农林科学院、西藏自治区农牧科学院提供;无水氯化铁 阿拉丁试剂(上海)有限公司;地衣酚 Sigma 公司;木糖标准品、乙醇 国药集团化学试剂北京有限公司;K-BGLU β -葡聚糖含量检测试剂盒、K-TSTA 总淀粉含量检测试剂盒、K-AMYL 直链淀粉含量检测试剂盒 美国 Megazyme 公司;总酚试剂盒 苏州格锐思生物科技有限公司。

FOSS CT 293 Cyclotec™旋风磨 丹麦 FOSS 分析仪器有限公司;TB-214 分析天平 美国 Denver 公司;SP-Max 2300A 光吸收型全波长酶标仪 上海闪谱生物科技有限公司;UV-9000 紫外可见分光光度计 上海元析仪器有限公司;LUX-24 恒温水浴锅

北京陆希科技有限公司;DF-101S 恒温加热磁力搅拌器 予华(巩义)仪器公司;TGL-16 台式高速冷冻离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 青稞全粉的制备 青稞籽粒清理除杂并清洗干净后45 °C烘干,旋风磨粉碎过60目筛备用。

1.2.2 青稞营养成分的测定 参照GB/T 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》采用第一法测定水分含量,用于营养成分干基含量的计算;参照GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋

表 1 青稞品种信息
Table 1 Information of highland barley cultivars

品种	地区	年份	品种	地区	年份	品种	地区	年份
海西柴青1号	青海	2022	门源昆仑17号	青海	2022	西宁肚里黄	青海	2022
海西昆仑15号	青海	2022	门源昆仑18号	青海	2022	藏18号	西藏	2021
海南柴青1号	青海	2021	门源肚里黄	青海	2022	藏20号	西藏	2021
海南昆仑14号	青海	2022	贵德昆仑14号	青海	2022	藏青25	西藏	2022
海南昆仑15号	青海	2021	贵德昆仑15号	青海	2022	藏青320	西藏	2021
海南昆仑16号	青海	2021	西宁柴青1号	青海	2022	藏青2000	西藏	2022
海南昆仑17号	青海	2022	西宁北青9号	青海	2022	藏青3000	西藏	2022
门源北青8号	青海	2022	西宁昆仑14号	青海	2022	苟芒紫	西藏	2022
门源昆仑14号	青海	2022	西宁昆仑15号	青海	2022	喜马拉雅22	西藏	2022
门源昆仑15号	青海	2022	西宁昆仑18号	青海	2022	隆子黑	西藏	2022

白质的测定》采用第三法测定蛋白质含量;参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》采用第一法测定脂肪含量;参照 NY/T 2006-2011《谷物及其制品中 β -葡聚糖含量的测定》,采用 β -葡聚糖试剂盒测定 β -葡聚糖含量;参照 NYT 2335-2013《谷物中戊聚糖含量的测定 分光光度法》测定 AX 含量;非淀粉多糖含量为 β -葡聚糖与 AX 含量之和;采用总淀粉试剂盒测定总淀粉含量^[19];采用直链淀粉试剂盒测定直链淀粉含量^[20];采用总酚试剂盒测定总酚含量^[21]。

1.2.3 青稞粉糊化特性的测定 参照 GB/T 24853-2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速黏度仪法》,采用快速黏度分析仪进行测定。称取 4.00 g 青稞全粉于铝筒中,加水量为 25.00 g(按 14% 湿基校正),测定程序:50 ℃ 保持 1 min,随后以 12.2 ℃/min 升温至 95 ℃,保持 2.5 min,再以 11.8 ℃/min 降温至 50 ℃,保持 2 min;转速以 960 r/min 持续 10 s,随后维持 160 r/min。

1.3 数据处理

每组数据至少重复三次实验,实验结果用“平均值±标准差”表示。采用 Excel 2019、SPSS Statistics 25 进行数据的统计与整理,利用单因素 ANOVA 检验进行显著性分析,采用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 青稞营养品质分析

青稞营养成分含量见表 2。青稞粉水分含量为 9.61%~12.24%,在此基础上计算营养成分的干基含量。淀粉的平均含量为 57.93%,变异范围分布在 51.23%~63.42%,变异系数(CV)较小,为 6.76%。以往研究证实,青稞淀粉以支链淀粉为主,其占比可达 74%~78%,有些糯青稞占比接近 100%^[22]。虽然直链淀粉占比较小,但其结构紧密,使淀粉不易糊化,被认为是影响淀粉消化率的关键因素^[23]。本研究中,样品直链淀粉均值为 20.88%,分布在 15.26%~27.70%,占总淀粉的比例大约为 26.96%~44.69%,CV 达 13.92%。青稞中的第二大成分蛋白质,与小麦蛋白质含量(9.22%~12.43%)相近^[24],但赖氨酸和色氨酸的含量高于小麦、水稻、玉米等谷物^[25]。本研究青稞样品蛋白质均值为 10.25%,分布在 7.56%~14.34%,CV 达到 14.41%,样品间差异显著($P<0.05$)。青稞脂肪含量低于燕麦(5%~9%)^[26]、玉米(2.60%~3.23%)^[27]等谷物,且含有多种对人体健康有益的脂肪酸,如亚油酸、亚麻酸、棕榈酸等^[22]。本研究中,样品脂肪均值为 1.91%,分布在 1.34%~2.53%,CV 达 16.58%。供试样品蛋白质、淀粉、脂肪含量与朱明霞等^[28]的研究结果相近。

表 2 不同来源青稞全粉营养成分分析
Table 2 Analysis of nutritional composition of different highland barley flour

品种	淀粉(%)	直链淀粉(%)	蛋白质(%)	脂肪(%)	非淀粉多糖(%)	β -葡聚糖(%)	AX(%)	总酚(mg/g)
海西柴青1号	63.12±1.00 ^{ab}	20.39±0.75 ^{de}	11.36±0.04 ^{ef}	1.93±0.02 ^{ef}	17.03±0.14 ^c	6.41±0.11 ^a	10.62±0.22 ^c	1.90±0.05 ^g
海西昆仑15号	57.09±1.35 ^d	22.08±0.68 ^{cd}	11.69±0.03 ^c	1.64±0.03 ^h	16.58±0.17 ^d	6.00±0.04 ^b	10.59±0.15 ^c	2.18±0.06 ⁱ
海南柴青1号	56.61±0.73 ^{de}	15.26±0.81 ^g	10.06±0.01 ^h	1.66±0.05 ^h	13.38±0.42 ^{ij}	5.69±0.21 ^c	7.69±0.59 ^{gh}	2.89±0.10 ^f
海南昆仑14号	60.98±0.47 ^{bc}	17.63±0.46 ^{ef}	13.46±0.05 ^b	2.05±0.03 ^d	16.28±0.28 ^{de}	5.78±0.06 ^{bc}	10.50±0.32 ^c	2.49±0.07 ^h
海南昆仑15号	51.23±1.39 ^f	15.72±0.68 ^{fg}	9.90±0.02 ⁱ	1.55±0.02 ⁱ	13.46±0.55 ^{ij}	5.44±0.11 ^d	8.07±0.54 ^{fg}	2.87±0.17 ^f
海南昆仑16号	53.49±0.87 ^e	17.25±0.79 ^f	9.28±0.04 ^k	1.97±0.02 ^e	14.16±0.22 ^h	4.95±0.12 ^{ef}	9.21±0.18 ^{de}	3.48±0.23 ^{cd}
海南昆仑17号	53.44±0.93 ^e	22.33±1.76 ^{cd}	7.84±0.02 ⁿ	2.20±0.02 ^c	12.04±0.12 ^k	5.24±0.29 ^{de}	6.80±0.17 ⁱ	3.29±0.08 ^d
门源北青8号	54.69±0.84 ^e	21.48±1.84 ^{cd}	14.34±0.02 ^a	2.02±0.02 ^{de}	10.28±0.04 ^l	4.65±0.09 ^f	5.63±0.1 ^g	2.65±0.01 ^{gh}
门源昆仑14号	61.66±0.52 ^{ab}	25.16±0.73 ^b	10.39±0.07 ^g	2.39±0.07 ^b	14.62±0.19 ^g	5.08±0.21 ^e	9.54±0.04 ^d	3.66±0.02 ^{bc}
门源昆仑15号	62.54±0.86 ^{ab}	27.7±0.27 ^a	9.24±0.06 ^k	2.38±0.04 ^b	15.04±0.27 ^f	5.62±0.21 ^{cd}	9.43±0.13 ^d	2.38±0.06 ^h
门源昆仑17号	53.48±1.02 ^e	22.96±1.54 ^{cd}	10.51±0.03 ^g	1.92±0.04 ^{ef}	11.75±0.17 ^k	3.74±0.20 ⁱⁱ	8.01±0.14 ^g	3.48±0.27 ^{cd}
门源昆仑18号	54.71±1.11 ^e	20.56±1.74 ^{de}	9.77±0.04 ^{ji}	1.77±0.04 ^g	12.77±0.07 ^j	4.34±0.04 ^{gh}	8.43±0.06 ^f	3.30±0.13 ^d

续表 2

品种	淀粉(%)	直链淀粉(%)	蛋白质(%)	脂肪(%)	非淀粉多糖(%)	β -葡聚糖(%)	AX(%)	总酚(mg/g)
门源肚里黄	63.40±0.94 ^a	18.03±0.73 ^{ef}	8.94±0.05 ⁱ	1.34±0.05 ^k	14.15±0.22 ^h	5.29±0.02 ^{de}	8.86±0.2 ^e	2.94±0.15 ^{ef}
贵德昆仑14号	55.74±0.83 ^{de}	21.23±1.14 ^d	10.18±0.07 ^h	1.67±0.01 ^h	13.14±0.30 ^j	4.87±0.13 ^{ef}	8.27±0.42 ^{fg}	3.56±0.03 ^c
贵德昆仑15号	60.85±1.47 ^{bc}	19.09±0.65 ^e	11.50±0.04 ^d	1.89±0.04 ^f	16.78±0.34 ^{cd}	6.42±0.21 ^a	10.37±0.18 ^c	2.04±0.05 ^{ig}
西宁柴青1号	59.35±0.71 ^c	20.59±0.70 ^{de}	11.82±0.04 ^c	2.03±0.01 ^{de}	17.43±0.14 ^b	6.46±0.15 ^a	10.97±0.09 ^{bc}	3.10±0.05 ^e
西宁北青9号	56.55±0.94 ^{de}	24.82±0.01 ^{bc}	10.73±0.09 ^f	1.35±0.01 ^k	15.64±0.29 ^e	4.36±0.11 ^{gh}	11.29±0.21 ^{ab}	3.22±0.12 ^{de}
西宁昆仑14号	61.13±1.65 ^{bc}	22.79±0.41 ^{cd}	10.18±0.04 ^h	1.76±0.04 ^s	15.94±0.36 ^e	4.87±0.10 ^{ef}	11.07±0.33 ^b	3.74±0.08 ^b
西宁昆仑15号	61.32±0.80 ^b	23.77±0.52 ^{bc}	10.49±0.02 ^g	1.41±0.04 ^k	18.05±0.18 ^a	6.54±0.01 ^a	11.51±0.18 ^a	3.05±0.09 ^{ef}
西宁昆仑18号	61.47±1.65 ^b	22.05±0.57 ^{cd}	10.70±0.05 ^f	2.04±0.02 ^{de}	15.06±0.24 ^f	4.32±0.06 ^h	10.75±0.29 ^{bc}	4.24±0.09 ^a
西宁肚里黄	56.86±1.16 ^{de}	17.53±0.96 ^{ef}	9.63±0.12 ^j	2.01±0.07 ^{de}	16.50±0.24 ^d	5.23±0.08 ^{de}	11.27±0.2 ^{ab}	3.04±0.05 ^{ef}
藏18号	53.84±1.47 ^e	21.81±1.80 ^{cd}	8.36±0.02 ^m	2.05±0.01 ^d	13.12±0.16 ^j	5.70±0.09 ^c	7.43±0.12 ^h	2.60±0.12 ^{gh}
藏20号	51.33±1.68 ^f	22.60±1.83 ^{cd}	7.56±0.04 ^o	1.91±0.01 ^{ef}	14.79±0.05 ^{fg}	6.34±0.01 ^a	8.45±0.06 ^f	2.58±0.02 ^{gh}
藏青25	60.51±0.94 ^{bc}	22.89±0.21 ^{cd}	11.45±0.04 ^{de}	1.44±0.06 ^j	13.48±0.25 ^{ij}	5.04±0.08 ^{ef}	8.44±0.3 ^f	2.95±0.06 ^{ef}
藏青320	54.32±1.18 ^e	19.10±0.74 ^e	8.84±0.03 ^j	1.76±0.01 ^s	13.94±0.11 ^h	5.50±0.04 ^{cd}	8.44±0.11 ^f	2.58±0.16 ^{gh}
藏青2000	55.14±0.95 ^c	19.86±1.41 ^{de}	8.38±0.06 ^m	1.96±0.01 ^{ef}	13.55±0.15 ⁱ	5.73±0.17 ^c	7.82±0.13 ^{gh}	2.67±0.14 ^g
藏青3000	63.42±1.68 ^a	19.96±0.51 ^{de}	11.31±0.05 ^e	2.53±0.04 ^a	13.10±0.23 ^j	5.04±0.04 ^{ef}	8.06±0.25 ^{fg}	3.31±0.08 ^d
苟芒紫	58.00±1.40 ^{cd}	20.82±0.56 ^d	9.75±0.10 ^j	2.34±0.01 ^b	15.71±0.23 ^e	4.79±0.04 ^f	10.92±0.22 ^{bc}	3.47±0.08 ^{cd}
喜马拉雅22	58.37±1.34 ^{cd}	17.46±0.59 ^{ef}	9.87±0.09 ^{ij}	1.93±0.06 ^{ef}	13.44±0.09 ^{ij}	4.86±0.04 ^{ef}	8.59±0.12 ^{ef}	3.05±0.06 ^{ef}
隆子黑	63.21±1.57 ^{ab}	23.14±0.38 ^c	9.83±0.01 ^{ij}	2.39±0.02 ^b	14.19±0.07 ^h	5.95±0.16 ^{bc}	8.24±0.17 ^{fg}	3.63±0.07 ^{bc}
平均值	57.93	20.88	10.25	1.91	14.51	5.34	9.18	3.01
范围	51.23~63.42	15.26~27.70	7.56~14.34	1.34~2.53	10.28~18.05	3.74~6.54	5.63~11.51	1.90~4.24
变异系数(CV, %)	6.76	13.92	14.41	16.58	12.47	13.41	16.59	18.01

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$), 表3同。

青稞非淀粉多糖主要以 β -葡聚糖和 AX 为主^[29], 且青稞中的 β -葡聚糖含量位居麦类作物之首^[30], 高于燕麦(2.94%~5.13%)^[31]、小麦(0.5%~1.1%)^[32]、黑麦(0.5%~1.0%)^[33]。30 种供试青稞非淀粉多糖均值为 14.51%, 分布在 10.28%~18.05%, 其中 β -葡聚糖均值为 5.34%, 分布在 3.74%~6.54%, CV 为 13.41%; AX 均值为 9.18%, 含量分布在 5.63%~11.51%, CV 达到 16.59%。

总酚含量受籽粒颜色影响较大, 通常黑青稞酚含量较高^[34]。30 种供试青稞总酚均值为 3.01 mg/g, 分布在 1.90~4.24 mg/g, 品种间差异大, CV 达到 18.01%。本研究证实, 黑青稞昆仑 17 号、隆子黑等总酚含量较高, 但略低于周红等^[10]测定的黑青稞总酚含量(4.63 mg/g); 同时西宁昆仑 18 号、藏青 3000 等黄青稞总酚含量也较高, 可能与其品种、种植技术、生长条件、基因型有关^[3]。

同一品种种植在不同地区的青稞营养成分含量也有差异, 以昆仑 15 号青稞为例, 海西昆仑 15 号蛋白质含量最高, 为 11.69%, 而门源昆仑 15 号含量最

低, 为 9.24%; 西宁昆仑 15 号的 β -葡聚糖、AX 含量最高, 分别为 6.54%、11.51%, 而海南昆仑 15 号的最低, 分别为 5.44%、8.07%。综合来看, 30 种青稞营养成分含量存在一定差异, 这可能与品种、地区的气候(温度、降水、海拔)^[35]等有关。

2.2 青稞糊化性质分析

由表 3 可知, 青稞粉峰值黏度变幅为 468.67~4844.67 cP, CV 达 35.47%, 受品种变化差异较大。该值越大, 说明结合水能力越强, 淀粉颗粒膨胀程度越大^[36]。崩解值变幅为 387.67~2490.5 cP, CV 达 36.57%, 该值越高, 其溶胀后易被破坏, 热稳定性最差^[37]。回生值变幅为 122.00~2625.50 cP, CV 为 34.26%, 其与青稞粉糊化冷却后的稳定性有关, 该值越高, 淀粉糊冷却后更易老化。糊化温度反映青稞粉起始糊化难易程度, 变幅为 66.30~86.85 $^{\circ}\text{C}$, 其中海南昆仑 14 号、海南昆仑 15 号、门源昆仑 15 号、门源昆仑 18 号的糊化温度较高。总之, 不同品种青稞粉的糊化性质有显著性差异($P<0.05$), 对于糊化性质与加工品质的关系待后续分析。

表 3 不同来源青稞粉糊化性质指标
Table 3 Gelatinization characteristics of different highland barley flour

品种	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	崩解值(cP)	终止黏度(cP)	回生值(cP)	峰值时间(min)	糊化温度($^{\circ}\text{C}$)
海西柴青1号	4844.67±2.08 ^r	2408.33±5.86 ^b	2436.33±15.53 ^b	4534.00±14.73 ^d	2125.67±5.51 ^h	6.05±0.04 ^{cd}	68.60±0.05 ^h
海西昆仑15号	4442.00±18.19 ^q	2113.00±7.03 ^s	2339.00±15.72 ^d	4330.33±11.93 ^f	2217.33±5.51 ^f	6.02±0.04 ^{cd}	68.63±0.06 ^h
海南柴青1号	4045.00±7.07 ^a	2141.50±4.95 ^f	1912.00±15.56 ⁱ	4767.50±2.12 ^a	2625.50±2.12 ^a	6.08±0.01 ^{cd}	69.33±0.04 ^h
海南昆仑14号	3076.67±4.51 ^s	1840.33±16.92 ^m	1343.03±9.17 ^p	3823.67±12.70 ^l	2076.67±16.50 ^j	6.24±0.10 ^b	86.85±0.91 ^a
海南昆仑15号	2418.00±2.83 ^b	1211.02±16.97 ⁿ	1216.5±3.54 ^r	2878.04±4.24 ^s	1680.50±0.71 ^q	5.93±0.01 ^d	85.55±0.07 ^{ab}
海南昆仑16号	3861.00±4.24 ^c	1372.00±5.66 ^s	2490.5±7.78 ^a	3675.00±2.83 ^o	2269.00±4.24 ^c	5.50±0.04 ^f	66.85±0.07 ⁱ

续表 3

品种	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	崩解值(cP)	终止黏度(cP)	回生值(cP)	峰值时间(min)	糊化温度(℃)
海南昆仑17号	4630.00±8.49 ^{cd}	2246.00±5.66 ^e	2383.50±3.54 ^c	4404.01±5.66 ^e	2158.02±2.83 ^s	5.93±0.03 ^d	68.58±0.04 ^h
门源北青8号	4067.50±9.19 ^e	2477.50±4.95 ^a	1594.50±3.54 ^m	4654.02±1.41 ^b	2122.50±3.54 ^{hi}	6.44±0.05 ^a	81.05±0.57 ^d
门源昆仑14号	678.33±2.08 ^e	231.33±4.93 ^y	443.67±7.02 ^u	678.67±10.60 ^x	447.33±6.66 ^x	5.27±0.07 ^e	83.67±0.49 ^c
门源昆仑15号	1140.33±9.45 ^e	696.67±7.09 ^w	418.67±10.02 ^v	1561.33±13.65 ^w	857.67±6.11 ^w	5.49±0.03 ^f	85.53±0.06 ^b
门源昆仑17号	2947.00±9.90 ^{cd}	1543.00±7.07 ^p	1392.50±3.54 ^o	3177.50±4.95 ^r	1757.00±2.83 ^o	6.07±0.09 ^{ad}	83.53±0.53 ^c
门源昆仑18号	2605.50±7.78 ^d	1328.50±6.36 ⁱ	1281.00±5.66 ^q	2744.00±2.83 ^u	1403.50±0.71 ^t	5.97±0.05 ^{cd}	85.58±0.04 ^{ab}
门源肚里黄	1680.33±16.65 ^k	648.01±5.20 ^s	1102.33±8.50 ^t	1565.67±11.06 ^w	957.67±6.11 ^v	5.49±0.10 ^f	82.00±0.95 ^d
贵德昆仑14号	468.67±6.11 ^f	79.67±3.06 ^z	387.67±5.77 ^w	201.67±3.51 ^y	122.00±2.65 ^y	3.71±0.03 ^h	73.22±0.40 ^f
贵德昆仑15号	3967.67±14.98 ⁱ	1876.67±14.22 ^l	2231.00±14.02 ^e	4380.33±19.14 ^e	2583.67±6.03 ^b	5.98±0.04 ^{cd}	71.01±0.05 ^{gh}
西宁柴青1号	2758.00±13.75 ^o	1568.00±8.54 ^o	1190.33±6.66 ^s	3466.67±10.60 ^p	1925.67±7.09 ^j	6.22±0.04 ^b	85.50±0.05 ^b
西宁北青9号	3643.00±12.17 ^k	2154.67±15.53 ^f	1585.00±7.21 ^m	3763.33±13.65 ^m	1638.67±2.52 ^r	6.31±0.10 ^{ab}	73.30±0.35 ^f
西宁昆仑14号	3394.67±8.96 ^l	1862.33±9.29 ^j	1522.33±12.90 ⁿ	3669.00±8.72 ^o	1826.67±6.51 ⁿ	5.95±0.04 ^d	76.60±2.82 ^e
西宁昆仑15号	4031.00±6.56 ^m	2260.00±13.53 ^{de}	1754.33±9.29 ^k	4584.00±19.08 ^c	2320.67±7.77 ^d	6.18±0.04 ^{bc}	68.55±0.05 ^h
西宁昆仑18号	3017.33±2.89 ⁿ	1435.67±14.57 ^r	1648.33±9.07 ^l	2577.67±13.32 ^v	1158.67±17.56 ^u	5.71±0.10 ^c	70.48±0.94 ^{gh}
西宁肚里黄	3942.67±15.63 ^p	1865.33±5.03 ^l	2070.67±5.69 ^h	3721.33±7.51 ⁿ	1809.33±12.74 ⁿ	5.93±0.07 ^d	70.97±0.06 ^{gh}
藏18号	4485.00±2.83 ⁱ	2348.50±17.68 ^c	2146.00±1.41 ^f	4226.00±2.83 ^h	1774.50±4.95 ^o	5.87±0.09 ^d	66.30±0.28 ⁱ
藏20号	4449.00±4.24 ^{hi}	2136.03±5.66 ^f	2322.50±14.85 ^d	4140.02±4.24 ⁱ	1978.00±2.83 ^k	5.97±0.05 ^{cd}	69.68±0.53 ^h
藏青25	4260.01±10.54 ^v	2030.01±17.44 ^b	2220.00±11.79 ^e	4258.67±18.93 ^g	2328.67±1.53 ^d	5.98±0.17 ^{cd}	69.52±1.26 ^h
藏青320	3451.00±2.83 ^g	1647.00±5.66 ⁿ	1752.50±9.19 ^k	3261.50±2.12 ^q	1541.01±7.07 ^s	5.87±0.09 ^d	71.03±0.04 ^{gh}
藏青2000	4335.03±5.66 ^h	2275.50±4.95 ^d	2108.50±2.12 ^g	4140.50±4.95 ⁱ	1859.00±1.41 ^m	6.00±0.10 ^{cd}	66.48±0.67 ⁱ
藏青3000	4371.33±16.50 ^w	1958.67±6.50 ^{ij}	2426.00±6.08 ^b	3867.33±8.39 ^k	1985.33±11.02 ^k	5.89±0.08 ^d	68.58±0.03 ^h
苟芒紫	3114.67±10.97 ⁿ	1120.67±15.63 ^y	2070.67±7.51 ^h	2786.00±6.08 ^t	1718.67±16.80 ^p	5.53±0.07 ^f	71.25±0.48 ^g
喜马拉雅22	3848.67±13.58 ^s	1921.67±14.22 ^k	1887.00±14.42 ^j	4321.67±16.50 ^f	2360.02±14.73 ^c	6.09±0.08 ^c	83.08±0.16 ^{cd}
隆子黑	4473.67±17.62 ^y	1982.67±8.50 ⁱ	2481.01±7.94 ^a	4072.00±16.46 ^j	2102.67±13.43 ⁱ	5.85±0.04 ^d	68.58±0.06 ^h
平均值	3367.71	1666.00	1719.90	3425.65	1772.48	5.83	68.58
范围	468.67~4844.67	79.67~2477.5	387.67~2490.50	201.67~4767.50	122.00~2625.50	3.71~6.44	66.30~86.85
变异系数(CV, %)	35.47	38.31	36.57	35.01	34.26	8.63	9.51

2.3 营养品质、糊化性质各指标间的相关性分析

为了解青稞营养品质与糊化性质间的关系,对其进行相关性分析,结果见图 1。 β -葡聚糖含量与总酚含量呈极显著负相关($P<0.01$),因此兼具高 β -葡聚糖和高酚酸的品种匮乏。淀粉含量分别与 AX 呈显著正相关($P<0.05$),与非淀粉多糖含量呈极显著正相关($P<0.01$)。糊化性质指标间相关性较强,其中糊

化温度与峰值黏度、谷值黏度、崩解值呈极显著负相关($P<0.01$),与终止黏度呈显著负相关($P<0.05$);峰值黏度与谷值黏度、崩解值、终止黏度、回生值之间呈极显著正相关($P<0.01$);谷值黏度与终止黏度、崩解值之间呈极显著正相关($P<0.01$),这与倪香艳等^[38]研究结果类似。但营养成分与糊化性质之间的相关性结果显示仅总酚含量与糊化性质有一定负相关,其它指标并未有显著相关性。糊化性质可能是受到青稞多个营养成分的综合影响。例如海西柴青 1 号、海南柴青 1 号峰值黏度、谷值黏度、终止黏度、崩解值、回生值较高,糊化温度较低,这可能与较高的淀粉含量、 β -葡聚糖含量、较低直链淀粉含量有关,而贵德昆仑 14 号与之相反,这与段娇娇等^[39]的研究结果类似。此外,淀粉颗粒大小、直链淀粉-脂质复合物等也会对糊化性质产生影响^[40]。

2.4 营养品质、糊化性质主成分分析(PCA)

在对不同青稞品种进行品质评价时,仅考虑单一指标或多个指标的优劣会有些片面,而应综合考虑所有指标,对其进行全面、系统的评价。主成分分析通过降低数据维数,将多指标简化为综合指标,解析出主要影响因素,简化评价过程。

对 30 种青稞的营养成分含量及糊化性质数据标准化后进行 PCA,以特征值大于 1 为标准,共提

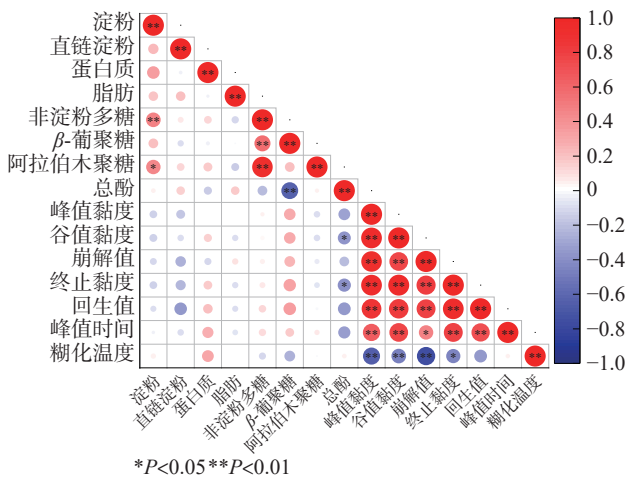


图 1 青稞粉营养品质及糊化性质相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of nutritional quality and gelatinization characteristics of highland barley flour

取 5 个主成分,如表 4~表 5 所示。前 5 个主成分的累计贡献率为 83.739%,可以包含青稞品质的绝大部分原始信息,即可用这 5 个主成分代表青稞的营养成分和糊化性质。依据向量载荷系数,发现决定主成分 1 的主要是淀粉的糊化性质:峰值黏度、谷值黏度、崩解值、终止黏度、回生值;决定主成分 2 的主要是非淀粉多糖、AX、淀粉、 β -葡聚糖;决定主成分 3 的主要是糊化温度以及蛋白质;决定主成分 4 的主要是脂肪;决定主成分 5 的主要是脂肪及总酚。主成分 1 与主成分 2 贡献率较高,表明淀粉的糊化性质及非淀粉多糖、AX、淀粉、 β -葡聚糖含量在青稞品质评价中具有最重要的作用^[41]。通过特征向量与各

指标标准化值计算各主成分得分,并计算综合得分 F(表 6),该值可反映青稞的综合品质。排名靠前的品种其峰值黏度、谷值黏度、崩解值、终止黏度、回生值、非淀粉多糖、AX、淀粉、 β -葡聚糖含量较高。

表 4 主成分的特征值及贡献率

Table 4 Principal component eigenvalues and contribution rate

成分	特征值	方差贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	5.760	38.397	38.397
2	2.636	17.574	55.971
3	1.645	10.967	66.938
4	1.413	9.418	76.356
5	1.107	7.383	83.739

表 5 主成分的向量载荷系数、特征向量

Table 5 Vector load coefficient and eigenvector of the principal component

指标	向量载荷系数					特征向量				
	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分5	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分5
淀粉	-0.109	0.696	-0.040	0.412	0.132	-0.019	0.264	-0.025	0.292	0.119
直链淀粉	-0.261	0.195	-0.235	0.492	0.204	-0.045	0.074	-0.143	0.348	0.184
蛋白质	0.101	0.353	0.677	0.328	-0.005	0.017	0.134	0.412	0.232	-0.005
β -葡聚糖	0.436	0.519	-0.190	-0.419	0.478	0.076	0.197	-0.115	-0.296	0.432
AX	-0.020	0.859	-0.139	0.037	-0.408	-0.003	0.326	-0.085	0.026	-0.368
非淀粉多糖	0.156	0.926	-0.193	-0.132	-0.153	0.027	0.351	-0.117	-0.093	-0.138
脂肪	-0.081	-0.064	-0.235	0.588	0.573	-0.014	-0.024	-0.143	0.416	0.518
总酚	-0.461	-0.239	-0.238	0.503	-0.522	-0.080	-0.091	-0.145	0.356	-0.471
峰值黏度	0.966	-0.131	-0.138	0.135	-0.042	0.168	-0.05	-0.084	0.095	-0.038
谷值黏度	0.942	-0.080	0.082	0.138	-0.015	0.164	-0.03	0.05	0.098	-0.014
崩解值	0.874	-0.145	-0.338	0.113	-0.076	0.152	-0.055	-0.206	0.080	-0.068
终止黏度	0.979	-0.056	0.115	0.082	-0.035	0.170	-0.021	0.070	0.058	-0.032
回生值	0.930	-0.003	0.162	0.040	-0.069	0.161	-0.001	0.098	0.028	-0.062
峰值时间	0.734	0.081	0.455	0.205	-0.054	0.127	0.031	0.277	0.145	-0.048
糊化温度	-0.541	0.094	0.734	0.006	0.110	-0.094	0.036	0.446	0.004	0.099

表 6 青稞的各主成分得分

Table 6 Principal component scores of highland barley

品种	各主成分得分					综合得分F	排名
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅		
海西柴青1号	1.245	1.523	-0.245	-0.303	0.924	0.906	1
海西昆仑15号	1.004	0.991	-0.020	-0.606	-0.039	0.594	4
海南柴青1号	0.941	-0.753	0.431	-1.021	-0.319	0.187	11
海南昆仑14号	0.183	1.356	2.060	0.030	0.520	0.688	3
海南昆仑15号	-0.489	-0.804	1.388	-1.988	-0.332	-0.464	26
海南昆仑16号	0.283	-0.872	-1.023	-0.355	-1.120	-0.326	23
海南昆仑17号	0.687	-1.747	-1.075	0.506	0.608	-0.082	19
门源北青8号	0.572	-1.557	2.666	1.223	1.119	0.521	6
门源昆仑14号	-2.365	0.625	-0.232	1.004	1.028	-0.780	29
门源昆仑15号	-1.714	1.034	-0.065	0.336	2.540	-0.316	22
门源昆仑17号	-0.586	-1.407	1.149	1.012	-0.693	-0.361	25
门源昆仑18号	-0.798	-0.912	1.018	-0.055	-0.610	-0.484	27
门源肚里黄	-1.344	0.321	0.318	-1.518	-0.381	-0.712	28
贵德昆仑14号	-2.788	-0.564	-1.103	-1.396	-0.130	-1.710	30
贵德昆仑15号	0.996	1.315	0.144	-0.746	0.734	0.732	2
西宁柴青1号	-0.113	1.620	1.018	-0.063	0.330	0.443	7
西宁北青9号	0.106	0.456	0.351	0.463	-2.125	0.055	14
西宁昆仑14号	-0.152	0.728	-0.101	0.948	-1.470	0.047	15

续表 6

品种	各主成分得分					综合得分F	排名
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅		
西宁昆仑15号	0.843	1.786	-0.473	-0.298	-0.897	0.587	5
西宁昆仑18号	-0.754	0.286	-0.759	1.679	-1.639	-0.341	24
西宁肚里黄	0.369	0.496	-0.572	-0.302	-0.950	0.081	13
藏18号	0.700	-1.080	-0.990	-0.400	1.043	0.011	18
藏20号	0.799	-0.550	-1.210	-1.133	0.819	0.037	16
藏青25	0.642	-0.183	0.298	0.422	-0.686	0.282	10
藏青320	0.058	-0.572	-0.322	-1.260	0.200	-0.260	21
藏青2000	0.721	-0.844	-0.814	-0.622	0.632	0.033	17
藏青3000	0.453	-0.393	-0.425	1.900	0.820	0.355	8
苟芒紫	-0.406	0.289	-1.115	0.780	-0.539	-0.231	20
喜马拉雅22	0.366	-0.568	0.960	0.098	-0.296	0.159	12
隆子黑	0.542	-0.018	-1.257	1.665	0.910	0.348	9

2.5 不同青稞品种聚类分析

在实际生产应用中,期望筛选高生物活性、低淀

粉消化性的青稞品种,应用于低 GI 食品研发。因此对 30 种青稞 β -葡聚糖、AX、总酚含量以及糊化温

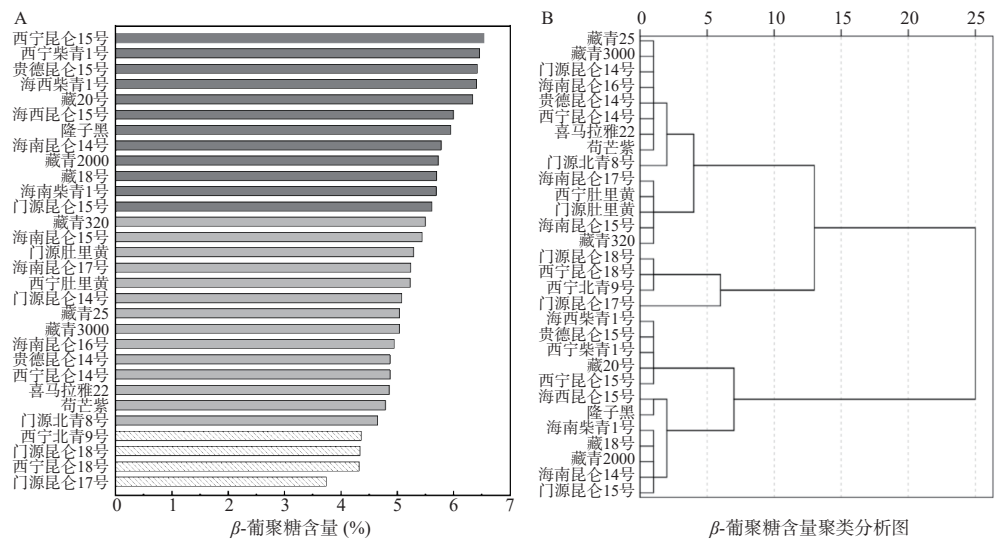


图 2 青稞 β -葡聚糖含量柱形图及聚类分析图

Fig.2 Histogram and cluster analysis of β -glucan content in highland barley

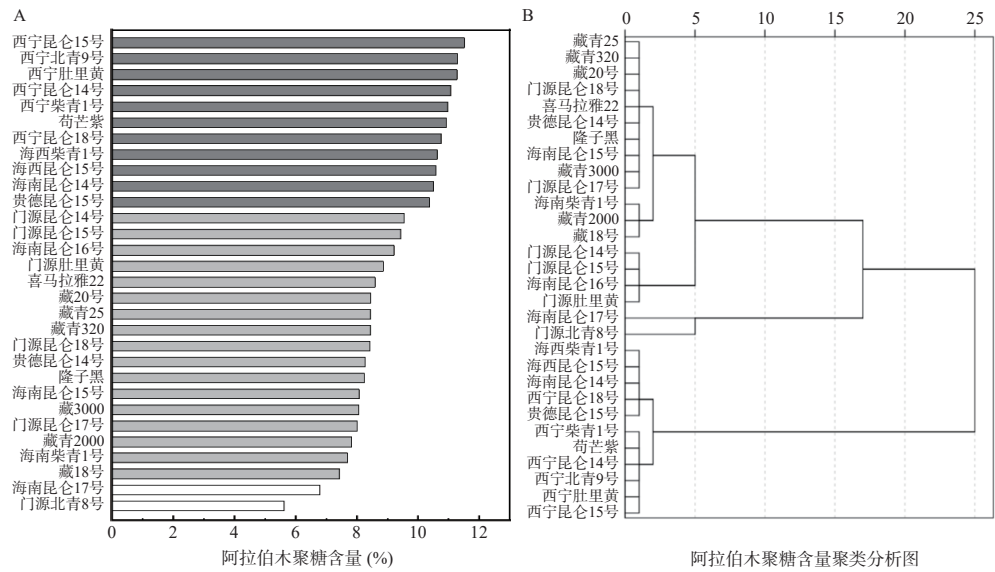


图 3 青稞 AX 含量柱形图及聚类分析图

Fig.3 Histogram and cluster analysis of AX content in highland barley

度进行聚类分析,如图2所示,在距离为10时,将青稞按照 β -葡聚糖含量分为3类,第一类 β -葡聚糖含量中等(4.65%~5.50%),包括藏青320等14种青稞;第二类 β -葡聚糖含量较低(3.74%~4.36%),包括西宁北青9号等4种青稞;第三类 β -葡聚糖含量高(5.62%~6.54%),包括西宁昆仑15号等12种青稞。在距离为10时(图3),将青稞按照AX含量分为3类,第一类AX含量中等(7.43%~9.54%),包括门源昆仑14号等17种青稞;第二类AX含量较低(5.63%~6.80%),为海南昆仑17号、门源北青8号;第三类AX含量高(10.37%~11.51%),包括西宁昆仑15号等11种青稞。在距离为5时(图4),将青稞按照总酚含量分为3类,第一类总酚含量中等(2.87~3.74 mg/g),包括西宁昆仑14号等19种青稞;第二类总酚含量较低(1.90~2.67 mg/g),包括藏青2000等10种青稞;第三类总酚含量高(4.24 mg/g

g),为西宁昆仑18号。在距离为4时(图5),将青稞按照糊化温度分为3类,第一类糊化温度低(66~71.25 °C),包括苟芒紫等17种青稞;第二类糊化温度中等(73.22~76.6 °C),包括西宁昆仑14号等3种青稞;第三类糊化温度高(81.05~86.85 °C),包括海南昆仑14号等10种青稞。

综合聚类分析结果,获得高 β -葡聚糖、AX,中等总酚含量的品种有西宁柴青1号和西宁昆仑15号,其中西宁柴青1号具有较高的糊化温度,为85.50 °C,而西宁昆仑15号糊化温度较低,为68.55 °C,提示前者可能更适宜低GI功能食品的研发。高 β -葡聚糖,中等AX、总酚含量的品种有海南柴青1号、隆子黑,但这两种青稞其糊化温度都较低。西宁昆仑15号、海南柴青1号、隆子黑可能适用于作为对生物活性物质要求高但加工温度较低的产品原料。此处分析得到的青稞与PCA结果较一致,从表6中可

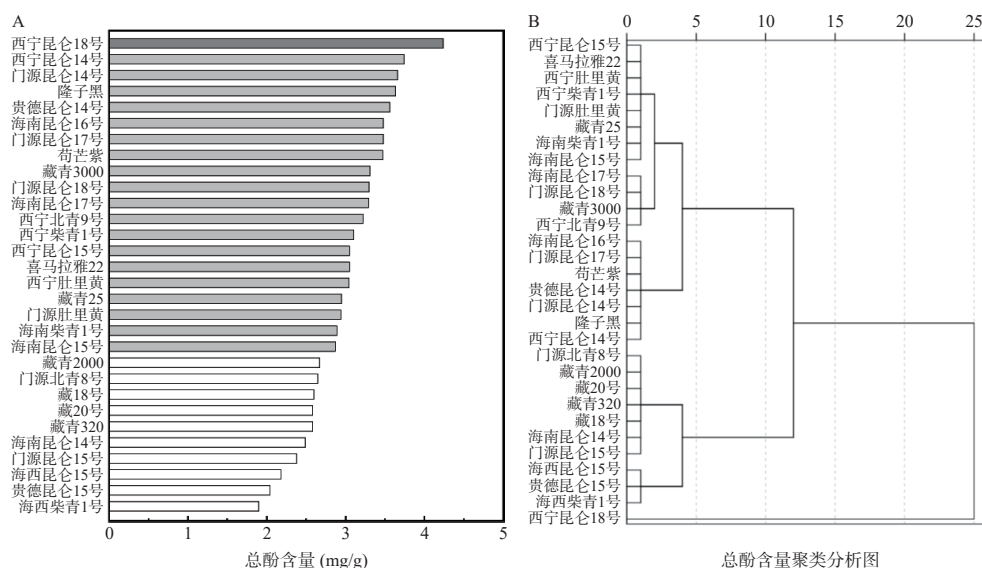


图4 青稞总酚含量柱形图及聚类分析图

Fig.4 Histogram and cluster analysis of total phenols content in highland barley

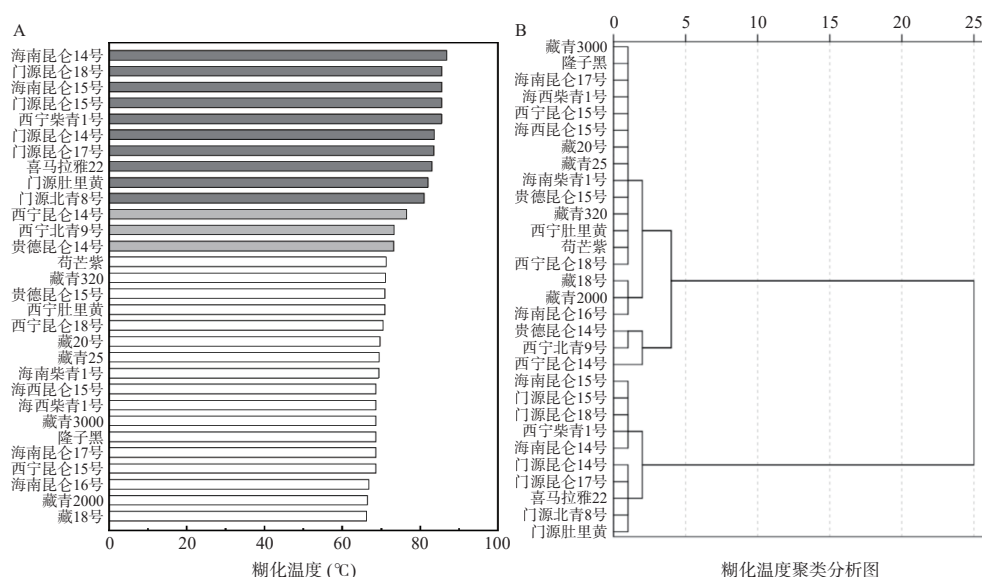


图5 青稞糊化温度柱形图及聚类分析图

Fig.5 Histogram and cluster analysis of gelatinization temperature in highland barley

以得出这四种 β -葡聚糖、AX、总酚含量较高的青稞西宁柴青 1 号、西宁昆仑 15 号、海南柴青 1 号及隆子黑的排名分别为 7、5、11、9, 排名较高。

3 结论

对青海、西藏主栽的 30 种青稞进行营养品质及糊化特性分析。结果表明, 30 种青稞的蛋白质、非淀粉多糖、 β -葡聚糖、AX、脂肪、直链淀粉、总酚含量差异较大, 淀粉含量差异较小; 相同品种种植在不同地区的青稞营养成分也有差异; 不同品种青稞糊化性质也有显著差异 ($P < 0.05$), 峰值黏度、崩解值、回生值等变异系数达 30% 以上。相关性分析结果显示, 重要功能因子 β -葡聚糖含量与总酚含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 淀粉含量与 AX、非淀粉多糖含量呈显著正相关 ($P < 0.05$); 总酚含量与糊化性质呈负相关。利用 PCA 将营养成分与糊化性质降维得到 5 个主成分, 发现糊化性质、非淀粉多糖、AX、淀粉及 β -葡聚糖含量在青稞品质评价中具有重要作用。通过聚类分析, 得到高 β -葡聚糖青稞 12 种 (5.62%~6.54%), 高 AX 青稞 11 种 (10.37%~11.51%), 高总酚青稞 1 种 (4.24 mg/g), 高糊化温度青稞 10 种 (81.05~86.85 $^{\circ}\text{C}$); 综合聚类分析结果筛选得到高 β -葡聚糖、AX, 中等总酚含量的品种: 西宁昆仑 15 号、西宁柴青 1 号, 其中西宁柴青 1 号具有较高的糊化温度; 高 β -葡聚糖, 中等 AX、总酚含量的品种: 海南柴青 1 号、隆子黑, 二者糊化温度较低, 相关研究结果为青稞食品加工中适宜原料的选择提供参考。

© 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] HUI M J, DANG B, WEN G Z, et al. Polyphenol and anthocyanin composition and activity of highland barley with different colors[J]. *Molecules*, 2022, 27(11): 3411.
- [2] LIN S, GUO H, GONG J D B, et al. Phenolic profiles, β -glucan contents, and antioxidant capacities of colored Qingke (Tibetan hulless barley) cultivars[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 81: 69–75.
- [3] GE X, JING L, 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.
- [4] 杨智浩. 裸燕麦酚类化合物对糖脂代谢及肠道菌群调控研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2020. [YANG Z H. The modulatory effect of phenolic compounds from naked oat on decreasing blood glucose, lipid and intestinal microbiota[D]. Ningbo: Ningbo University, 2020.]
- [5] TAMURA M, IMAIZUMI R, SAITO T, et al. Studies of the texture, functional components and *in vitro* starch digestibility of rolled barley[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 672–678.
- [6] 刘新红. 青稞品质特性评价及加工适宜性研究[D]. 西宁: 青海大学, 2015. [LIU X H. Study on quality evaluation and processing suitability of hulless barley[D]. Xining: Qinghai University, 2015.]
- [7] WU D Y, YU L W, GUO L, et al. Effect of highland barley on rheological properties, textural properties and starch digestibility of Chinese steamed bread[J]. *Foods*, 2022, 11: 1091.
- [8] YU L W, MA Y R, ZHAO Y Y, et al. Effect of hulless barley flours on dough rheological properties, baking quality, and starch digestibility of wheat bread[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 785847.
- [9] 郭雅红, 佟立涛, 王丽丽, 等. 基于 GC-IMS 分析炒制温度对青稞糌粑粉挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 326–335. [GUO Y H, TONG L T, WANG L L, et al. GC-IMS-Based analysis of the effect of frying temperature on volatile flavor substances in highland barley Tsampa flour[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(14): 326–335.]
- [10] 周红, 张杰, 张文刚, 等. 青海黑青稞营养及活性成分分析与评价[J]. *核农学报*, 2021, 35(7): 1609–1618. [ZHOU H, ZHANG J, ZHANG W G, et al. Analysis and evaluation of nutrition and active components of Qinghai black highland barley[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2021, 35(7): 1609–1618.]
- [11] 陈鲁鹏, 姚晓华, 姚有华, 等. 青藏高原青稞品质评价体系构建及生态区划分析[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(4): 667–678. [CHEN L P, YAO X H, YAO Y H, et al. Construction of quality evaluation system and analysis of ecological regionalization of Qinghai-Tibet plateau hulless barley[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(4): 667–678.]
- [12] LIU J, LI Q, ZHAI H, et al. Effects of the addition of waxy and normal hull-less barley flours on the farinograph and pasting properties of composite flours and on the nutritional value, textural qualities, and *in vitro* digestibility of resultant breads[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(10): 3141–3149.
- [13] ASARE E K, JAISWAL S, MALEY J, et al. Barley grain constituents, starch composition, and structure affect starch *in vitro* enzymatic hydrolysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(9): 4743–4754.
- [14] 潘秋晓, 彭莉, 陈建省, 等. 小麦高代育种品系的蛋白质含量和淀粉组分与面粉糊化特性相关性分析[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 34–40. [PAN Q X, PENG L, CHEN J S, et al. Correlation analysis of wheat protein and starch components to flour gelatinization characteristics using advanced breeding lines[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(2): 34–40.]
- [15] 卢朝银. 黄淮麦区主栽小麦品种品质特性与河南烩面品质关系研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023: 51–52. [LU C Y. Study on the relationship between quality characteristics of main wheat varieties in Huanghuai wheat area and Henan stewed noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023: 51–52.]
- [16] 王鼎, 刘真真, 李旭, 等. 高直链淀粉小麦西农 836 淀粉理化性质及消化特性分析[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(8): 998–1004. [WANG D, LIU Z Z, LI X, et al. Analysis of starch physicochemical and digestive properties of high amylose wheat Xinong 836[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(8): 998–1004.]
- [17] LOSKUTOV I G, KHLESTKINA E K. Wheat, barley, and oat breeding for health benefit components in grain[J]. *Plants*, 2021, 10(1): 86.
- [18] QI X, TESTER R. Impact of starch gelatinization on digestibility and human health[J]. *Starch-Stärke*, 2023, 75(5–6): 2200195.
- [19] LI Q, PAN Z, LIU J, et al. A mutation in *Waxy* gene affects amylose content, starch granules and kernel characteristics of barley (*Hordeum vulgare*) [J]. *Plant Breed*, 2019, 138: 513–523.
- [20] GENG D H, TANG N, TANG X J, et al. Insights into the tex-

- tural properties and starch digestibility on rice noodles as affected by the addition of maize starch and rice starch[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 173: 114265.
- [21] HAO Z L, LIANG L, LIU H, et al. Exploring the extraction methods of phenolic compounds in daylily (*Hemerocallis citrina* Baroni) and its antioxidant activity[J]. *Molecules*, 2022, 27: 2964.
- [22] GUO T, HORVATH C, CHEN L, et al. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley (Qingke): A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 103: 109–117.
- [23] LÜ X, HONG Y, ZHOU Q, et al. Structural features and digestibility of corn starch with different amylose content[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 692673.
- [24] 何小东, 苏丽, 袁倩倩, 等. 不同品种小麦粉品质特性及应用[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(14): 99–104. [HE X D, SU L, YUAN Q Q, et al. Quality characteristics and application of flour prepared from different wheat cultivars[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(14): 99–104.]
- [25] YAN W W, YAO H Y Y, NIE S P, et al. Mineral analysis of hulless barley grown in different areas and its β -glucan concentrates[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2016, 2(1): 1186139.
- [26] 李明静, 罗蕊, 户学妹, 等. 燕麦的营养成分及药理作用研究进展[J]. *特种经济动植物*, 2023, 26(7): 136–141. [LI M J, LUO R, HU X M, et al. Research progress on nutrient composition and pharmacological action of oat special[J]. *Economic Animals and Plants*, 2023, 26(7): 136–141.]
- [27] 霍路曼, 李艺, 杜瑞煊, 等. 不同品种青贮玉米品质分析研究[J]. *饲料研究*, 2023(14): 90–93. [HUO L M, LI Y, DU R H, et al. Quality analysis of silage maize of different varieties[J]. *Feed Research*, 2023(14): 90–93.]
- [28] 朱明霞, 白婷, 靳玉龙, 等. 不同青稞品种风味物质分析[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(12): 146–152. [ZHU M X, BAI T, JIN Y L, et al. Analysis of flavor substances of different highland barley varieties[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(12): 146–152.]
- [29] 杜亚飞, 刘绪, 李秋颖, 等. 减压内部沸腾法提取青稞非淀粉多糖工艺优化[J]. *西藏农业科技*, 2022, 44(2): 13–17. [DU Y F, LIU X, LI Q Y, et al. Optimization on extraction process of non-starch polysaccharide from highland barleys by decompressing inner ebullition method[J]. *Tibet Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 44(2): 13–17.]
- [30] 次仁央宗. 浅谈青稞的成分研究进展及其开发利用现状[J]. *西藏科技*, 2020(9): 11–12. [CI R Y Z. A brief discussion on the research progress and development and utilization of composition of highland barley[J]. *Tibet Science and Technology*, 2020(9): 11–12.]
- [31] 田志芳, 梁霞, 孟婷婷, 等. 不同燕麦品种的营养与品质性状分析[J]. *农产品加工*, 2019(8): 57–58, 61. [TIAN Z F, LIANG X, MENG T T, et al. Analysis of nutrition and quality between different oat varieties[J]. *Farm Products Processing*, 2019(8): 57–58, 61.]
- [32] CAO H, LI R, SHI M, et al. Promising effects of β -glucans on gelation in protein-based products: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 256: 127574.
- [33] BIEL W, KAZIMIERSKA K, BASHUTSKA U. Nutritional value of wheat, triticale, barley and oat grains[J]. *Acta Scientiarum Polonorum-zootechnica*, 2020, 19(2): 19–28.
- [34] 车富红, 冯声宝, 李善文, 等. 几个青稞主产区不同青稞品种的微量成分差异分析[J]. *酿酒科技*, 2019(11): 113–118. [CHE F H, FENG S B, LI S W, et al. Differences in trace components of highland barley of different varieties from different regions[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2019(11): 113–118.]
- [35] LATSAMY T. 青藏高原不同气候区青稞品质比较研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021: 42–44. [LATSAMY T. Comparative study on the quality of highland barley in different climatic regions on the Qinghai-Tibet plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021: 42–44.]
- [36] 姚哲, 张辉, 彭金龙, 等. 不同品种大米营养组分与糊化、酶解特性的相关性分析[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(13): 173–180. [YAO Z, ZHANG H, PENG J L, et al. Correlation analysis between nutrient components, pasting properties and enzymatic hydrolysis properties of different varieties of rice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(13): 173–180.]
- [37] 刘萍, 徐慧静. 挤压处理对青稞粉质构性质及消化性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 49(17): 28–34. [LIU P, XU H J. Evaluation of extrusion process on texture properties and digestibility of barley meal[J]. *Food Research and Development*, 2019, 49(17): 28–34.]
- [38] 倪香艳, 顾军强, 钟葵, 等. 燕麦品种的品质性状及聚类分析[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(10): 18–24. [NI X Y, GU J Q, ZHONG K, et al. Quality characteristics of oat cultivars and cluster analysis[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(10): 18–24.]
- [39] 段娇娇, 覃小丽, 金剑波, 等. 不同品种青稞全粉对重组粉面团流变学性质及面条品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(16): 208–215. [DUAN J J, TAN X L, JIN J B, et al. Effects of highland barley varieties on rheological properties of reconstituted dough and the quality of noodles[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(16): 208–215.]
- [40] XIE J, HONG Y, GU Z, et al. Highland barley starch: Structures, properties, and applications[J]. *Foods*, 2023, 12(2): 387.
- [41] 何玉婷, 扎西群措, 何俊洁, 等. 西藏地区30份青稞籽粒营养品质分析和综合评价[J]. *西藏农业科技*, 2022, 44(2): 8–12. [HE Y T, ZHA X Q C, HE J J, et al. Nutritional quality analysis and comprehensive evaluation of 30 highland barley grains in Tibet[J]. *Tibet Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 44(2): 8–12.]