

α -淀粉酶降低青稞快消化淀粉含量工艺优化

Study on the process of α -amylase reduces the content of rapidly digestion starch in highland barley

张花 宋晓凡 李岩 孙康娜 院珍珍

ZHANG Hua SONG Xiao-fan LI Yan SUN Kang-na YUAN Zhen-zhen

(青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016)

(College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

摘要:目的:提高和增加青稞的附加值。方法:以黑青稞粉为原料,利用 α -淀粉酶制备快消化淀粉含量低的青稞粉,以快消化淀粉含量为指标,通过响应面试验优化降低青稞快消化淀粉含量的最优工艺条件,并通过 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制率评价其体外降糖活性。结果: α -淀粉酶制备快消化淀粉含量低的青稞粉的最佳工艺条件为 α -淀粉酶添加量150 U/g、料液比1:10 (g/mL)、酶解时间2 h、酶解温度65℃,此时黑青稞中快消化淀粉含量为11.6%,慢消化淀粉含量为13.0%,抗性淀粉含量为75.4%。酶解后,青稞粉对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的最高抑制率分别为75.86%,75.54%。结论:试验方法可大幅度降低青稞中快消化淀粉含量。

关键词:青稞;快消化淀粉; α -淀粉酶; α -葡萄糖苷酶

Abstract: Objective: This study aimed to help with improving and increasing the added value of highland barley. Methods: Black highland barley powder was used as raw material to prepare low content rapidly digestible starch by α -amylase. Highland barley powder with low content of fast digestible starch was prepared by α -amylase. The optimal technological conditions for reducing the content of fast digestible starch in highland barley were optimized by response surface test with the content of fast digestible starch as the index, and the hypoglycemic activity *in vitro* was evaluated by the inhibition rate of α -glucosidase and α -amylase. Results: The optimum conditions for α -amylase preparation of highland barley powder with low content of fast digestible starch were as follows: α -amylase dosage of 150 U/g, solid-liquid ratio of 1:10 (g/mL), enzymolysis at 65℃ for 2 h. Under the control of these conditions, the content of fast digestible starch in

black highland barley was 11.6%, and the content of slow digestible starch was 13.0%, with 75.4% of the resistant. After enzymatic hydrolysis, the highest inhibition rates of α -glucosidase and α -amylase were 75.86% and 75.54%, respectively. Conclusion: The method can greatly reduce the content of fast digestible starch in highland barley.

Keywords: highland barley; rapidly digestion of starch; α -amylase; α -glucosidase

青稞(*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. f.)俗称裸大麦^[1],是大麦的变种,属于禾本科植物,作为青藏高原的一种重要谷物,具有高蛋白、高纤维、高维生素和低脂肪、低糖的特性,并且富含 β -葡聚糖等功能因子,具有很好的营养功能^[2-3],对预防心血管疾病、糖尿病等有显著作用^[4-6]。淀粉按其在人体内的消化程度和速度,可分为快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)3种类型^[6-7]。研究^[8-10]表明,青稞中的慢消化淀粉能够缓慢释放能量,可以保证饭后血糖的相对稳定,避免造成大幅度的波动引起血糖过高和过低的现象,有益于高血压、糖尿病和肥胖患者病情调控。

目前,有关青稞淀粉的研究多集中在其提取与不同来源青稞淀粉的理化性能对比上,对青稞淀粉改性和结构分析方面的研究较少,也缺乏对其进一步的应用潜能进行探索的理论依据。为探索青稞淀粉特性并改善其消化性能,研究拟以青稞为原料,采用酶解法降低青稞快消化淀粉含量,通过响应面优化试验及 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的活性确定酶法降低快消化淀粉含量的最适条件^[11-13],旨在提高和增加青稞的附加值,为青稞高附加值产品研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

萌芽黑青稞粉:青海汉和生物科技股份有限公司;

高温 α -淀粉酶:2万 U/mL,上海源叶生物科技有限

基金项目:青海省科技厅自然科学基金项目青年项目(编号:2020-ZJ-975Q)

作者简介:张花,女,青海大学在读本科生。

通信作者:院珍珍(1988—),女,青海大学副教授,博士。

E-mail: yuanzhenzhen-12@163.com

收稿日期:2022-02-15 **改回日期:**2022-09-08

公司;

糖化酶:10 万 U/mL,江苏锐阳生物科技有限公司;

猪胰 α -淀粉酶:45.5 万 U/g,合肥博美生物科技有
限责任公司;

苯酚:分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;

3,5-二硝基水杨酸:分析纯,上海展云化工有限公司;

酒石酸钾钠、氢氧化钠:分析纯,天津市河东区红岩
试剂厂。

1.2 仪器与设备

冷冻离心机:LR10M 型,湖南赫西仪器装备有
限公司;

恒温振荡器:THZ-82 型,国华企业集团有限公司;

台式高速离心机:H/T16MM 型,湖南赫西仪器装备
有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-1780 型,岛津仪器(苏州)
有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 技术路线

青稞粉→酶解→灭酶→水洗离心→收集固体→烘
干→粉碎→体外模拟消化→低快消化淀粉青稞粉

1.3.2 操作要点

(1) 酶解液配制:取一定单位的酶液用蒸馏水定容至
100 mL。

(2) 酶解:加酶量以每克青稞粉中加入的酶单位计,
加入酶解液震荡摇匀,放入恒温振荡水浴锅(35~75 ℃)
中以 140 r/min 的转速恒温振荡酶解。

(3) 灭酶:沸水浴 20 min。

(4) 离心、烘干:酶解结束后,20 ℃下,4 500 r/min 离
心,沉淀用蒸馏水洗涤至上清液无色(洗涤 2~3 次),收
集固体于 45 ℃烘干。

1.3.3 单因素试验 取适量青稞粉,以快消化淀粉含量为
指标,选用 α -淀粉酶添加量为 50,100,150,200,250 U/g,
酶解温度为 35,45,55,65,75 ℃,酶解时间为 1,2,3,4,
5 h,料液比为 1:5,1:10,1:15,1:20,1:25 (g/mL)。考
察一种因素时,固定其他参数条件为 α -淀粉酶添加量
150 U/g、酶解温度 65 ℃、酶解时间 2 h、料液比 1:
10 (g/mL)。

1.3.4 响应面试验 在单因素试验基础上,选取 α -淀粉
酶添加量、料液比、酶解时间和酶解温度为响应因素,以
快消化淀粉含量为响应值,采用 Design-Expert 8.0.6 软件
进行四因素三水平的响应面试验以优化 α -淀粉酶酶解工
艺,平行 3 次。

1.3.5 RDS、SDS、RS 含量测定 参照 Englyst 等^[14] 的方
法并稍作修改。取 0.2 g 样品,加入 9 mL 蒸馏水,漩涡震
荡 5 min,沸水浴 30 min,期间晃动试管以防结块,自然冷
却至室温。向试管中加入 3 个玻璃珠、1 mL 乙酸铵缓冲
液(1 mol/L,pH 5.2)及 5 mL 酶溶液,37 ℃水浴震荡酶

解,分别在 20,120 min 时吸取 5 mL 样品,沸水浴灭酶
20 min,4 500 r/min 离心 15 min,取 1 mL 上清液,分别
加入 2 mL 蒸馏水和 DNS 于沸水浴中显色 5 min,流水冷
却后加入 7 mL 蒸馏水,摇匀,测定 540 nm 处紫外吸收值。
标准曲线方程为 $Y=1.1485X-0.0237$, $R^2=0.9964$,并分
别按式(1)~式(3)计算 RDS、SDS、RS 含量。

$$R_{RDS} = \frac{m_{20} - m_0}{m_{TS}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$R_{SDS} = \frac{m_{120} - m_{20}}{m_{TS}} \times 100\%, \quad (2)$$

$$R_{RS} = m_{TS} - R_{RDS} - R_{SDS}, \quad (3)$$

式中:

R_{RDS} ——RDS 含量,%;

R_{SDS} ——SDS 含量,%;

R_{RS} ——RS 含量,%;

m_0 ——水解 0 min 后样品中葡萄糖质量,mg;

m_{20} ——水解 20 min 后样品中葡萄糖质量,mg;

m_{120} ——水解 120 min 后样品中葡萄糖质量,mg;

m_{TS} ——样品中总淀粉质量,mg。

1.3.6 总淀粉含量测定 采用淀粉含量检测试剂盒法测
定。标准曲线方程为 $Y=0.451X-0.4513$, $R^2=0.9948$,
并按式(4)计算总淀粉含量。

$$Y' = \frac{X' \times n \times V}{W}, \quad (4)$$

式中:

Y' ——总淀粉含量,mg/g;

X' ——测得的吸光度对应标准曲线的浓度,
mg/mL;

n ——稀释倍数,1 000;

V ——提取后总体积,mL;

W ——青稞粉质量,g。

1.3.7 α -葡萄糖苷酶抑制率测定 取 0.05 mol/L PBS 缓
冲液(pH 6.8) 600 μ L,滴加 300 μ L PNPG (20 mmol/L)
溶液和 40 μ L 样品,37 ℃水浴酶解 20 min,滴加 200 μ L
0.2 U/mL 的 α -葡萄糖苷酶溶液,室温反应 10 min,加入
2 mL 0.1 mol/L 的 Na_2CO_3 终止反应,3 000 r/min 离心
10 min,吸取 200 μ L 上清液于 96 孔板中,用酶标仪测定
405 nm 处吸光值。空白对照为 pH 6.8、0.05 mol/L 的
PBS 溶液。按式(5)计算 α -葡萄糖苷酶抑制率^[15]。

$$M = \left(1 - \frac{c-d}{a-b}\right) \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

M —— α -葡萄糖苷酶抑制率,%;

a ——含有 α -葡萄糖苷酶溶液不含样品的吸光值;

b ——不含 α -葡萄糖苷酶溶液和待测样品的吸光值;

c ——含有 α -葡萄糖苷酶溶液和待测样品的吸光值;

d ——不含 α -葡萄糖苷酶溶液和待测样品的吸光值。

1.3.8 α -淀粉酶抑制率测定 分别取 150 μ L 样品液和

150 μL 0.5 mg/mL 的 α -淀粉酶液,混匀,37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 10 min,加入 250 μL 质量分数为 1% 的可溶性淀粉溶液,37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 10 min,加入 500 μL DNS 终止反应,沸水浴 5 min。冷却后取 200 μL 于 96 孔板中,使用酶标仪测定 540 nm 处吸光度,按式(6)计算 α -淀粉酶抑制率。

$$N = \left(1 - \frac{c-d}{a}\right) \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

N —— α -淀粉酶抑制率, %;

a ——含有 α -葡萄糖苷酶溶液不含样品的吸光值;

c ——含有 α -葡萄糖苷酶溶液和待测样品的吸光值;

d ——不含 α -葡萄糖苷酶溶液和含待测样品的吸光值。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 α -淀粉酶添加量对 RDS 含量的影响 由图 1 可知,酶解初始阶段快消化淀粉含量随 α -淀粉酶添加量的增加而减小,当 α -淀粉酶添加量为 150 U/g 时,快消化淀粉含量最低为 15.4%。继续增加 α -淀粉酶添加量,快消化淀粉含量逐渐增加,可能是由于酶解产物的积累对酶解反应的反向抑制作用。因此,确定 α -淀粉酶的最适添加量为 150 U/g。

2.1.2 料液比对 RDS 含量的影响 由图 2 可知,随着青

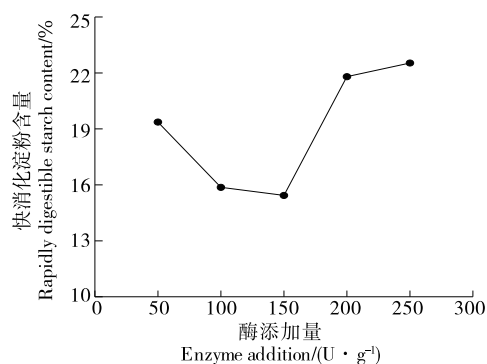


图 1 α -淀粉酶添加量对 RDS 含量的影响

Figure 1 Effects of α -amylase addition on RDS content

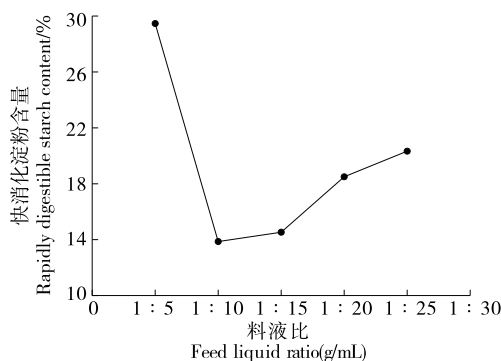


图 2 料液比对 RDS 含量的影响

Figure 2 Effects of the ratio of solid to liquid on RDS content

稞粉质量浓度的降低,青稞中快消化淀粉含量随之降低,当料液比为 1 : 10 (g/mL) 时,其含量达到最低(13.9%)。随着青稞粉质量浓度的进一步降低,快消化淀粉含量升高,可能是由于料液比过小时,溶液中的酶浓度较低,从而导致酶与淀粉的接触几率下降;当料液比较大时,酶与淀粉之间的流动性较低,不易酶解,快消化淀粉含量降低较少。因此,确定最适料液比为 1 : 10 (g/mL)。

2.1.3 酶解时间对 RDS 含量的影响 由图 3 可知,快消化淀粉含量随酶解时间的延长不断减小,当酶解时间为 2 h 时,快消化淀粉含量最低为 8.7%。继续延长酶解时间,支链淀粉含量减少、小分子淀粉含量上升,使得快消化淀粉含量增加。因此,确定 α -淀粉酶的适宜酶解时间为 2 h。

2.1.4 酶解温度对 RDS 含量的影响 由图 4 可知,当酶解温度 $< 65^{\circ}\text{C}$ 时,随着酶解温度的升高,青稞快消化淀粉含量降低,当酶解温度为 65°C 时,快消化淀粉含量最低为 8.9%,超出此温度范围后,随着酶解温度的升高,快消化淀粉含量升高,可能是因为温度过高导致了淀粉的降解。因此, α -淀粉酶的适宜酶解温度为 65°C 。

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面试验设计及结果 单因素试验选择的水平

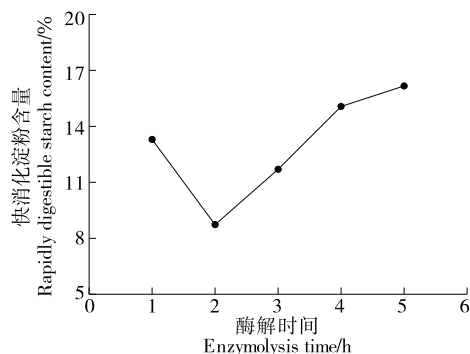


图 3 酶解时间对 RDS 含量的影响

Figure 3 Effects of enzymolysis time on RDS content

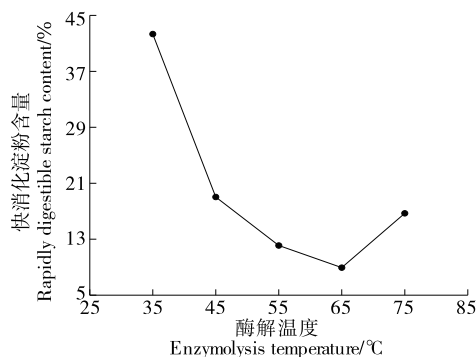


图 4 酶解温度对 RDS 含量的影响

Figure 4 Effects of enzymolysis temperature on RDS content

范围见表 1,试验设计及结果见表 2。

2.2.2 回归模型的建立与显著性分析 通过 Box-Behnken 试验对 RDS 含量进行多元线性回归拟合,得方程:

$$Y=11.59+3.85A-0.71B+1.76C-1.40D+0.10AB-0.33AC+0.075AD+0.15BC-0.27BD-0.85CD+19.30A^2+12.59B^2+9.59B^2+8.95D^2。$$
 (7)

由表3可知,回归模型 $P<0.01$,极显著,失拟项 $P=$

表 1 响应面试验因素水平设计表

Table 1 Factors and levels of response surface experimental design

水平	A α-淀粉酶添加量/ (U · g ⁻¹)	B 料液比 (g/mL)	C 酶解时 间/h	D 酶解温 度/℃
-1	100	1 : 5	1	55
0	150	1 : 10	2	65
1	200	1 : 15	3	75

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Response surface test design and results

试验号	A	B	C	D	RDS 含量 %	试验号	A	B	C	D	RDS 含量 %
1	0	0	-1	-1	29.7	16	0	0	-1	1	28.2
2	1	1	0	0	46.8	17	0	0	1	1	28.9
3	-1	0	0	-1	37.6	18	0	0	0	0	11.0
4	1	0	0	1	42.1	19	0	0	0	0	11.3
5	-1	0	1	0	38.6	20	0	-1	0	1	33.3
6	0	0	0	0	11.8	21	-1	0	-1	0	34.6
7	0	-1	1	0	36.8	22	1	0	0	-1	45.3
8	0	0	1	-1	33.8	23	0	1	0	-1	33.6
9	0	-1	-1	0	32.3	24	0	-1	0	-1	34.6
10	0	0	0	0	11.5	25	-1	1	0	0	39.2
11	-1	-1	0	0	40.4	26	1	0	1	0	45.8
12	1	0	-1	0	43.1	27	1	-1	0	0	47.6
13	0	1	-1	0	30.3	28	-1	0	0	1	34.1
14	0	0	0	0	12.4	29	0	1	0	1	31.2
15	0	1	1	0	35.4						

表 3 方差分析表[†]

Table 3 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	3 417.29	14	244.09	588.06	<0.000 1	* *
A	177.87	1	177.87	428.52	<0.000 1	* *
B	6.02	1	6.02	14.51	0.001 9	* *
C	37.10	1	37.10	89.38	<0.000 1	* *
D	23.52	1	23.52	56.66	<0.000 1	* *
AB	0.04	1	0.04	0.10	0.760 8	
AC	0.42	1	0.42	1.02	0.330 1	
AD	0.02	1	0.02	0.05	0.819 3	
BC	0.09	1	0.09	0.22	0.648 6	
BD	0.30	1	0.30	0.73	0.407 7	
CD	2.89	1	2.89	6.96	0.019 5	*
A ²	2 416.36	1	2 416.36	5 821.39	<0.000 1	* *
B ²	1 027.89	1	1 027.89	2 476.34	<0.000 1	* *
C ²	596.34	1	596.34	1 436.68	<0.000 1	* *
D ²	519.68	1	519.68	1 251.99	<0.000 1	* *
残差	5.81	14	0.42			
失拟项	4.75	10	0.47	1.79	0.302 3	
纯误差	1.06	4	0.27			
总误差	3 423.10	28				

[†] * 表示差异显著($P<0.05$); * * 表示差异极显著($P<0.01$); $R^2=0.998\ 3$, $R_{\text{adj}}^2=0.996\ 6$ 。

0.107 1 > 0.05, 不显著, 说明选择的模型合理。修正系数 (R^2_{Adj} 为 0.996 6) 与模型方程系数 (R^2 为 0.998 3) 很接近, 说明可用该模型回归方程对试验进行预测, 拟合程度好, 能够较为准确地反映出各因素对 RDS 水解度的影响。比较 F 值可知, 各因素对响应值的影响大小为 α -淀粉酶添加量 = 酶解时间 = 酶解温度 > 料液比, 各因素之间存在交互作用。

2.2.3 交互作用分析 由图 5 可知, 酶解时间和酶解温度之间的交互作用对 RDS 含量影响最为显著。 α -淀粉酶添加量和酶解时间、料液比和酶解温度、料液比和酶解时间之间的交互作用的曲线平滑, 显著性差异较小; α -淀粉酶添加量和酶解温度之间的交互作用显著性最低。4 个

因素对青稞中 RDS 含量的影响均呈先降低后上升的趋势, 且在 4 个因素所设定的范围内均存在最高值, CD、AC、BD 的交互作用比 BC、AB、AD 的更为密集, 说明 RDS 含量的显著性顺序为 CD > AC > BD > BC > AB > AD, 与方差分析结果相同。

2.2.4 验证实验 由 Design-Expert 软件分析得到黑青稞中降低 RDS 含量的最优工艺条件为 α -淀粉酶添加量 150 U/g、料液比为 1 : 10 (g/mL)、酶解温度为 65 $^{\circ}\text{C}$ 、酶解时间为 2 h, 此时 RDS 含量为 13.0%。为进一步验证实验结果的可靠及真实性, 对酶解条件进行 3 次平行试验, 测得 RDS 含量为 13.7%, 与预测值相差不大, 说明建立的模型可靠。

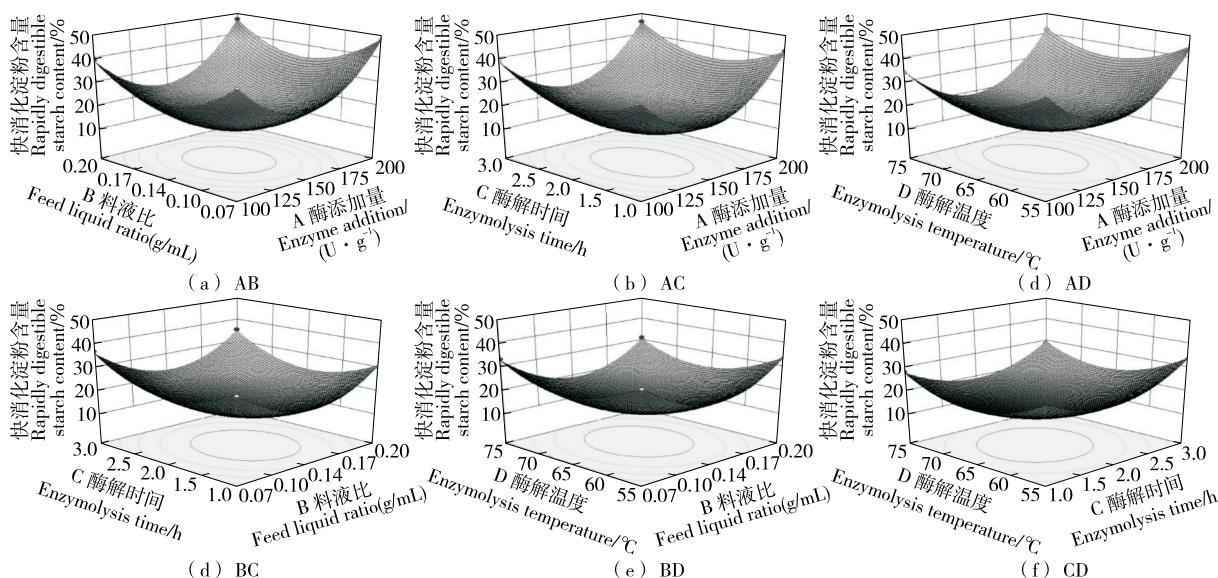


图 5 各因素交互作用对 RDS 含量的影响

Figure 5 Effects of interaction of various factors on RDS content

2.2.5 降糖活性 由图 6 可知, 与原粉相比, α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制率分别增加了 52.7% 和 34.4%, 可能是由于经过处理后的青稞淀粉结构发生了变化, 减少了与消化酶的接触^[16-17], 从而使其抑制率得以增加, 即青稞淀粉的体外降糖活性得到明显提高。并且由于淀粉等碳水化合物进入人体后, 需在 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的共同作用下分解为单糖后才能被人体小肠吸收, 因此抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的活性可以抑制餐后血糖的升高。

3 结论

采用响应面试验优化 α -淀粉酶降低青稞快消化淀粉含量的工艺条件, 最终筛选出了最佳酶解条件为 α -淀粉酶添加量 150 U/g、料液比 1 : 10 (g/mL)、酶解时间 2 h、酶解温度 65 $^{\circ}\text{C}$ 。此条件下快消化淀粉含量为 11.6%, 慢消化淀粉含量为 13.0%, 抗性淀粉含量为 75.4%, α -葡萄

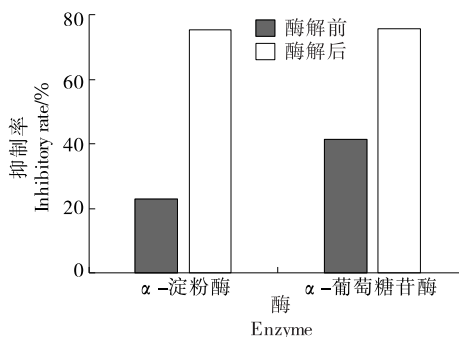


图 6 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制率

Figure 6 Inhibitory rate of α -amylase and α -glucosidase

糖苷酶抑制率为 75.86%, α -淀粉酶抑制率为 75.54%。酶解前后, 快消化淀粉含量下降了 50.8%, 慢消化淀粉含量升高了 10.4%, 抗性淀粉含量升高了 40.4%, α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制率分别升高了 34.4% 和 52.7%, 说明

α -淀粉酶改善了淀粉的消化性能。后续可对酶解后青稞淀粉的理化性质进行深入研究。

参考文献

- [1] 景孝男, 党斌, 杨希娟, 等. 热处理对不同品种青稞全粉结构及理化特性的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 44-52.
JING X N, DANG B, YANG X J, et al. Effect of treatment on the structure and physicochemical properties of the whole barley powder of different varieties[J]. Food & Machinery, 2021, 37(9): 44-52.
- [2] ZENG X Q, GUO Y, XU Q J, et al. Origin and evolution of qingke barley in Tibet[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 5 433.
- [3] 阚建全, 洪晴悦. 青稞生物活性成分及其生理功能研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(6): 11-20.
KAN J Q, HONG Q Y. Research progress of bioactive ingredients and physiological functions in qingke[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(6): 11-20.
- [3] GONG L X, JIN C, WU X B, et al. Determination of arabinoxylans in Tibetan hull-less barley bran[J]. Procedia Engineering, 2012, 37: 218-222.
- [4] GONG L X, JIN C, WU L J, et al. Tibetan hull-less barley (*Hordeum vulgare* L.) as a potential source of antioxidants[J]. Cereal Chemistry, 2012, 89(6): 290-295.
- [5] ZHU F M, DU B, XU B J. Superfine grinding improves functional properties and antioxidant capacities of bran dietary fibre from Qingke (hull-less barley) grown in Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 65: 43-47.
- [6] 孟丽维, 朱慧静, 王贺. 慢消化淀粉的制备与检测及其在食品中的应用进展[J]. 农产品加工, 2019(19): 77-80.
MENG L W, ZHU H J, WANG H. Recent progress in preparation and detection of slowly digestible starch and its application in food[J]. Farm Products Processing, 2019(19): 77-80.
- [7] 李笑蕊, 刘珊, 王世霞, 等. 6 种裸燕麦营养成分及功能活性成分对比分析[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 28-32.
LI X R, LIU S, WANG S X, et al. Comparison of nutritional and functional components in 6 kinds of naked oat [J]. Food & Machinery, 2016, 32(3): 28-32.
- [8] 王丽丽, 赵思明, 林亲录, 等. 冷链米饭多尺度结构的变化及慢消化淀粉形成机制[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 18-23, 42.
WANG L L, ZHAO S M, LIN Q L, et al. Multi-scale structural changes and slowly digestible starch formation of cold-chain cooked rice[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 18-23, 42.
- [9] 王润, 党斌, 杨希娟, 等. 低血糖生成指数食品的研究现状与展望[J]. 青海农林科技, 2018(3): 68-71.
WANG R, DANG B, YANG X J, et al. Research review of low glycemic index[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2018(3): 68-71.
- [10] 马先红, 张文露, 张铭鉴. 玉米淀粉的研究现状[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(2): 4-6.
MA X H, ZHANG W L, ZHANG M J. Research status of corn starch[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(2): 4-6.
- [11] 肖志刚, 邵晨, 杨柳, 等. 淀粉改性方法的研究现状及进展[J]. 农产品加工, 2020(3): 81-84.
XIAO Z G, SHAO C, YANG L, et al. Research status and progress trend of starch modification[J]. Farm Products Processing, 2020 (3): 81-84.
- [12] 包美丽, 杨添植, 张立钢, 等. 双酶法制备马鹿茸降血糖肽工艺优化及其对 α -葡萄糖苷酶的抑制效果[J]. 食品科学, 2017, 38(6): 88-95.
BAO M L, YANG T Z, ZHANG L G, et al. Optimization of preparation of hypoglycemic peptides from red deer (*cervus elaphus*) antlers by two-step enzymatic hydrolysis and their α -glucosidase inhibitory[J]. Food Science, 2017, 38(6): 88-95.
- [13] 方圆, 任欣, 彭洁, 等. 青稞及其制品的体内外淀粉消化特性研究[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(1): 144-152.
FANG Y, REN X, PENG J, et al. Study on in vivo and in vitro starch digestive characteristics of qingke barley and its products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(1): 144-152.
- [14] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(S2): 33-50.
- [15] 包正宇, 樊铭聪, 李言, 等. 乌饭树叶叶蓝黑色素对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 165-170, 176.
BAO Z Y, FAN M C, LI Y, et al. Study on the α -glucosidase inhibition of the dark blue pigment from the leaves of *Vaccinium bracteatum* Thunb [J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 165-170, 176.
- [16] 张根义, 王明珠, 彭善丽. 慢消化淀粉的结构基础和机理[J]. 食品与生物技术学报, 2010, 29(4): 481-487.
ZHANG G Y, WANG M Z, PENG S L. Controlled glucose delivery in food for optimal health[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2010, 29(4): 481-487.
- [17] 俞露茜. 双酶法制备慢消化糊精及其对小鼠糖脂代谢的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 28-32.
YU L Q. Dual enzymatic approach for producing slowly digested dextrin and its effects on the glucolipid metabolism of mice[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 28-32.