

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.81242

青稞酒糟醇溶蛋白提取工艺优化 及体外抗氧化活性研究

吕倩¹ 赵捷¹ 宋洋波¹ 许丹² 耿贵工³ 张义全¹

(1. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学医学部公共卫生系, 青海 西宁 810016;

3. 青海大学农林科学院, 青海 西宁 810016)

摘要: [目的] 优化青稞酒糟醇溶蛋白提取工艺, 提高青稞酒加工副产物的附加值。 [方法] 以青稞酒糟为原料, 采用超声辅助乙醇法提取青稞酒糟醇溶蛋白, 并以青稞酒糟醇溶蛋白得率为指标, 分析不同料液比、超声温度、超声功率、超声时间 4 个因素对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响, 通过正交试验优化提取工艺, 从而确定最佳提取条件。采用 SDS-PAGE 分析蛋白相对分子质量分布, 鉴定其为醇溶蛋白。以 V_c 为对照, 对青稞酒糟醇溶蛋白抗氧化活性 (DPPH·、·OH 的清除率和总还原能力) 进行对比分析。 [结果] 青稞酒糟醇溶蛋白的最佳提取工艺条件为料液比 1:16 (g/mL)、超声温度 35℃、超声功率 320 W、提取时间 60 min, 在此条件下, 青稞酒糟醇溶蛋白得率为 $(18.50 \pm 0.020)\%$ 。SDS-PAGE 电泳分析结果显示提取的蛋白相对分子质量主要分布在 11~17 和 <11 , 进一步确定该蛋白为醇溶蛋白, 其相对分子质量较小。体外抗氧化试验结果表明, 青稞酒糟醇溶蛋白 DPPH·、·OH 的清除率及总还原能力均随抗氧化剂质量浓度的增加而增大, 并在相同质量浓度下均弱于 V_c , 当青稞酒糟醇溶蛋白质量浓度为 10 mg/mL 时, DPPH·、·OH 的清除率分别为 $(54.00 \pm 0.020)\%$ 和 $(22.90 \pm 0.010)\%$, 对 Fe^{3+} 的还原能力在此质量浓度下达到最大值 0.50 ± 0.100 。 [结论] 优化工艺提取的青稞酒糟醇溶蛋白具有较好的体外抗氧化活性, 有被开发为抗氧化剂的潜力。

关键词: 青稞酒糟; 醇溶蛋白; 超声波辅助提取; 抗氧化活性

Extraction process optimization of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent and *in vitro* antioxidant properties

LYU Qian¹ ZHAO Jie¹ SONG Yangbo¹ XU Dan² GENG Guigong³ ZHANG Yiquan¹

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

2. Department of Public Health, Medical College, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

3. Academy of Agriculture and Forestry Science, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: [Objective] To optimize the extraction process of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent, aiming to enhance the added value of byproducts from highland barley wine processing. [Methods] The alcohol-soluble proteins were extracted from highland barley fermentation spent using ultrasound-assisted ethanol extraction. The yield of alcohol-soluble proteins was used as the evaluation index to analyze the effects of four factors, *i.e.*, solid-to-liquid ratio, ultrasound temperature, ultrasound power, and ultrasound time, on the protein yield. An orthogonal test was conducted to optimize the extraction process and determine the optimal extraction conditions. SDS-PAGE analysis was performed to examine the relative molecular mass distribution of the proteins and confirm their identity as alcohol-soluble proteins. Vitamin C (V_c) was used as a control to compare the antioxidant activities of the alcohol-soluble proteins, including DPPH· and ·OH radical scavenging rates and total reducing power. [Results] The optimal extraction conditions for alcohol-

基金项目: 青海省基础研究计划项目 (编号: 2024-ZJ-966)

通信作者: 张义全 (1992—), 男, 青海大学讲师, 博士。E-mail: zhangyiquan111@163.com

收稿日期: 2024-12-05 改回日期: 2025-07-02

引用格式: 吕倩, 赵捷, 宋洋波, 等. 青稞酒糟醇溶蛋白提取工艺优化及体外抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 179-185.

Citation: LYU Qian, ZHAO Jie, SONG Yangbo, et al. Extraction process optimization of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent and *in vitro* antioxidant properties[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 179-185.

soluble proteins from highland barley fermentation spent were a solid-to-liquid ratio of 1:16 (g/mL), ultrasound temperature of 35 °C, ultrasound power of 320 W, and extraction time of 60 minutes. Under these conditions, the yield of alcohol-soluble proteins was $(18.50 \pm 0.020)\%$. SDS-PAGE showed that the extracted proteins had relative molecular masses mainly distributed between 11 kDa and 17 kDa and below 11 kDa, confirming the proteins as alcohol-soluble with low molecular mass. *In vitro* antioxidant assays indicated that the DPPH· and ·OH radical scavenging rates and total reducing power of the alcohol-soluble proteins increased with increasing protein concentration but were weaker than those of V_c at the same concentration. At a protein concentration of 10 mg/mL, the DPPH· and ·OH scavenging rates were $(54.00 \pm 0.020)\%$ and $(22.90 \pm 0.010)\%$, respectively, and the Fe^{3+} reducing power reached its maximum absorbance of 0.50 ± 0.100 . **[Conclusion]** The alcohol-soluble proteins extracted from highland barley fermentation spent under the optimized conditions exhibited good *in vitro* antioxidant activity, indicating their potential for development as antioxidants.

Keywords: highland barley fermentation spent; alcohol-soluble proteins; ultrasound-assisted extraction; antioxidant properties

青稞富含蛋白质、膳食纤维、维生素等功能成分,与水稻、小麦、玉米等谷物相比,青稞的蛋白质含量较高^[1],据测定青稞中蛋白质含量约为 6.35%~23.40%,平均含量为 12.43%^[2],包括球蛋白、清蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白等^[3]。

青稞酒作为一种独具特色的清香型白酒,主要产于青海和西藏地区,以富含支链淀粉的高原谷物青稞为唯一原料,青稞酒清香纯正,入口绵柔,深受消费者喜爱。据报道,2024 年青稞酒总产量已达到 8.5 万 t^[4]。青稞酒糟是在青稞酒生产过程中剩余的残渣,也被称作酒醅糟或粕^[5]。在青稞酒酿造过程中,酒糟的粗蛋白含量有所增加,而粗灰分、粗脂肪含量无明显变化^[6],与传统高粱酒糟相比,青稞酒糟蛋白质含量更高,达 23.57%^[7],并且青稞酒糟蛋白质中醇溶蛋白含量占比较高。目前对于白酒酒糟中醇溶蛋白的提取及性质也已有研究^[8],但关于青稞酒糟中醇溶蛋白的提取及其性质的研究鲜见报道。

超声波辅助提取方法也因其提取速度快、效率高和环境友好性,被广泛用于多种植物成分的提取中^[9]。邓婷等^[10]研究表明,在提取效率上,超声波辅助提取技术优于传统的 Osborne 法,更适宜于青稞中蛋白质的提取。此外,邹张顺^[11]通过超声辅助乙醇提取玉米醇溶蛋白,并进行了蛋白提取工艺条件的优化,最终得到了相对较高的提取效率。

研究拟采用超声辅助乙醇法提取青稞酒糟醇溶蛋白,并通过体外抗氧化试验来评价青稞酒糟醇溶蛋白抗氧化能力,以期对青稞酒糟资源的综合利用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 样品与试剂

青稞酒糟:青海省互助天佑德青稞酒股份有限公司;
抗坏血酸(V_c)、氯化钠、无水乙醇:分析纯,青海莱茵尔生物科技有限公司;

DPPH(生化试剂):青海莱茵尔生物科技有限公司;
SDS-PAGE 试剂盒:北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

潮汐研磨机:800A 型,东莞市华太电器有限公司;
超声波清洗仪:ZKQ-800D 型,昆山市超声波仪器有限公司;

双光束紫外可见分光光度计:UV-1780 型,岛津仪器苏州有限公司;

高速冷冻离心机:LR-10M 型,湖南赫西仪器装备有限公司;

电泳仪:DYCZ-30C 型,北京市六一仪器厂;

旋转蒸发器:R201-1L 型,郑州世联良工仪器设备有限公司;

电热鼓风干燥箱:GZX-9070 MB 型,南京东迈科技仪器有限公司;

真空冷冻干燥机:YTLG-10A 型,上海叶拓科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 青稞酒糟醇溶蛋白的提取 参考邓婷等^[10]的方法,并适当修改。取一定量酒糟进行样品的预处理,将酒糟放入烘箱中进行干燥,将干燥完全的酒糟用研磨机打粉,过 60 目筛,细粉装至密封袋内备用。

按料液比 1:16 (g/mL)加入去离子水,设定超声功率为 250 W、超声温度为 50 °C、超声时间为 30 min,并以转速 4 000 r/min 离心 20 min,后得到上清液即为清蛋白溶液,按料液比 1:14 (g/mL)加入 5% NaCl 溶液,设定超声功率为 300 W、超声温度为 30 °C、超声时间为 40 min,并离心得到上清液即为球蛋白溶液,纱布过滤取残渣,将 65% 的乙醇溶液加入至残渣中,设定料液比为 1:16 (g/mL)、超声功率为 240 W、超声温度为 35 °C、超声时间为 60 min,提取醇溶蛋白,用旋转蒸发器于 42 °C 水浴下减压浓缩,浓缩液置于 90 mm 培养皿,于 -53 °C 真空冷冻干燥机中冻干 24 h。

1.3.2 单因素试验

(1) 料液比:在超声时间 60 min,超声功率 240 W,超声温度 35 °C 的条件下,控制料液比分别为 1:12,1:14,1:16,1:18,1:20 (g/mL),探究料液比对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响。

(2) 超声温度:在料液比 1:16 (g/mL),超声功率 240 W,超声时间 60 min 的条件下,控制超声温度分别为 20,25,30,35,40,45 °C,探究超声温度对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响。

(3) 超声功率:在超声时间 60 min,料液比 1:16 (g/mL),超声温度 35 ℃的条件下,控制超声功率分别为 80,160,240,320,400 W,探究超声功率对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响。

(4) 超声时间:在超声功率 240 W,料液比 1:16 (g/mL),超声温度 35 ℃的条件下,控制超声时间分别为 30,40,50,60,70 min,探究超声时间对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响。

1.3.3 正交试验 根据单因素试验结果,选出适宜的超声功率、超声时间、超声温度和料液比,按 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验。

1.3.4 青稞酒糟醇溶蛋白得率测定 参考郭浩^[12]的方法。按式(1)计算青稞酒糟醇溶蛋白得率。

$$W = \frac{m_1}{M_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

W ——青稞酒糟醇溶蛋白得率,%;

m_1 ——青稞酒糟醇溶蛋白冻干粉质量,g;

M_0 ——提取该青稞酒糟醇溶蛋白粉所用的青稞酒糟粉的质量,g。

1.3.5 青稞酒糟醇溶蛋白等电点测定 参考苗欣月等^[13]的方法。

1.3.6 SDS-PAGE 分析 参考 Sahni 等^[14]的方法,并作适当修改:取适量青稞酒糟醇溶性蛋白冻干粉,并使用蒸馏水配制成质量浓度分别为 2,6,10,14 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的醇溶蛋白溶解液,醇溶蛋白溶解液与上样缓冲液按照 3:1 的体积比混合均匀,在沸水浴中浸泡 5 min,待蛋白发生变性后进行上样,用考马斯亮蓝进行染色,放置 2 d 进行脱色,并使用凝胶成像仪进行成像。

1.4 青稞酒糟醇溶蛋白的体外抗氧化试验

1.4.1 青稞酒糟醇溶蛋白清除 DPPH 自由基(DPPH·)能力测定 参考 Li 等^[15]的方法。以 V_c 作为阳性对照(质量浓度分别为 2,4,6,8,10 mg/mL),按式(2)计算 DPPH·清除率。

$$Y_1 = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

Y_1 ——DPPH·清除率,%;

A_1 ——样品的吸光度;

A_2 ——用无水乙醇替代 DPPH 的吸光度;

A_0 ——用无水乙醇替代样品的吸光度。

1.4.2 青稞酒糟醇溶蛋白清除羟自由基($\cdot\text{OH}$)能力测定 参考杨婷婷等^[16]的方法。按式(3)计算 $\cdot\text{OH}$ 清除率。

$$Y_2 = \left(1 - \frac{A_a - A_b}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

Y_2 —— $\cdot\text{OH}$ 清除率,%;

A_a ——样品反应的吸光度;

A_b ——用蒸馏水替换 H_2O_2 的吸光度;

A_0 ——用过氧化氢代替其中的样品溶液的吸光度。

1.4.3 青稞酒糟醇溶蛋白总还原力测定 参考牛秋云^[17]的方法。

1.5 数据处理

每组试验重复 3 次,最终数据用平均值 $\pm$ 标准差来表示,使用 SPSS 27.0 对试验数据进行显著性分析;用 Origin 2021 和 Excel 2019 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 料液比对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响 由图 1 可知,随着乙醇溶剂添加量的增加,青稞酒糟醇溶蛋白的得率先增加后减少,当料液比达到 1:16 (g/mL) 时,青稞酒糟醇溶蛋白的得率达到峰值,为 $(12.90 \pm 1.610)\%$ 。随着料液比提高,醇溶蛋白得率增加,可能是由于料液比的提高加速了溶液中分子的扩散与碰撞,促进蛋白质与提取液相接触,进而促进蛋白质分子的溶解,醇溶蛋白的得率随之升高^[18]。然而,当料液比超过此比例后,醇溶蛋白得率开始下降,这是由于溶剂富足,大部分醇溶蛋白已经溶出,溶液达到饱和,蛋白质分子分散性增加,若继续增加溶剂用量反而造成浪费^[19]。因此,选取 1:14,1:16,1:18 (g/mL) 3 个水平进行正交试验。

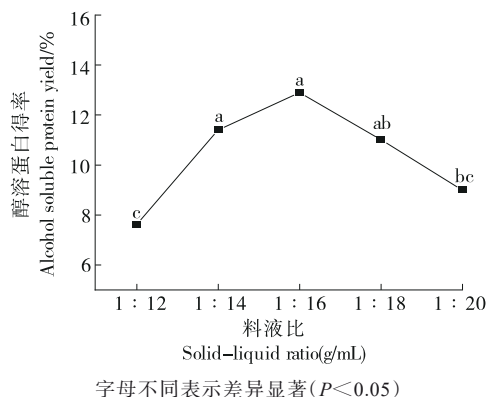
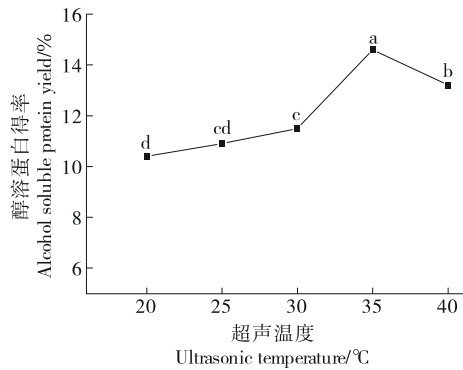


图 1 料液比对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响

Figure 1 Effect of solid-to-liquid ratio on the yield of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent

2.1.2 超声温度对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响 由图 2 可知,超声温度为 20~35 ℃时,青稞酒糟醇溶蛋白的得率呈上升趋势,当超声温度为 35 ℃时,醇溶蛋白得率达到最大值,为 $(14.60 \pm 0.300)\%$ 。这可能是由于超声温度刚开始升高时,分子热运动速度加快,青稞酒糟中的醇溶蛋白更易于从细胞中溶出,醇溶蛋白溶解度也随之提高^[13]。当超声温度高于 35 ℃时,青稞酒糟醇溶蛋白的得



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

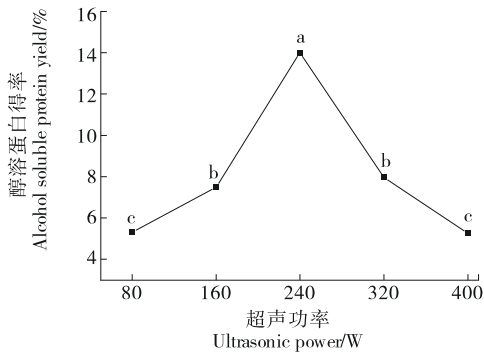
图2 超声温度对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响

Figure 2 Effect of ultrasound temperature on the yield of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent

率呈下降趋势,可能是由于温度过高导致青稞酒糟醇溶蛋白发生变性,从而造成其溶解性降低^[20]。因此,选取 30, 35, 40 °C 3 个水平进行正交试验。

2.1.3 超声功率对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响 由图 3 可知,在超声功率为 80~240 W 时,青稞酒糟醇溶蛋白得率呈上升趋势,当超声功率升高到 240 W 时,醇溶蛋白得率达到最高值,为 $(14.00 \pm 1.650)\%$ 。这可能是由于超声功率的增加,促使醇溶蛋白在提取液中发生剧烈运动,青稞酒糟醇溶蛋白的溶解性随之提高^[21]。但当超声功率提高到 240 W 后,醇溶蛋白得率逐渐降低,可能是由于在超声处理过程中,超声能量的强度对空化效应的影响显著。随着超声功率的增加,空化效应的强度也随之增强,蛋白质分子结构遭到破坏,蛋白质裂解或重构^[22-23]。因此,选取 160, 240, 320 W 3 个水平进行正交试验。

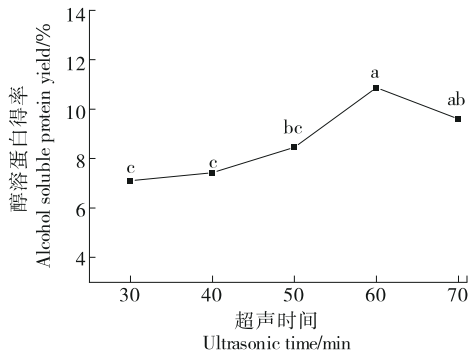
2.1.4 超声时间对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响 由图 4 可知,在超声时间为 30~60 min 时,青稞酒糟醇溶蛋白



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图3 超声功率对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响

Figure 3 Effect of ultrasound power on the yield of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图4 超声时间对青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响

Figure 4 Effect of ultrasound time on the yield of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent

得率逐渐增加,当超声时间为 60 min 时,醇溶蛋白得率达到最大值,为 $(10.87 \pm 1.010)\%$ 。但超声时间超过 60 min 后,青稞酒糟醇溶蛋白得率随超声时间的增加呈下降趋势,可能是由于醇溶蛋白经过一段时间的超声处理后其溶解量达到最大值,如继续超声处理,蛋白质会发生水解,导致得率降低。因此,选取 50, 60, 70 min 3 个水平进行正交试验。

2.2 正交试验

正交试验因素与水平见表 1,试验结果和差异性分析见表 2 和表 3。

表 1 正交试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	A 料液比 (g/mL)	B 超声温 度/°C	C 超声功 率/W	D 超声时 间/min
1	1:14	30	160	50
2	1:16	35	240	60
3	1:18	40	320	70

由表 2 可知,各因素对青稞酒糟中醇溶蛋白得率影响差异显著,按从大到小依次排列为料液比、超声功率、超声温度、超声时间;青稞酒糟醇溶蛋白最佳提取工艺组合为料液比 1:16 (g/mL)、超声温度 35 °C、超声功率 320 W、提取时间 60 min。由表 3 可知,料液比、超声温度、超声功率、超声时间的 P 值均小于极显著水平 (0.01),说明这 4 个因素对提取青稞酒糟醇溶蛋白得率的影响差异极显著。

为验证超声辅助乙醇法提取青稞酒糟醇溶蛋白的可行性,选取上述试验所得到的最佳工艺条件,即料液比为 1:16 (g/mL)、超声温度为 35 °C、超声功率为 320 W、提取时间为 60 min,在此条件下进行稳定性试验,通过试验得到的青稞酒糟醇溶蛋白得率为 $(18.50 \pm 0.020)\%$ 。因此,正交试验得到的优化工艺参数准确可靠。

表2 正交试验结果与分析

Table 2 Orthogonal test results and analysis

试验号	A	B	C	D	醇溶蛋白得率/%
1	1	1	1	1	9.63±0.740
2	1	2	2	2	10.73±0.450
3	1	3	3	3	11.17±0.640
4	2	1	2	3	11.70±0.610
5	2	2	3	1	17.67±0.600
6	2	3	1	2	15.03±0.320
7	3	1	3	2	12.67±0.320
8	3	2	1	3	12.07±0.310
9	3	3	2	1	11.10±0.720
k_1	10.51	11.33	12.24	12.80	
k_2	14.80	13.49	11.18	12.81	
k_3	11.94	12.43	13.83	11.64	
R	4.29	2.16	2.66	1.17	

表3 差异性分析[†]

Table 3 Difference analysis

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F值	P值
A	85.81	2	42.91	142.31	**
B	20.91	2	10.46	34.68	**
C	32.14	2	16.07	53.31	**
D	8.09	2	4.05	13.42	**
误差	5.42	18	0.30		

[†] **表示差异极显著($P<0.01$)。

2.3 青稞酒糟醇溶蛋白等电点分析

由图5可知,pH为3.0~4.0时,吸光度随着pH的增加而降低,pH为4.0~6.0时,随着pH的增加,吸光度逐渐升高,但总体来看在pH为4.0时青稞酒糟醇溶蛋白的吸光度达到最小值,表明此pH条件下醇溶蛋白沉淀最多,溶解度最低。因此,pH 4.0即为青稞酒糟醇溶蛋白的等电点。

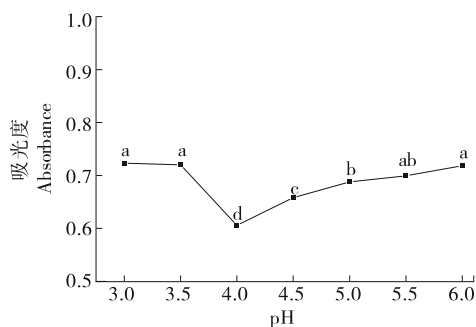


图5 青稞酒糟醇溶蛋白等电点的测定

Figure 5 Determination of the isoelectric points of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent

2.4 SDS-PAGE 分析

由图6可知,通过Marker的相对分子质量及在凝胶上的迁移距离分析,研究提取出的蛋白的相对分子质量主要分布在11~17和<11,与邓婷等^[10]的研究结果相一致,醇溶蛋白条带细小,主要分布在32~55和<15;由于该研究提取出的蛋白相对分子质量<15,所以可以确定提取出来的蛋白为醇溶蛋白,该醇溶蛋白为相对分子质量较小的蛋白,刘乐等^[24]研究发现,与相对分子质量较大的醇溶蛋白相比,相对分子质量较小的醇溶蛋白具有较好的抗氧化性。侯梦媛等^[8]研究分析白酒酒糟醇溶蛋白的相对分子质量分布时,分别分离提取到了相对分子质量为25和23的 α_1 -和 α_2 -醇溶蛋白以及18的 β -醇溶蛋白,与试验结果不同,可能是因为醇溶蛋白物质的来源不同,导致提取液中醇溶蛋白的组成和含量不同,从而影响了条带的相对分子质量分布。

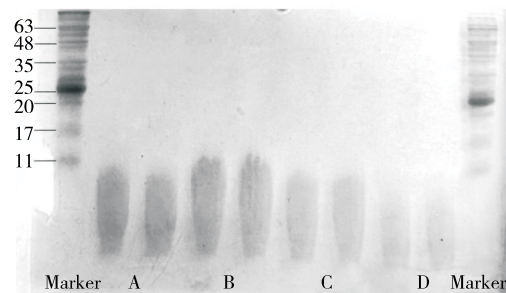
A. 14 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ B. 10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ C. 6 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ D. 2 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$

图6 不同浓度蛋白样品在12%分离胶条件下的SDS-PAGE电泳图谱

Figure 6 SDS-PAGE electrophoretogram of protein samples with different concentrations in 12% resolving gel

2.5 青稞酒糟醇溶蛋白的抗氧化性研究

2.5.1 DPPH·清除能力 由图7可知,青稞酒糟醇溶蛋白DPPH·清除率均随抗氧化剂质量浓度的增加而增大,并在相同质量浓度下,青稞酒糟醇溶蛋白DPPH·清除能力弱于 V_c ,醇溶蛋白质量浓度从2 mg/mL逐渐增大到10 mg/mL时,其DPPH·清除率也越来越大,可能是因为超声处理下,空化作用将醇溶蛋白中较多的疏水性氨基酸暴露在外层,易于与脂溶性的DPPH·相结合^[25]。此外,青稞酒糟醇溶蛋白质量浓度为2~10 mg/mL时DPPH·清除率为 $(29.80\pm 0.002)\%$ ~ $(54.00\pm 0.020)\%$,与王岩等^[26]测得的玉米醇溶蛋白在相同质量浓度范围内的DPPH·清除率接近。因此,青稞酒糟醇溶蛋白具有较好的DPPH·清除能力。

2.5.2 ·OH清除能力 由图8可知,青稞酒糟醇溶蛋白的·OH清除率随着抗氧化剂浓度的增加呈上升趋势,在质量浓度一定的情况下,青稞酒糟醇溶蛋白·OH清除能力弱于 V_c 。在质量浓度为2~10 mg/mL时,青稞酒糟醇溶

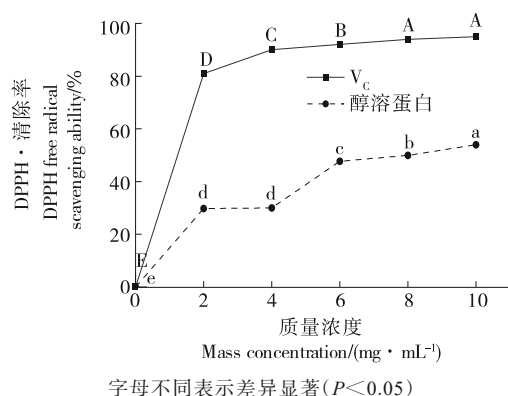


图7 青稞酒糟醇溶蛋白对DPPH·清除效果

Figure 7 Scavenging effect of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent on DPPH free radicals

蛋白·OH清除能力达到 $(18.90 \pm 0.002)\% \sim (22.90 \pm 0.010)\%$,王岩等^[26]提取的玉米醇溶蛋白在质量浓度为2 mg/mL时·OH清除率为22.12%,与青稞酒糟醇溶蛋白在质量浓度为10 mg/mL时结果相接近,表明青稞酒糟醇溶蛋白在一定的质量浓度范围内具有较好的·OH清除能力。

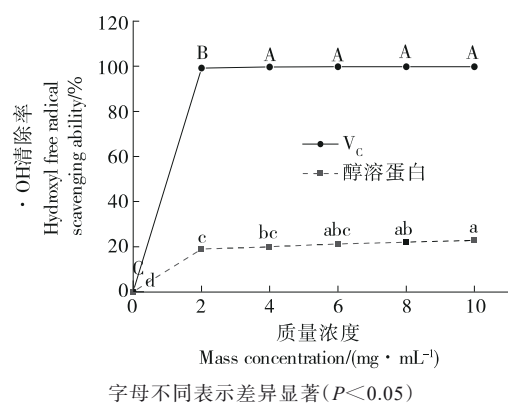


图8 青稞酒糟醇溶蛋白对·OH清除效果

Figure 8 Scavenging effect of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent on hydroxyl free radicals

2.5.3 总还原能力 由图9可知,青稞酒糟醇溶蛋白质量浓度与V_c浓度相同的情况下,青稞酒糟醇溶蛋白的还原能力弱于V_c。当蛋白质量浓度升高至10 mg/mL时,其对Fe³⁺的还原能力达到最大值 0.50 ± 0.100 。因此,青稞酒糟醇溶蛋白具有较好的还原能力。

3 结论

通过单因素和正交试验对青稞酒糟醇溶蛋白提取进行优化,得到的最佳提取工艺条件为料液比1:

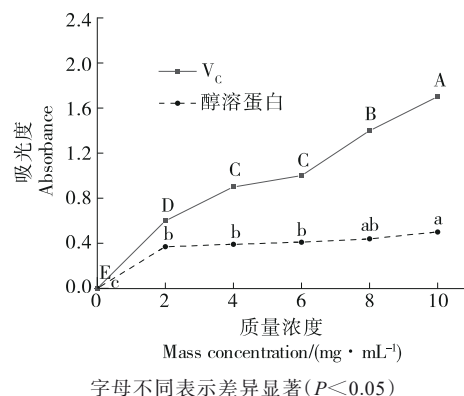


图9 青稞酒糟醇溶蛋白的总还原能力

Figure 9 Total reducing powder of alcohol-soluble proteins from highland barley fermentation spent

16 (g/mL)、超声温度35℃、超声功率320 W、提取时间60 min,在此条件下青稞酒糟醇溶蛋白得率为 $(18.50 \pm 0.020)\%$,此外,根据SDS-PAGE电泳鉴定分析提取蛋白的相对分子质量主要为11~17和<11,进一步确定其为醇溶蛋白,从而得知该研究设计得到的工艺条件具有较好的可行性。体外抗氧化试验结果表明,青稞酒糟醇溶蛋白的体外抗氧化活性虽弱于抗坏血酸,但仍具有较好的体外抗氧化活性,可应用于食品涂膜保鲜,延长食品的货架期。

参考文献

- [1] RICO D, PEÑAS E, DEL CARMEN GARCÍA M, et al. Sprouted barley flour as a nutritious and functional ingredient [J]. Foods, 2020, 9(3): 296.
- [2] 刘新红, 杨希娟, 吴昆仑, 等. 青稞品质特性及加工利用现状分析[J]. 农业机械, 2013(14): 49-53.
LIU X H, YANG X J, WU K L, et al. Analysis of quality characteristics and processing utilization status of highland barley[J]. Farm Machinery, 2013(14): 49-53.
- [3] WANG J J, WANG Y X, WANG Q Y, et al. Mechanically strong and highly tough prolamin protein hydrogels designed from double-cross-linked assembled networks[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2019, 1(6): 1 272-1 279.
- [4] 张有香, 唐东恒, 赵国华, 等. 青稞酒窖池内不同层次酒醅酒体风味物质的研究[J]. 酿酒科技, 2024(11): 72-76, 81.
ZHANG Y X, TANG D H, ZHAO G H, et al. Flavor substances of fermented grains in different layers in the pit of highland barley Baijiu[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2024 (11): 72-76, 81.
- [5] 李倩, 裴朝曦, 王之盛, 等. 不同类型酒糟营养成分组成差异的比较研究[J]. 动物营养学报, 2018, 30(6): 2 369-2 376.
LI Q, PEI C X, WANG Z S, et al. Comparative study nutrients compositions of different types of distillers' grains[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(6): 2 369-2 376.
- [6] 胡倩楠. 酒糟营养品质评价及酒糟醇溶蛋白的理化特性研究[D]. 太原: 山西大学, 2021: 12-18.

- HU Q N. Evaluation of nutritional quality of distiller's grains and study on the physicochemical properties of the prolamin [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021: 12-18.
- [7] ZENG X Q, GUO Y, XU Q J, et al. Origin and evolution of qingke barley in Tibet[J]. Nat Commun, 2018, 9: 5 433.
- [8] 侯梦媛, 范文来, 徐岩. 白酒酒糟中醇溶蛋白的提取及性质比较[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(19): 99-103.
- HOU M Y, FAN W L, XU Y. Extraction and characterization comparison of prolamin from wet and dried distiller's grains of Baijiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(19): 99-103.
- [9] CARCIOCHI R A, SOLOGUBIK C A, FERNÁNDEZ M B, et al. Extraction of antioxidant phenolic compounds from brewer's spent grain: optimization and kinetics modeling[J]. Antioxidants, 2018, 7(4): 45.
- [10] 邓婷, 党斌, 张文刚, 等. 青稞不同组分蛋白提取方法比较研究[J]. 农产品加工, 2022(19): 51-57, 63.
- DENG T, DANG B, ZHANG W G, et al. Comparative study on extraction methods of protein from different components of highland[J]. Agricultural Products Processing, 2022(19): 51-57, 63.
- [11] 邹张顺. 超声辅助提取玉米醇溶蛋白的优化[J]. 现代食品, 2016(3): 68-71.
- ZOU Z S. Optimization of zein ultrasonic assisted extraction [J]. Modern Food, 2016(3): 68-71.
- [12] 郭浩. 人参醇溶性蛋白结构表征及抗炎活性研究[D]. 长春: 长春中医药大学, 2024: 8.
- GUO H. Structural characterization and anti-inflammatory of ginsengalcohol soluble proteins[D]. Changchun: Changchun University of Chinese Medicine, 2024: 8.
- [13] 苗秋月, 朱立斌, 朱丹, 等. 超声辅助提取毛酸浆籽蛋白质的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 190-196.
- MIAO X Y, ZHU L B, ZHU D, et al. Optimization of ultrasonic assisted extraction protein from the *Physalis pubescens* L. Seed[J]. Food Industry Technology, 2021, 42 (19): 190-196.
- [14] SAHNI P, SHARMAS S, SURASANI V K R. Influence of processing and pH on amino acid profile, morphology, electrophoretic pattern, bioactive potential and functional characteristics of alfalfa protein isolates[J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127503.
- [15] LI P X, HE D H, GONG M Y, et al. Comparative study on DPPH free radical scavenging activity of 25 kinds of traditional Chinese medicinal plants[J]. European Journal of Medicinal Plants, 2019, 28(2): 1-6.
- [16] 杨婷婷, 罗毅皓, 张艺炜. 青稞酒糟多酚提取工艺优化及其抗氧化性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(19): 140-146.
- YANG T T, LUO Y H, ZHANG Y W, et al. Optimization of the extraction process and antioxidant properties of polyphenols from highland barley fermentation spent[J]. Food Research and Development, 2023, 44(19): 140-146.
- [17] 牛秋云. 小麦胚芽蛋白糖基化产物抗氧化特性研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 32-37.
- NIU Q Y. Study on antioxidant properties of glycosylated products of wheat germ protein[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 32-37.
- [18] 魏雅静, 杨宇, 祝开阳. 平欧榛子分离蛋白提取条件优化[J]. 食品安全导刊, 2022(11): 70-72.
- WEI Y J, YANG Y, ZHU K Y. Optimization of extraction conditions of flat-european hybrid hazelnut protein isolated[J]. China Food Safety Magazine, 2022(11): 70-72.
- [19] 刘梦, 谢超, 张林松, 等. 响应面法优化金钱白花蛇醇溶蛋白提取工艺[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(2): 73-77.
- LI M, XIE C, ZHANG L S, et al. Optimization of extraction process of gliadin from Bungarus multicinctus by response surface methodology[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(2): 73-77.
- [20] 韩丽丽, 杨志伟. 响应面优化超声波提取薏米蛋白工艺[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(12): 73-77.
- HAN L L, YANG Z W. Optimization of ultrasonic extraction process of protein from barley using response surface method [J]. Cereals & Oils, 2017, 30(12): 73-77.
- [21] 白复笑, 李萌萌, 卞科, 等. 超声波改性大豆蛋白研究进展 [J]. 大豆科学, 2018, 7(3): 471-476.
- BAI F X, LI M M, BIAN K, et al. Research progress of ultrasonic modified soybean protein[J]. Soybean Science, 2018, 37(3): 471-476.
- [22] 孙筱. 高强度超声对芸豆蛋白理化和功能特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(2): 93-96.
- SUN X. Effects of high-intensity ultrasound on physicochemical and functional properties of kidney bean protein[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(2): 93-96.
- [23] 衣程远, 孙冰玉, 刘琳琳, 等. 超声处理对大豆蛋白结构及性质的影响研究进展[J]. 中国调味品, 2022, 47(12): 197-200.
- YI C Y, SUN B Y, LIU L L, et al. Research progress on the effect of ultrasonic treatment on structure and properties of soybean protein[J]. China Condiment, 2022, 47(12): 197-200.
- [24] 刘乐, 李艳, 连加达, 等. 藜麦醇溶蛋白的氨基酸组成、抗氧化性与乳化性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 181-187.
- LIU L, LI Y, LIAN J D, et al. Amino acid composition, antioxidant activity and emulsion properties of quinoa prolamine[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(13): 181-187.
- [25] 黄点点. 白酒丢糟醇溶蛋白的提取及其制备负载姜黄素纳米颗粒的初步探究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024: 33-34.
- HUANG D D. Extraction of gliadin from Baijiu distiller's grains and preliminary study on preparation of curcumin loaded nanoparticles[D]. Guiyang: Guizhou University, 2024: 33-34.
- [26] 王岩, 王建宇, 于璐, 等. 响应面法优化玉米醇溶蛋白提取工艺及抗氧化活性评价[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(4): 55-64.
- WANG Y, WANG J Y, YU L, et al. Optimization of zein extraction process by response surface methodology and evaluation of antioxidant activity[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(4): 55-64.