

β -淀粉酶提高青稞慢消化淀粉含量工艺优化

Optimization the process of increasing the content of slowly digestible starch in highland barley by β -amylase

李岩¹ 刘娟¹ 宋晓凡¹ 孙康娜¹

LI Yan¹ LIU Juan¹ SONG Xiaofan¹ SUN Kangna¹

陈富章¹ 院珍珍^{1,2}

CHEN Fuzhang¹ YUAN Zhenzhen^{1,2}

(1. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016;

2. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

2. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University,

Xining, Qinghai 810016, China)

摘要:目的:深度开发青稞低血糖生成指数(GI)食品以及 SDS 系列产品。方法:以青稞粉为原料,采用响应面试验确定最优酶解条件,并通过 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的抑制作用来评价其体外降糖活性。结果:当 β -淀粉酶添加量为 60 U/g,酶解时间为 3.5 h,酶解温度为 51 $^{\circ}\text{C}$,料液比($m_{\text{青稞粉}}:V_{\beta\text{-淀粉酶液}}$)为 1:12 (g/mL)时,酶改性青稞粉中慢消化淀粉含量最高为 16.55%。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 71.39%, 48.32%。结论:最优酶解条件下,酶改性青稞粉中慢消化淀粉含量明显提高。

关键词:青稞; β -淀粉酶;慢消化淀粉; α -葡萄糖苷酶; α -淀粉酶;抑制率

Abstract: Objective: This study aimed to explore a kind of food with low glycemic index (GI) and SDS serial products. **Methods:** Using highland barley powder as raw material. The optimal enzymolysis conditions were determined by single factor test and response surface test. The hypoglycemic activity of α -glucosidase and α -amylase in vitro was evaluated. **Results:** The content of slow digestion starch in the enzymolysis highland barley powder reached the highest of 16.55%, under the control of the conditions of 60 U/g β -amylase, 3.5 h enzymolysis time, 51 $^{\circ}\text{C}$ enzymolysis temperature, and 1:12 (g/mL) solid to liquid ratio.

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:李岩,女,青海大学在读硕士研究生。

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:2022-11-04 **改回日期:**2023-06-13

Meanwhile, the modified highland barley powder had a certain inhibitory effect on α -glucosidase and α -amylase. The highest inhibitory rates of the modified highland barley powder on α -glucosidase and α -amylase were 71.39% and 48.32%, respectively.

Conclusion: Under the control of the optimal enzymatic hydrolysis conditions, the content of slow digestible starch in the enzymatic modified highland barley powder was significantly increased.

Keywords: highland barley; β -amylase; slowly digestible starch; α -glucosidase; α -amylase; inhibition rate

青稞是高原主要种植的农作物之一,主要分布于西藏、青海、四川、云南等高海拔地区^[1]。研究^[2-3]表明,高蛋白、高维生素、高纤维、低糖、低脂肪的营养特性使得青稞具有预防 2 型糖尿病、肥胖等慢性代谢疾病的功效。同时高含量的 β -葡聚糖也有助于发挥青稞的降血脂、预防糖尿病的功效^[4]。淀粉是青稞的主要成分,按其在人体内的消化程度和速度不同,可分为快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)三类,SDS 是指 20~120 min 内可以在小肠中被完全消化吸收的一类淀粉^[5-6]。研究^[7-9]表明,青稞中的 SDS 能够缓慢释放能量,可以保证饭后血糖的相对稳定,避免出现血糖大幅波动的现象,有益于高血压、糖尿病和肥胖患者病情调控。淀粉结构的改变方法有物理法、化学法、酶法、加工处理(如常压、高压蒸煮)等^[10]。其中酶法具有效率高、能耗低、污染小等特点^[11]。安攀宇^[12]使用 α -淀粉酶、 β -淀粉酶、普鲁兰酶制备青稞慢消化淀粉,当普鲁兰酶添加量为 200 U 时,慢消化淀粉含量达到最高值;张倩倩等^[13]用酶

解法制备青稞慢性消化淀粉并进行工艺优化,当普鲁兰酶添加量为 200 U,酶解时间为 10 h,冷藏回生时间为 1 d,淀粉浓度为 15%时,慢消化淀粉含量为 32.72%。

研究拟以青稞粉为原料,采用 β -淀粉酶进行酶解处理,以提高青稞粉中 SDS 含量,以期对青稞的深度开发利用、低血糖生成指数(GI)食品以及 SDS 系列产品开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 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;

α -葡萄糖苷酶:70 万 U/mL,上海吉至生化科技有限公司;

猪胰- α -淀粉酶:45.5 U/mg,合肥博美生物科技有限责任公司;

β -淀粉酶:70 万 U/mL,沧州夏盛酶生物技术有限公司;

酒石酸钾钠、氢氧化钠:分析纯,天津市河东区红岩试剂厂。

1.1.2 主要仪器设备

恒温振荡器:THZ-82 型,常州国华电器有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-2600 型,岛津仪器有限公司;

多样品组织研磨仪:Tissuelyser-96 型,上海净信实业发展有限公司;

台式高速离心机:H/T 16 MM 型,湖南赫西仪器装备有限公司。

1.2 方法

1.2.1 酶改性青稞粉的制备 准确称取 5 g 青稞粉于锥形瓶,按料液比($m_{\text{青稞粉}} : V_{\beta\text{-淀粉酶}}$)1 : 10 (g/mL)加入 60 U/g 的 β -淀粉酶,摇匀,于 50 °C 恒温水浴振荡器中以 140 r/min 振荡 3 h,沸水浴灭酶 5 min,5 000 r/min 离心 10 min,去除上清液,得到的固体再次水洗离心,重复 2~3 次,固体于 45 °C 烘干,粉碎,得酶改性青稞粉样品。

1.2.2 单因素试验 根据 1.2.1 的步骤,分别考察料液比($m_{\text{青稞粉}} : V_{\beta\text{-淀粉酶}}$) [1 : 6, 1 : 8, 1 : 10, 1 : 12, 1 : 14 (g/mL)]、 β -淀粉酶添加量(40, 50, 60, 70, 80 U/g)、酶解时间(2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 h)、酶解温度(40, 45, 50, 55, 60 °C)对酶解效果的影响。

1.2.3 响应面试验 在单因素试验基础上,根据 Box-Behnken 模型的设计原理,选择料液比、酶解温度、酶解时间、 β -淀粉酶添加量进行四因素三水平的响应面试验,并以酶改性青稞中 SDS 含量为响应值确定最优条件。

1.2.4 SDS 含量测定

(1) 葡萄糖标曲的绘制:参照李志霞等^[14]的方法并修改。配制 1 mg/mL 的葡萄糖标准溶液,分别吸取 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mL,加蒸馏水至 1 mL,再分别加入 2 mL DNS 试剂,沸水浴 2 min,流动水冷却,用水补足到

15 mL,测定 540 nm 处吸光值,平行测定 3 次,并设置空白对照。回归分析后得标准曲线方程 $Y = 0.9316X - 0.0024$, $R^2 = 0.9998$ 。

(2) 体外模拟消化:参照缪铭等^[15]的方法并修改。准确称量 200 mg 酶改性青稞粉样品于锥形瓶中,加入 15 mL 醋酸钠缓冲液(0.2 mol/L, pH 5.2),10 mL 新鲜制备的混合酶液(猪胰- α -淀粉酶和糖化酶),37 °C 下、150 r/min 水浴振荡 20,120 min,分别取 5 mL 水解液沸水浴灭酶 5 min。采用 DNS 比色法测定 540 nm 处吸光度,平行测定 3 次,并设置空白对照。按式(1)、式(2)计算青稞中 SDS 百分含量。

$$R_{\text{SDS}} = (G_{120} - G_{20}) \times 0.9 / T_s \times 100\%, \quad (1)$$

$$G = (A_t + 0.0024) \times D / (0.9316 \times W_t), \quad (2)$$

式中:

R_{SDS} ——青稞中 SDS 百分含量, %;

T_s ——总淀粉含量, mg/g;

G_{20} ——样品酶解 20 min 后葡萄糖的含量, mg/g;

G_{120} ——样品酶解 120 min 后葡萄糖的含量, mg/g;

A_t ——测试溶液的吸光值;

D ——稀释倍数;

W_t ——样品的重量, mg。

1.2.5 总淀粉含量测定 采用淀粉试剂盒法测定,标准曲线方程为 $Y = 5.31X - 0.0074$, $R^2 = 0.9964$ 。按式(3)计算总淀粉含量。

$$T_s = X \times D \times V / (W \times 1.11), \quad (3)$$

式中:

T_s ——总淀粉含量, mg/g;

X ——测得的吸光度对应标准曲线的质量浓度, mg/mL;

D ——稀释倍数, 1 000;

V ——提取后总体积, 1.7 mL;

W ——称取的青稞粉质量, g;

1.11——葡萄糖含量换算为淀粉含量的常数。

1.2.6 α -葡萄糖苷酶抑制率测定 参照赖晓桦等^[16]的方法并修改。准确称取 0.05 g 酶改性青稞粉样品,分别加入 600 μ L PBS(pH 6.8, 0.05 mol/L)和 300 μ L PNPG (20 mol/L)溶液,混匀,37 °C 水浴 10 min,加入 200 μ L α -葡萄糖苷酶溶液,37 °C 反应 20 min,加入 1.65 mL 0.1 mol/L 的 Na_2CO_3 溶液终止反应,测定 405 nm 处吸光值。反应体系中采用 0.05 mol/L 的 PBS(pH 6.8)作为溶液及待测样品的空白对照,按式(4)计算 α -葡萄糖苷酶抑制率。

$$M = [1 - (c - d) / (a - b)] \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

M —— α -葡萄糖苷酶抑制率, %;

a ——不含样品的吸光值;

b ——不含 α -葡萄糖苷酶溶液和样品的吸光值;

c ——含有 α -葡萄糖苷酶溶液和样品的吸光值;

d ——不含 α -葡萄糖苷酶溶液的吸光值。

1.2.7 α -淀粉酶抑制率测定 参照梁宗瑶等^[17]的方法并修改。取 150 μL 质量浓度为 0.312 5 mg/mL 的样品液,加入 150 μL α -淀粉酶液,37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 10 min,加入 250 μL 1% 可溶性淀粉,混匀,37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 10 min,加入 DNS 试剂 500 μL ,沸水浴 5 min,冷却后测定 540 nm 处吸光值。反应体系中采用 0.05 mol/L 的 PBS(pH 6.8)作为溶液及待测样品的空白对照,按式(5)计算 α -淀粉酶抑制率。

$$N = [1 - (c - d) / a] \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

N —— α -淀粉酶抑制率, %;

a ——不含样品的吸光值;

c ——含有 α -淀粉酶溶液和样品的吸光值;

d ——不含 α -淀粉酶溶液吸光值。

1.2.8 数据处理 各试验重复 3 次,采用 Excel 软件和 Design-Expert 8.0.6 对试验数据进行分析处理及绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 料液比对酶解效果的影响 由图 1 可知,当料液比($m_{\text{青稞粉}} : V_{\beta\text{-淀粉酶液}}$)为 1 : 12 (g/mL)时,酶改性青稞粉中 SDS 含量最高为 16.96%。当料液比($m_{\text{青稞粉}} : V_{\beta\text{-淀粉酶液}}$)为 1 : 6 (g/mL)时,可能是因为底物浓度过大,淀粉糊黏度增加,导致酶与淀粉分子不能充分接触,使形成的有序短链结构减少,促使淀粉冷藏回生时相对结晶度下降,SDS 含量减少^[18-19]。随着含水量的增大,酶活性逐步升高,底物与酶充分接触,当料液比($m_{\text{青稞粉}} : V_{\beta\text{-淀粉酶液}}$)为 1 : 12 (g/mL)时,酶解效果最佳。当料液比($m_{\text{青稞粉}} : V_{\beta\text{-淀粉酶液}}$) < 1 : 12 (g/mL)时,酶解底物青稞粉含量较低,使得酶解制得 SDS 含量下降。

2.1.2 酶添加量对酶解效果的影响 由图 2 可知,当 β -淀粉酶添加量为 60 U/g 时,酶改性青稞粉中 SDS 含量最高为 31.39%。当 β -淀粉酶添加量 < 60 U/g 时,酶添加量过低使得底物未能被充分酶解,制得的酶改性青稞粉中 SDS 含量较低;当 β -淀粉酶添加量 > 60 U/g 时,高浓度的

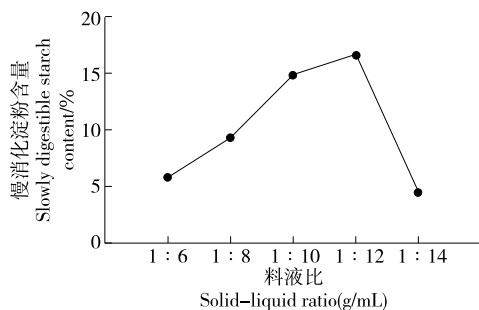


图 1 料液比对酶解效果的影响

Figure 1 Effects of solid-liquid ratio on enzymatic hydrolysis

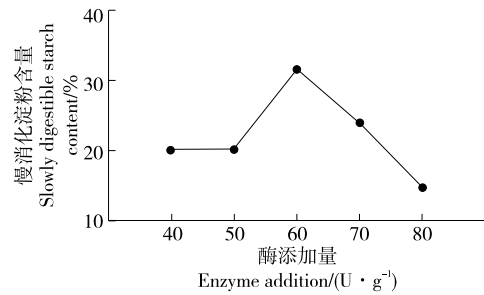


图 2 酶添加量对酶解效果的影响

Figure 2 Effects of enzyme additions on enzymatic hydrolysis

酶会将已形成的 SDS 分解,进而影响青稞粉的酶解效果。

2.1.3 酶解温度对酶解效果的影响 由图 3 可知,当酶解温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,酶改性青稞粉中 SDS 含量最高为 18.09%。试验所用 β -淀粉酶适宜的温度范围为 40 ~ 60 $^{\circ}\text{C}$ 。酶解温度较低时, β -淀粉酶活性较低,酶解效果较差;随着酶解温度的升高,酶活性逐渐增大,当酶解温度达到酶的最适温度时,酶解效果最佳,制得的酶改性青稞粉中 SDS 含量最高;当酶解温度 > 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,酶活性下降,SDS 含量降低。

2.1.4 酶解时间对酶解效果的影响 由图 4 可知,当酶解时间为 3.5 h 时,酶改性青稞粉中 SDS 含量最高为 16.62%。当酶解时间 < 3.5 h 时, β -淀粉酶对青稞粉进行缓慢酶解;酶解产物中 SDS 的积累随酶解时间的延长而

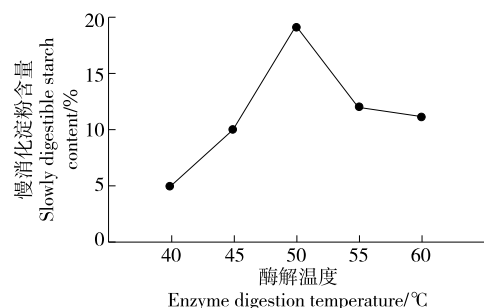


图 3 酶解温度对酶解效果的影响

Figure 3 Effects of enzyme digestion temperature on enzymatic hydrolysis

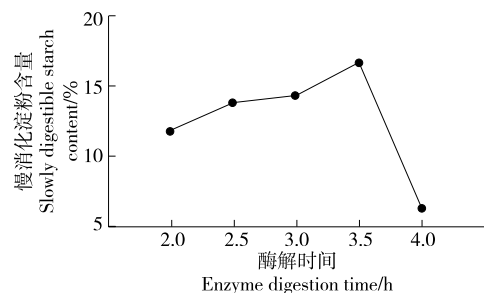


图 4 酶解时间对酶解效果的影响

Figure 4 Effect of enzyme digestion time on enzymatic hydrolysis

逐渐增多。当酶解时间 > 3.5 h 时, 酶解时间过长, 底物青稞粉不足, 过量的 β-淀粉酶作用于已生成的 SDS, 使得酶改性青稞粉中 SDS 被进一步酶解^[20]。

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面设计及其结果 基于单因素试验, 利用 Design-Expert 10 软件中 Box-Behnken 原理设计响应面优化试验, 以 β-淀粉酶添加量、酶解时间、酶解温度和料液比为试验因子, 酶改性青稞粉中 SDS 含量为响应值, 试验因素水平见表 1, 试验设计及结果见表 2。

表 1 响应面分析因素和水平
Table 1 Factors and levels of RSA

水平	A β-淀粉酶添加量/(U · g ⁻¹)	B 酶解时间/h	C 酶解温度/°C	D 料液比(m _{青稞粉} : V _{β-淀粉酶液})(g/mL)
-1	50	3.0	45	1 : 10
0	60	3.5	50	1 : 12
1	70	4.0	55	1 : 14

表 2 响应面试验方案及结果
Table 2 Results of surface test

试验号	A	B	C	D	SDS 含量/%
1	-1	0	-1	0	9.50±1.21
2	0	0	-1	-1	11.16±1.28
3	0	0	-1	1	10.88±0.50
4	0	-1	-1	0	9.48±0.66
5	0	1	-1	0	10.45±0.77
6	1	0	-1	0	10.29±0.80
7	-1	-1	0	0	11.14±0.65
8	-1	1	0	0	10.79±0.86
9	-1	0	0	-1	11.44±0.52
10	-1	0	0	1	13.42±1.59
11	0	-1	0	-1	11.68±0.89
12	0	1	0	-1	12.28±0.64
13	0	-1	0	1	13.43±1.10
14	0	1	0	1	13.02±0.55
15	0	0	0	0	15.86±1.87
16	0	0	0	0	17.09±1.51
17	0	0	0	0	15.47±1.31
18	0	0	0	0	16.52±1.40
19	0	0	0	0	17.02±0.90
20	1	-1	0	0	10.87±1.19
21	1	1	0	0	12.53±1.66
22	1	0	0	-1	13.05±1.44
23	1	0	0	1	13.43±0.75
24	-1	0	1	0	12.06±2.07
25	0	0	1	-1	12.49±1.03
26	0	0	1	1	14.37±0.82
27	0	-1	1	0	11.20±2.26
28	0	1	1	0	11.02±3.17
29	1	0	1	0	12.17±0.71

2.2.2 回归模型的显著性检验及方差分析 利用 Design Expert 10 软件对表 2 数据进行分析, 得回归方程:

$$Y = 16.39 + 0.33A + 0.19B + 0.96C + 0.54D + 0.51AB - 0.17AC - 0.40AD - 0.29BC - 0.25BD + 0.54CD - 2.36A^2 - 2.72B^2 - 3.07C^2 - 1.12D^2 \quad (6)$$

由表 3 可知, 模型 P 值 < 0.01, 表明该回归方程极显著; 失拟项 > 0.05, 表明此模型失拟不显著, 说明试验误差较小, 符合实际情况, 可以用该方程对响应值进行预测。一次项中 C 和 D 的 P 值均 < 0.01, 说明酶解温度和料液比对酶改性青稞粉中 SDS 含量有极显著影响; 一次项 A 的 P 值 < 0.05, 说明酶添加量对青稞粉中 SDS 含量有显著影响。各因素对响应值的影响程度依次为 C > D > A > B。

2.2.3 各因素交互作用 图 5 是各因素对青稞粉中 SDS 含量影响的响应面三维立体图, 从图中可以直观地看出各因素之间的交互作用以及对响应值的影响。响应面图中曲线越弯曲、坡度越大, 则表明因素对结果影响越大^[21]。由图 5 可知, 酶解温度和料液比的响应面曲面图坡度最大, 说明酶解温度和料液比的交互作用最显著, 与方差分析结果一致。

2.2.4 验证实验 利用 Design-Expert 10 软件进行回归模型分析, 酶改性青稞粉中 SDS 含量达到最大时的最优

表 3 回归方程试验方差分析表[†]

Table 3 Regression equation analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	125.99	14	9.00	37.38	<0.000 1	**
A	1.33	1	1.33	5.51	0.034 2	*
B	0.44	1	0.44	1.83	0.198 1	
C	11.12	1	11.12	46.20	<0.000 1	**
D	3.47	1	3.47	14.41	0.002 0	**
AB	1.02	1	1.02	4.24	0.058 5	
AC	0.12	1	0.12	0.48	0.499 7	
AD	0.65	1	0.65	2.69	0.123 2	
BC	0.33	1	0.33	1.37	0.261 8	
BD	0.25	1	0.25	1.05	0.321 8	
CD	1.17	1	1.17	4.85	0.045 0	*
A ²	36.25	1	36.25	150.56	<0.000 1	**
B ²	47.85	1	47.85	198.78	<0.000 1	**
C ²	61.03	1	61.03	253.50	<0.000 1	**
D ²	8.13	1	8.13	33.76	<0.000 1	**
残差	3.37	14	0.24			
失拟项	1.34	10	0.13	0.26	0.960 3	
纯误差	2.03	4	0.51			
总值	129.36	28				

† ** 表示差异极显著 (P < 0.01); * 表示差异显著 (P < 0.05); R² = 0.973 9, R_{adj}² = 0.947 9。

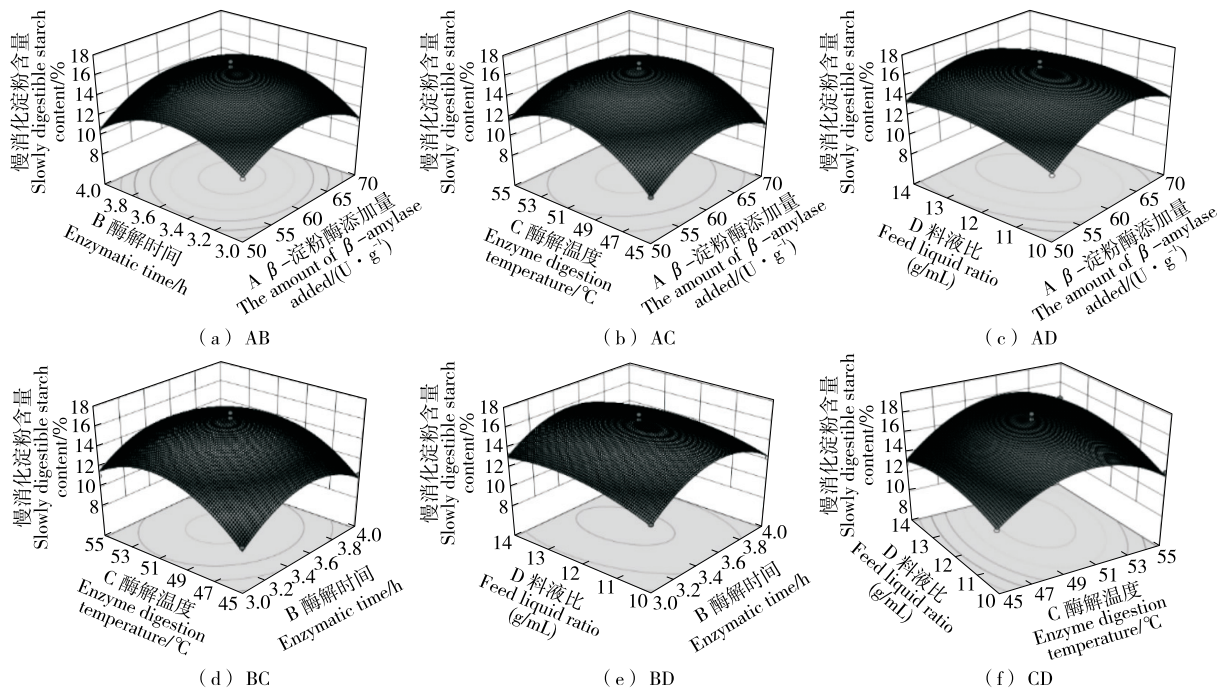


图 5 各因素交互作用对 SDS 含量的影响

Figure 5 The effect of interaction of various factors on SDS content

参数水平为:β-淀粉酶添加量 60.48 U/g,酶解时间3.5 h,酶解温度 51.1 °C,料液比($m_{\text{青稞粉}} : V_{\beta\text{-淀粉酶液}}$) 1 : 12 (g/mL),此条件下酶改性青稞中 SDS 含量为16.56%。考虑到试验的可操作性,将最优工艺参数调整为:β-淀粉酶添加量 60 U/g,酶解时间 3.5 h,酶解温度 51 °C,料液比($m_{\text{青稞粉}} : V_{\beta\text{-淀粉酶液}}$) > 1 : 12 (g/mL),该条件下酶解青稞中 SDS 含量为(16.55±0.25)%,与预测值接近,说明试验结果合理。

2.3 体外降血糖活性

2.3.1 α-淀粉酶抑制率 由表 4 可知,未经 β-淀粉酶酶解处理的青稞粉的 α-淀粉酶抑制率为 22.82%;经过最佳酶解条件处理得到的酶改性青稞粉的 α-淀粉酶抑制率为 48.32%,说明酶解后青稞粉的 α-淀粉酶抑制率提高了 25.50 个百分点。

2.3.2 α-葡萄糖苷酶抑制率 由表 4 可知,未经 β-淀粉酶酶解处理的青稞粉的 α-葡萄糖苷酶抑制率为 41.46%;经过最佳酶解条件处理得到的酶改性青稞粉的 α-葡萄糖

苷酶抑制率为 71.39%,说明酶解后青稞粉的 α-葡萄糖苷酶抑制率提高了 29.93 个百分点。

3 结论

采用响应面法分析了料液比、酶解温度、酶解时间和 β-淀粉酶添加量 4 个影响因素对青稞中慢消化淀粉含量的影响,并对酶解方案进行优化。结果表明,青稞粉中慢消化淀粉的最佳酶解工艺为 β-淀粉酶添加量 60 U/g,酶解时间 3.5 h,酶解温度 51 °C,料液比($m_{\text{青稞粉}} : V_{\beta\text{-淀粉酶液}}$) 1 : 12 (g/mL),酶解后青稞粉中慢消化淀粉含量为 16.55%。酶解后青稞粉对 α-葡萄糖苷酶抑制率达到了 71.39%,比优化前提高了 29.93 个百分点;酶解后青稞粉对 α-淀粉酶抑制率达到了 48.32%,比优化前提高了 25.50 个百分点。

参考文献

[1] 邓鹏,张婷婷,王勇,等. 青稞的营养功能及加工应用的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(2): 46-51.
DENG P, ZHANG T T, WANG Y, et al. Research progress on nutritional function and processing application of highland barley [J]. Food and Nutrition in China, 2020, 26(2): 46-51.
[2] SHEN Y, HU C, ZHANG H, et al. Characteristics of three typical Chinese highland barley varieties: Phenolic compounds and antioxidant activities[J]. Journal of Food Biochemistry, 2018, 42 (2): e12488.
[3] 景孝男,党斌,杨希娟,等. 热处理对不同品种青稞全粉结构及

表 4 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制率测定结果

Table 4 Results of α-amylase and α-glucosidase inhibition rate determination %

样品	α-淀粉酶	α-葡萄糖苷酶
酶改性青稞粉	48.32±1.03	71.39±1.36
原青稞粉	22.82±0.33	41.46±0.43

- 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.
- [4] 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. Research progress and development and utilization of highland barley[J]. Tibet Science and Technology, 2020(9): 11-12.
- [5] 胡少新, 李国良, 付立新, 等. 辐照玉米淀粉制备慢消化淀粉研究[J]. 黑龙江农业科学, 2020(8): 88-91.
- HU S X, LI G L, FU L X, et al. Study on slowly digestible starch preparing method from maize starch by irradiation[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020(8): 88-91.
- [6] 张花, 宋晓凡, 院珍珍, 等. α -淀粉酶降低青稞快消化淀粉含量工艺优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(12): 199-204.
- ZHANG H, SONG X F, YUAN Z Z, et al. Study on the process of α -amylase reduces the content of rapidly digestion starch in highland barley[J]. Food & Machinery, 2022, 38(12): 199-204.
- [7] 张斌. 慢消化淀粉的制备、性质及其形成机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 7-8.
- ZHANG B. Slowlydigestible starch: Preparation, characterizations, and mechanism [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 7-8.
- [8] 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, 88.
- WANG R, DANG B, YANG X J, et al. Research review of low glycemic index foods[J]. Qinghai Agriculture and Forestry Science and Technology, 2018(3): 68-71, 88.
- [9] XIA X, XING Y, LI G, et al. Antioxidant activity of whole grain Qingke (*Tibetan Hordeum vulgare* L.) toward oxidative stress in D-galactose induced mouse model[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 45: 355-362.
- [10] 陈彩雯, 田佳宇, 于坤正, 等. 电场处理对普鲁兰酶水解糯米淀粉的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 1-6, 67.
- CHEN C W, TIAN J N, YU K Z, et al. Effect of the electric field treatment on the pullulanase-catalyzed hydrolysis of waxy rice starch[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 1-6, 67.
- [11] 陈冰冰, 杨奕, 李嘉颐, 等. 富硒辣木籽蛋白降压肽的酶法制备、硒含量及稳定性研究[J]. 食品与机械, 2022, 38(8): 213-221.
- CHENG B B, YANG Y, LI J Y, et al. Preparation, selenium content and stability of antihypertensive peptides from selenium-enriched *Moringa oleifera* seed protein by enzymatic hydrolysis[J]. Food & Machinery, 2022, 38(8): 213-221.
- [12] 安攀宇. 青稞慢性消化淀粉制备条件的优化研究[J]. 现代食品, 2016(13): 111-114.
- AN P Y. Study on optimization of preparation conditions of barley starch for chronic[J]. Modern Food, 2016(13): 111-114.
- [13] 张倩倩, 王金斌, 吴潇, 等. 青稞慢性消化淀粉制备条件优化的研究[J]. 上海农业学报, 2015, 31(5): 6-12.
- ZHANG Q Q, WANG J B, WU X, et al. Optimization of naked barley slowly digestible starch preparing conditions [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2015, 31(5): 6-12.
- [14] 李志霞, 聂继云, 闫震, 等. 响应面法对 3,5-二硝基水杨酸比色法测定水果中还原糖含量条件的优化[J]. 分析测试学报, 2016, 35(10): 1 283-1 288.
- LI Z X, NIE J Y, YAN Z, et al. Optimization of 3, 5-Dinitrosalicylic acid colorimetry determination conditions of reducing sugar in fruits by response surface method[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2016, 35(10): 1 283-1 288.
- [15] 缪铭, 张涛, 江波. 慢消化淀粉体外测定方法的探讨[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(12): 143-146.
- LIAO M, ZHANG T, JAING B. Discussion on digestibility of slowly digestible starch analysis in vitro[J]. Food and Fermentation Industries, 2008, 34(12): 143-146.
- [16] 赖晓桦, 邓甜, 胡经飞, 等. 米糠发酵产物抑制 α -葡萄糖苷酶的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 128-134.
- LAI X H, DENG T, HU J F, et al. Optimization of inhibition of α -glucosidase by rice bran fermentation products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 128-134.
- [17] 梁宗瑶, 魏园园, 任维维, 等. 椴子仁萃取物成分分析及对 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 47-55.
- LIANG Z Y, WEI Y Y, REN W W, et al. Composition analysis and inhibitory effect against α -amylase and α -glucosidase of acorn kernel extractions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(17): 47-55.
- [18] 高群玉, 王琳. 双酶协同制备玉米慢消化淀粉及其性质研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(10): 2 425-2 430.
- GAO Q Y, WANG L. Preparation and Properties of corn slowly digestible starch withdualenzymes treatment [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(10): 2 425-2 430.
- [19] 张二娟, 何小维, 吴磊, 等. 缓慢消化淀粉的研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2009(3): 24-26.
- ZHANG E J, HE X W, WU L, et al. Research progress of slowly digestible starch[J]. Cereal and Feed Industry, 2009(3): 24-26.
- [20] 雷俊华, 高群玉. 用 β -淀粉酶制备蜡质大米糊精及其性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(10): 22-26.
- LEI J H, GAO Q Y. Preparation of waxy rice dextrin with β -amylase treatment and study on its properties [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(10): 22-26.
- [21] 于欢, 李露, 王思爽, 等. 响应面法优化酶法提取蜜环菌多肽及其抗疲劳活性[J]. 食品工业科技, 2017, 38(23): 85-91.
- YU H, LI L, WANG S S, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of *Armillaria mellea* Vahl exFr peptides by response surface methodology and its anti-fatigue ability[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(23): 85-91.