

# 青稞酒糟多酚提取工艺优化及其抗氧化性

杨婷婷<sup>1</sup>, 罗毅皓<sup>1\*</sup>, 张艺炜<sup>1</sup>, 冯声宝<sup>2</sup>, 孙万成<sup>1</sup>, 谈婷<sup>1</sup>, 李善文<sup>2</sup>, 孔令武<sup>2</sup>

(1. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海互助天佑德青稞酒股份有限公司, 青海 海东 810500)

**摘要:** 以青稞酒糟(highland barley fermentation spent, HBFS)为原料, 采用超声波辅助乙醇法提取青稞酒糟多酚。选取超声温度、料液比、超声时间和超声功率4个影响因素, 通过单因素试验探究4个影响因素对青稞酒糟多酚得率的影响, 再通过正交试验优化提取工艺, 并通过体外抗氧化试验来评价青稞酒糟多酚抗氧化能力。结果表明, 青稞酒糟多酚的最佳提取工艺为超声功率400 W、超声温度45℃、超声时间50 min和料液比1:20 (g/mL), 在该条件下青稞酒糟多酚得率为(3.337 1±0.149 8) mg/g, 此外, 体外抗氧化活性试验结果表明, 青稞酒糟多酚对DPPH·、·OH和·O<sub>2</sub><sup>-</sup>有较好的清除效果, 当青稞酒糟多酚浓度为21 μg/L时, 对DPPH·、·OH和·O<sub>2</sub><sup>-</sup>的清除率分别为(83.76±1.35)%、(52.05±2.09)%、(76.88±1.47)%。

**关键词:** 青稞酒糟; 多酚; 超声波辅助提取; 自由基清除; 抗氧化活性

## Optimization of the Extraction Process and Antioxidant Properties of Polyphenols from Highland Barley Fermentation Spent

YANG Tingting<sup>1</sup>, LUO Yihao<sup>1\*</sup>, ZHANG Yiwei<sup>1</sup>, FENG Shengbao<sup>2</sup>, SUN Wancheng<sup>1</sup>, TAN Ting<sup>1</sup>, LI Shanwen<sup>2</sup>, KONG Lingwu<sup>2</sup>

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

2. Qinghai Huzhu Tianyoude Highland Barley Liquor Co., Ltd., Haidong 810500, Qinghai, China)

**Abstract:** The ultrasound-assisted ethanol extraction method was used to extract the total polyphenols from highland barley spent grains. Four factors, including ultrasound temperature, solid-liquid ratio, ultrasound time, and ultrasound power, were selected to explore their effects on the yield of total polyphenols from highland barley spent grains through single-factor experiments. Then the optimal extraction process was optimized by orthogonal experiments, and the antioxidant properties of total polyphenols from highland barley spent grains were evaluated by *in vitro* antioxidant assays. The results showed that the optimal extraction process for highland barley spent grains polyphenols was as follows: ultrasound time of 50 min, ultrasound power of 400 W, ultrasound temperature of 45 °C, and solid-liquid ratio of 1 : 20 (g/mL). Under those conditions, the extraction rate of total polyphenols from highland barley spent grains was (3.337 1±0.149 8) mg/g. Furthermore, *in vitro* antioxidant activity assays demonstrated that highland barley spent grains polyphenols had good scavenging effects on DPPH·, ·OH and ·O<sub>2</sub><sup>-</sup>, with clearance rates of (83.76±1.35)%, (52.05±2.09)%, and (76.88±1.47)% at a concentration of 21 μg/L, respectively.

**Key words:** highland barley fermentation spent; polyphenols; ultrasonic-assisted extraction; free radical scavenging; antioxidant property

引文格式:

杨婷婷, 罗毅皓, 张艺炜, 等. 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 Tingting, LUO Yihao, ZHANG Yiwei, 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.

青稞是种植在高原缺氧环境中的一种特色农作物, 与酿酒常用的高粱相比, 青稞的营养成分具有一

定优越性, 含有更丰富的β-葡聚糖、多酚和维生素B等营养物质<sup>[1]</sup>。目前有研究发现青稞总多酚含量可达

作者简介: 杨婷婷(1998—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全。

\* 通信作者: 罗毅皓(1976—), 女(汉), 副教授, 研究方向: 功能食品。

到 414.55 mg/100 g,比燕麦和藜麦中的总多酚含量更高<sup>[2]</sup>,且不同品种和产地的青稞中总多酚含量存在显著差异<sup>[3]</sup>。青稞多酚提取物中主要以结合酚为主<sup>[4]</sup>,其次为游离酚。经过发酵处理后的青稞多酚抗氧化能力提高,即在微生物作用下多酚以游离态溶出,使游离多酚和结合多酚的含量均显著增加,且总多酚与抗氧化活性之间存在极强的相关性,因此总多酚含量增加能提升青稞多酚的抗氧化活性<sup>[5]</sup>。

青稞酒是以青稞为主要原料,采用“清蒸清烧四次清”的独特酿造工艺制成的清香型白酒。与传统高粱酒相比,青稞酒酸和酯的比例较低,微量风味成分的含量更丰富,含有 18 种对人体健康有益的差异萜烯类物质<sup>[6]</sup>。

青稞酒糟(highland barley fermentation spent, HBFS)是青稞酒酿造后剩余的酒渣,别名酒醅糟和粕,是一种纯青稞原粮酒糟<sup>[7]</sup>。湿青稞酒糟产量大,目前青稞酒的年销量 1.13 万 t<sup>[8]</sup>,酿造 1 t 青稞酒会产生 1 t 左右的 HBFS。前期研究发现酿造后的酒糟中含有多酚、维生素、蛋白质、 $\gamma$ -氨基丁酸以及  $\beta$ -葡聚糖等物质<sup>[9]</sup>,Gibreel 等<sup>[10]</sup>研究发现,酒糟中含有丰富的酚类化合物。与传统高粱酒糟相比,青稞酒糟中单宁含量更低,蛋白质和碳水化合物含量更高<sup>[11]</sup>,同时青稞酒糟 pH 值约为 3.5,营养丰富的酸性环境利于微生物生长,导致酒糟腐败,从而造成环境污染和资源浪费。因此,以酒糟为原料提取活性成分能有效防止环境污染,且具有低成本、高效益等优点。

目前国内外学者的研究成果表明,HBFS 最主要的利用途径是制成饲料和肥料<sup>[12]</sup>,但这种简单的处理方式会造成资源浪费及产品附加值低。有学者研究发现微波提取的啤酒麦糟(brewers' spent grain, BSG)的酚类化合物具有良好的抗氧化能力<sup>[13]</sup>;Landeka Jurčević 等<sup>[14]</sup>研究发现葡萄酒糟多酚对抗氧化应激有显著作用。因此,研究青稞酒糟酚类化合物的抗氧化活性,是实现青稞酒糟高值化利用的有效途径之一。

目前超声波辅助提取已应用于多种植物化合物的提取<sup>[15]</sup>,通过提高萃取温度,提高待萃取植物化合物的溶解度,显著缩短提取时间,但易氧化的酚类化合物长时间暴露于高温环境中会加速氧化。因此,获得最佳的提取温度、提取时间和料液比对于最大限度地提高工艺得率和目标化合物的稳定性非常重要。本研究采用超声波辅助提取青稞酒糟多酚并对其进行体外抗氧化活性研究,以期后续开发新型抗氧化产品提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与仪器

青稞酒糟:青海互助天佑德青稞酒股份有限公司;

1.1-二苯基-2-苦肼基(1.1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)( $\geq 97.0\%$ )(生化试剂):合肥博美生物科技有限责任公司;福林酚试剂(生化试剂):北京索莱宝科技有限公司;抗坏血酸( $V_C$ )(分析纯):天津市福晨化学试剂有限公司;没食子酸标准品(纯度 $\geq 98.0\%$ ):北京奥科生物技术有限责任公司。

潮汐研磨机(800A):东莞市华太电器有限公司;电子分析天平(ESJ110-413):沈阳龙腾电子有限公司;双光束紫外可见分光光度计(UV-1780):岛津仪器(苏州)有限公司;数显恒温水浴锅(HH-6):常州市金坛友联仪器研究所;循环水式多用真空泵(SHB-III):郑州长城科工贸有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 样品前处理

取一定量干酒糟,潮汐研磨机打粉。过 80 目筛,备用。

#### 1.2.2 单因素试验

根据朱俊玲等<sup>[16]</sup>的方法稍作修改,得到多酚提取液,于 4 °C 冰箱中保存,待测。

固定超声温度 60 °C,料液比 1 : 15 (g/mL),超声时间 40 min,考察超声功率(240、320、400、480、560 W)对多酚得率的影响。

固定超声温度 60 °C,料液比 1 : 15 (g/mL),超声功率 400 W,考察超声时间(30、35、40、45、50 min)对多酚得率的影响。

固定料液比 1 : 15 (g/mL),超声功率 400 W,超声时间 40 min,考察超声温度(40、45、50、55、60 °C)对多酚得率的影响。

固定超声温度 60 °C,超声功率 400 W,超声时间 40 min,考察料液比[1:5、1:10、1:15、1:20、1:25 (g/mL)]对多酚得率的影响。

#### 1.2.3 正交试验

根据单因素试验结果,选择超声温度、超声功率、超声时间和料液比进行四因素四水平的正交试验对提取工艺进行优化。正交试验因素与水平如表 1 所示。

表 1 正交试验因素与水平  
Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	A 超声功率/W	B 超声温度/°C	C 超声时间/min	D 料液比/(g/mL)
1	320	40	35	1:5
2	400	45	40	1:10
3	480	50	45	1:15
4	560	55	50	1:20

#### 1.2.4 多酚得率测定的计算

参考 T/AHFIA 005—2018《植物提取物及其制品中总多酚含量的测定 分光光度法》<sup>[17]</sup>稍作修改进行检测。

标准曲线的制作:称取一定量的没食子酸标准品,用水配制成浓度为0、4、8、12、20、30 mg/L的溶液。取1.0 mL没食子酸溶液、2.5 mL福林酚试剂和2.5 mL 15% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液加入10 mL具塞试管中,蒸馏水定容至刻度,振荡1 min,于40℃水浴中反应60 min,在750 nm波长下测定吸光度。

待测液的配制:将1.0 mL青稞酒糟多酚提取液加入10 mL容量瓶中,用9 mL 60%乙醇定容至刻度,超声处理10 min后,静置待测。

将1.0 mL待测液、2.5 mL福林酚试剂和2.5 mL 15% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液加入10 mL具塞试管中,加蒸馏水定容至刻度,摇匀。40℃水浴60 min,静置冷却20 min,待测。

多酚含量计算公式如下。

$$X=c \times 10 \times n$$

式中: $X$ 表示提取液中的多酚含量,mg/mL; $c$ 表示由标准曲线计算得出的待测液中的多酚含量,mg/mL; $10$ 表示稀释倍数; $n$ 表示样品稀释倍数。

多酚得率计算公式如下。

$$A = \frac{X \times v}{m}$$

式中: $A$ 表示多酚得率,mg/g; $X$ 表示提取液中多酚的含量,mg/mL; $v$ 表示提取液总体积,mL; $m$ 表示HBF<sub>3</sub>的质量,g。

### 1.3 青稞酒糟多酚的体外抗氧化试验

#### 1.3.1 对DPPH·的清除效果

参考Abeynayake等<sup>[18]</sup>的方法稍作修改。向具塞试管内加入0.5 mL样品液和2 mL 0.04 mg/mL DPPH溶液(吸光度记为 $A_i$ ),取无水乙醇代替DPPH溶液(吸光度记为 $A_j$ ),取无水乙醇代替其中的样品溶液(吸光度记为 $A_0$ ),上述3种混合液混匀后于室温下放置30 min,2 000 r/min离心10 min,取上清液在517 nm处测定吸光度。 $V_c$ 做阳性对照。DPPH·清除率( $Y_1$ ,%)计算公式如下。

$$Y_1 = [1 - (A_i - A_j) / A_0] \times 100$$

#### 1.3.2 对羟基自由基(·OH)的清除效果

参考谷睿等<sup>[19]</sup>的方法进行检测。取1 mL 8.8 mmol/L过氧化氢溶液、1 mL 9 mmol/L硫酸铁溶液、1 mL 9 mmol/L水杨酸-乙醇溶液,不同浓度的样品溶液1 mL和去离子水(吸光度记为 $A_x$ );用去离子水替代其中的过氧化氢溶液(吸光度记为 $A_y$ ),用过氧化氢代替其中的样品溶液(吸光度记为 $A_0$ ),摇匀后于37℃水浴15 min,在510 nm处测定吸光度。以 $V_c$ 作为阳性对照。·OH清除率( $Y_2$ ,%)计算公式如下。

$$Y_2 = [1 - (A_x - A_y) / A_0] \times 100$$

#### 1.3.3 对超氧自由基(·O<sub>2</sub><sup>-</sup>)的清除效果

参考Kiss等<sup>[20]</sup>的方法稍作修改。4 425 μL 50 mmol/L

Tris-HCl缓冲液,加入邻苯三酚溶液75 μL,迅速混合,每30 s记录1次读数,30 s时的吸光度记为 $A_{30}$ ;300 s时的吸光度记为 $A_{300}$ ,即 $\Delta A_0 = A_{300} - A_{30}$ 。

取450 μL样品溶液,2 500 μL 50 mmol/L Tris-HCl缓冲液(pH7.4),再加邻苯三酚溶液50 μL,迅速混合,每30 s记录1次读数,30 s时的吸光度记为 $A_{30}$ ;300 s时的吸光度记为 $A_{300}$ ,即 $\Delta A_{\text{样}} = A_{300} - A_{30}$ 。空白对照组以相同体积蒸馏水代替样品。 $\cdot O_2^-$ 清除率( $Y_3$ ,%)计算公式如下。

$$Y_3 = (\Delta A_0 - \Delta A_{\text{样}}) / \Delta A_0 \times 100$$

### 1.4 数据统计与分析

采用IBM SPSS statistics 24软件对数据进行显著性分析,以 $P < 0.05$ 表示差异显著,绘图选用Origin Pro软件,所有试验至少重复3次,数据以平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 青稞酒糟多酚的提取工艺优化

#### 2.1.1 青稞酒糟多酚含量的测定结果

标准曲线见图1。

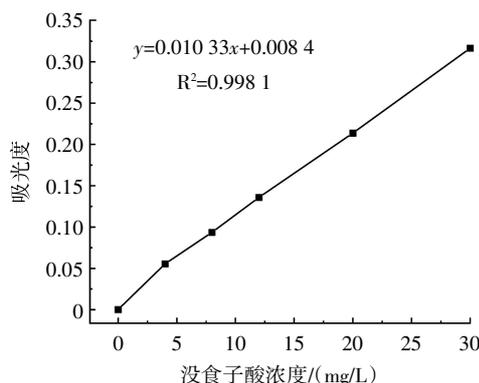


图1 标准曲线

Fig.1 Standard curve

采用不同浓度没食子酸制作标曲,得到线性方程 $y = 0.01033x + 0.0084$ , $R^2 = 0.9981$ ,线性关系良好。对照标准曲线方程,计算待测液中青稞酒糟的多酚含量。

#### 2.1.2 单因素试验

##### 2.1.2.1 超声功率对多酚得率的影响

超声功率对多酚得率的影响见图2。

由图2可知,超声功率在240~400 W时,青稞酒糟多酚得率随着超声功率增加而增加,超声功率在400~560 W时,青稞酒糟多酚得率随着超声功率增加而减少,在400 W时达到最大值。随着超声功率的增加,超声波的空化效应使青稞酒糟中植物细胞壁被大量破坏,加速多酚进入提取溶剂中,但当超声功率过高时,较高的超声功率产生热效应使提取溶剂中部分多酚溶解,导致多酚得率降低。因此选择320、400、480、

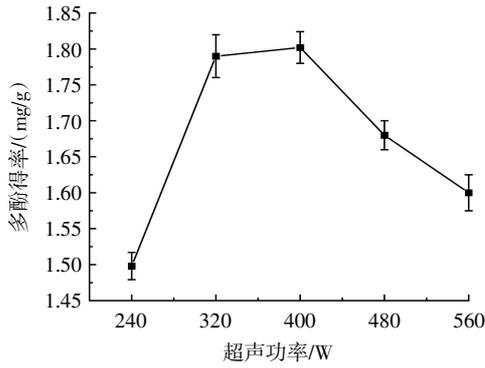


图2 超声功率对多酚得率的影响

Fig.2 Effect of ultrasound power on yield of polyphenols

560 W 进行正交试验。

2.1.2.2 超声时间对多酚得率的影响

超声时间对多酚得率的影响见图3。

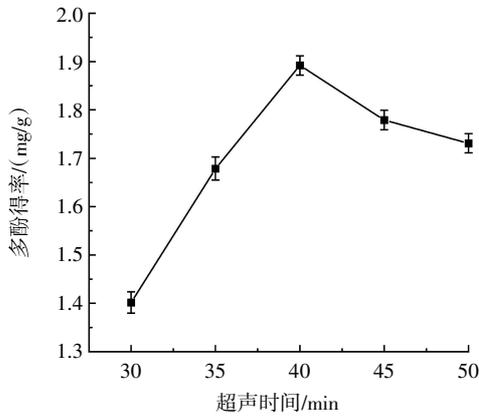


图3 超声时间对多酚得率的影响

Fig.3 Effect of ultrasound time on yield of polyphenols

由图3可知,随着提取时间延长,青稞酒糟的多酚得率先增大后减小,在超声40 min时达到峰值。出现这种现象的原因可能是超声时间越长越利于多酚溶出,但多酚长时间处于高温环境和超声环境中,超声波的热效应对青稞酒糟多酚的稳定性产生不利影响,溶液中部分多酚类物质降解,导致多酚得率降低。因此选择35、40、45、50 min进行正交试验。

2.1.2.3 超声温度对多酚得率的影响

超声温度对多酚得率的影响见图4。

由图4可知,超声温度低于55℃时,多酚得率随着温度升高而增加,可能是因为温度升高,分子热运动加快,加快多酚浸出的速度。多酚得率在55℃时达到最大值,当超声温度从55℃升高到60℃时,多酚得率随温度升高而减小。出现这种现象可能是因为植物多酚对高温环境比较敏感,60℃的超声温度过高,高温环境破坏部分青稞酒糟多酚的结构,同时高温环境会加速提取溶剂挥发,影响提取的料液比,从而导致青稞酒糟多酚得率降低。因此选择40、45、50、55℃进

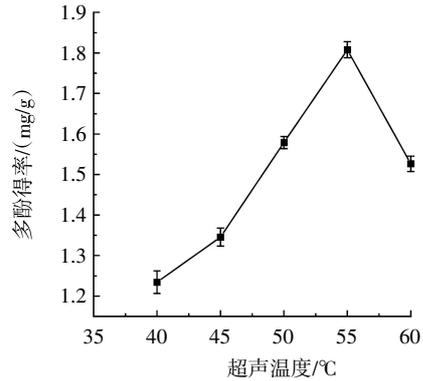


图4 超声温度对多酚得率的影响

Fig.4 Effect of ultrasound temperature on yield of polyphenols

行正交试验。

2.1.2.4 料液比对多酚得率的影响

多酚类物质为多羟基化合物,这类物质能溶于水,易溶于乙醇,但由于水中存在部分溶解氧,容易导致多酚类物质的氧化,影响多酚的抗氧化能力,因此选择乙醇作为提取溶剂。料液比对多酚得率的影响见图5。

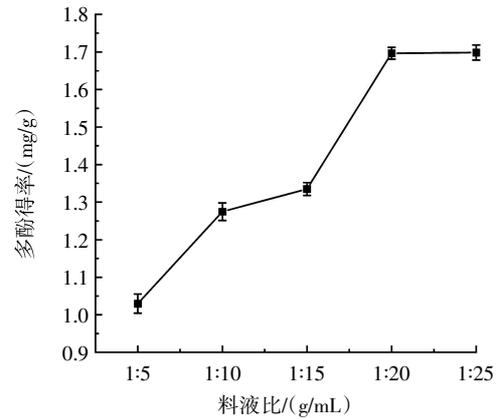


图5 料液比对多酚得率的影响

Fig.5 Effect of solid-liquid ratio on yield of polyphenols

由图5可知,当溶剂添加量逐渐增加,多酚得率逐渐增大,但料液比1:25(g/mL)时的多酚得率较1:20(g/mL)增幅较小,提取时使用的溶剂量过多,提取液中会溶解更多杂质,为避免溶剂浪费,提高提取液中多酚类物质的纯度,所以选择1:5、1:10、1:15、1:20(g/mL)进行正交试验。

2.1.3 正交试验结果与分析

正交试验结果和差异性分析见表2和表3。

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	多酚得率/(mg/g)
1	1	1	1	1	0.693 0
2	3	3	2	3	1.672 7

续表2 正交试验结果与分析

Continue table 2 Orthogonal test results and analysis

试验号	A	B	C	D	多酚得率/(mg/g)
3	4	4	1	2	0.396 5
4	2	2	1	1	1.698 5
5	2	4	3	1	1.029 7
6	4	3	1	1	0.498 1
7	3	2	4	4	2.675 7
8	1	4	4	3	1.337 1
9	4	1	4	2	1.393 2
10	1	3	3	2	1.258 3
11	2	3	4	4	3.055 7
12	3	1	2	3	1.931 7
13	2	1	3	4	2.286 4
14	4	4	2	2	0.259 2
15	3	2	3	3	1.307 7
16	1	2	2	4	2.085 0
K <sub>1</sub>	5.373 4	6.304 3	3.286 1	3.919 3	
K <sub>2</sub>	8.070 3	7.766 9	5.948 6	3.307 2	
K <sub>3</sub>	7.942 5	6.484 8	5.882 1	6.249 2	
K <sub>4</sub>	2.547 0	3.022 5	8.461 7	10.102 8	
k <sub>1</sub>	1.343 4	1.576 1	0.821 5	0.979 8	
k <sub>2</sub>	2.017 6	1.941 7	1.487 2	0.826 8	
k <sub>3</sub>	1.985 6	1.621 2	1.470 5	1.562 3	
k <sub>4</sub>	0.636 8	0.755 6	2.115 4	2.525 7	
R	1.380 8	1.186 1	1.293 9	1.698 9	

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	2.55	3	0.85	18.999	0.018 7
B	0.769	3	0.256	5.728	0.092 8
C	1.124	3	0.375	8.276	0.057 2
D	7.812	3	2.604	58.206	0.003 7

注:  $P < 0.05$  表示影响显著;  $P < 0.01$  表示影响极显著。

由表2可知,不同提取因素对青稞酒糟多酚得率影响程度不同,在4种因素中料液比对多酚得率的影响最大。由表3可知,超声功率的 $P$ 值小于显著水平,说明不同超声功率在青稞酒糟多酚得率上存在显著差异,料液比的 $P$ 值小于极显著水平(0.01),说明不同料液比提取的青稞酒糟多酚得率差异极显著。

在最优提取工艺  $A_2B_2C_4D_4$  下,即超声功率 400 W、超声温度 45℃、超声时间 50 min、料液比 1:20 (g/mL),多酚的得率为  $(3.337 1 \pm 0.149 8)$  mg/g,与朱俊玲等<sup>[16]</sup>相比多酚的提取率提高了 1.8 倍左右,与夏陈等<sup>[21]</sup>的研究结果相比提高了 2 倍。出现这种现象的原因可能是不同品种的青稞以及青稞栽种环境影响了青稞中的多酚含量,同时有研究发现青稞经过发酵处理后,在微生物

的代谢产物作用下,游离酚和结合酚的含量均增加<sup>[22]</sup>。还有研究表明,不同的酿酒工艺也会影响青稞酒糟中多酚的含量,导致多酚得率的变化<sup>[12]</sup>。

## 2.2 青稞酒糟多酚的体外抗氧化试验

### 2.2.1 对 DPPH· 的清除效果

不同浓度青稞酒糟多酚对 DPPH· 的清除效果见图 6。

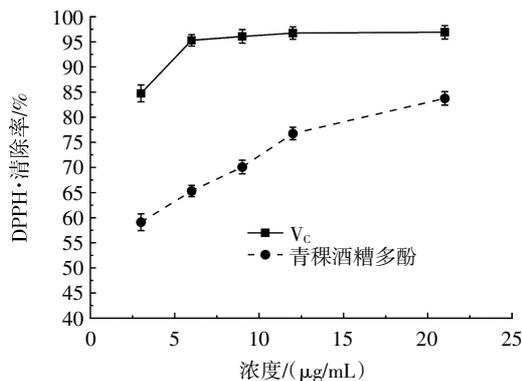


图6 不同浓度青稞酒糟多酚对 DPPH· 的清除效果

Fig.6 DPPH· scavenging effects of polyphenols at different concentrations

由图6可知,当青稞酒糟浓度为 21 μg/mL 时,对 DPPH· 的清除率最高,为  $(83.76 \pm 1.35)\%$ ,表明青稞酒糟多酚对 DPPH· 有良好的清除效果。与黄酒糟<sup>[23]</sup>和其他白酒酒糟<sup>[24]</sup>相比,青稞酒糟多酚对 DPPH· 的清除效果更好,但茶酒糟多酚对 DPPH· 的清除效果优于青稞酒糟多酚<sup>[25]</sup>。可能是因为多酚类物质的来源不同,导致提取液中酚类物质种类及含量不同,影响对 DPPH· 的清除效果。即所使用的谷物类型可能对酚类成分和抗氧化特性产生至关重要的影响<sup>[26]</sup>。

### 2.2.2 对 ·OH 的清除效果

不同浓度青稞酒糟多酚对 ·OH 的清除效果见图 7。

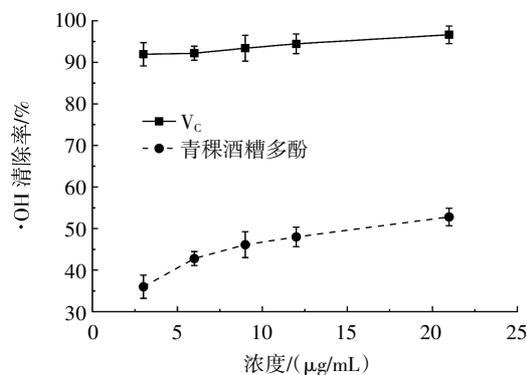


图7 不同浓度青稞酒糟多酚对 ·OH 的清除效果

Fig.7 ·OH scavenging effects of polyphenols at different concentrations

由图7可知,青稞酒糟多酚表现出较强的抗氧化性,经计算得出青稞酒糟多酚对 ·OH 的  $IC_{50}$  为 14.79 μg/mL,

在相同质量浓度下,青稞酒糟多酚对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率高于青稞多酚<sup>[27]</sup>,出现这种现象可能是因为发酵青稞比未发酵青稞的 $\cdot\text{OH}$ 的清除效果更好,发酵过程中受微生物种类的影响,多酚化合物的种类和含量出现了明显变化,导致抗氧化能力改变。同时已有试验证明,经过微波处理的BSG会产生具有高抗氧化活性的美拉德反应产物,即羟基肉桂酸的衍生物,对 $\cdot\text{OH}$ 的清除具有积极效果<sup>[28]</sup>。

### 2.2.3 对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除效果

多酚类化合物中对 $\cdot\text{O}_2^-$ 起主要清除作用的是A环和B环上的羟基,其中邻位羟基具有更好的清除能力<sup>[29]</sup>。不同浓度青稞酒糟多酚对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除效果见图8。

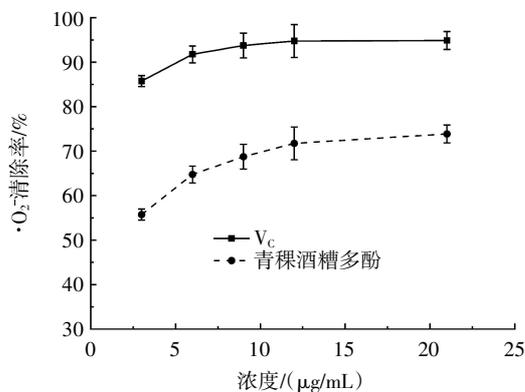


图8 不同浓度青稞酒糟多酚对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除效果

Fig.8  $\cdot\text{O}_2^-$  scavenging effects of polyphenols at different concentrations

由图8可知,多酚提取物的抗氧化能力与提取物中的总酚含量呈正相关。当青稞酒糟多酚浓度为 $21\ \mu\text{g/mL}$ 时, $\cdot\text{O}_2^-$ 清除率为 $(76.88\pm 1.47)\%$ 。对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除效果优于甘蔗叶多酚<sup>[30]</sup>,原因可能是不同结构的多酚化合物对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除能力不同,通过不同方法提取的多酚对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除效果也存在差异。

### 3 结论

本试验以青稞酒糟为原料,通过单因素试验结合正交试验优化青稞酒糟多酚超声波辅助提取工艺,最优提取工艺为超声功率400 W、超声温度 $45\ ^\circ\text{C}$ 、超声时间50 min和料液比1:20(g/mL),在该条件下青稞酒糟多酚的得率为 $(3.3371\pm 0.1498)\ \text{mg/g}$ 。进一步检测不同浓度青稞酒糟多酚对DPPH $\cdot$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除效果,清除效果随浓度增大而提高,当青稞酒糟多酚浓度为 $21\ \mu\text{g/mL}$ 时,对DPPH $\cdot$ 的清除率为 $(83.76\pm 1.35)\%$ ,对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率为 $(52.05\pm 2.09)\%$ ,对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除率为 $(76.88\pm 1.47)\%$ 。

综上所述,本试验初步探索了青稞酒糟多酚的提取方法及其工艺优化,但青稞酒糟多酚的作用机理和功效仍需进一步研究与探索,对其应用潜力进行充分

地挖掘,将为青稞酒糟多酚应用提供新方向,对新产品的研发产生深远影响,推动实现青稞酒糟的高值化利用。

### 参考文献:

- [1] OBADI M, SUN J, XU B. Highland barley: Chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications[J]. Food Research International, 2021, 140: 110065.
- [2] 杨瑞,党斌,张杰,等. 青海青稞、燕麦、藜麦营养品质及抗氧化活性比较研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(5): 63-69.  
YANG Rui, DANG Bin, ZHANG Jie, et al. A comparative study on nutritional quality and antioxidant activity of barley, oats, and quinoa in Qinghai[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(5): 63-69.
- [3] 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 Fuhong, FENG Shengbao, LI Shanwen, et al. Differences in trace components of highland barley of different varieties from different regions[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2019(11): 113-118.
- [4] FORSELL P, KONTKANEN H, SCHOLS H A, et al. Hydrolysis of brewers' spent grain by carbohydrate degrading enzymes[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2008, 114(4): 306-314.
- [5] CORTESE M, GIGLIOBIANCO M R, PEREGRINA D V, et al. Quantification of phenolic compounds in different types of Crafts beers, worts, starting and spent ingredients by liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2020, 1612: 460622.
- [6] 张芬军,解成玉,叶晖春,等. 青稞清香型白酒与部分典型清香型白酒的微量成份对比研究[J]. 酿酒, 2019, 46(5):61-67.  
ZHANG Fenjun, XIE Chengyu, YE Huichun, et al. A comparative study on trace ingredients of highland barley Baijiu and some representative light-flavor Baijiu[J]. Liquor Making, 2019, 46(5):61-67.
- [7] 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):2369-2376.  
LI Qian, PEI Zhaoxi, WANG Zhisheng, et al. Comparative study on nutrients compositions of different types of distillers' grains[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(6):2369-2376.
- [8] 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 Peng, ZHANG Tingting, WANG Yong, et al. Research progress on nutritional function and processing application of highland barley[J]. Food and Nutrition in China, 2020, 26(2): 46-51.
- [9] 李梦婷,许德富,敖宗华,等. 高酸调味酒酿造研究综述[J]. 中国酿造, 2020, 39(12): 20-23.  
LI Mengting, XU Defu, AO Zonghua, et al. Summary on high-acid favoring liquor brewing[J]. China Brewing, 2020, 39(12):20-23.
- [10] GIBREEL A, SANDERCOCK J R, LAN J G, et al. Evaluation of value-added components of dried distiller's grain with solubles from triticale and wheat[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(13): 6920-6927.
- [11] 李倩. 不同类型酒糟营养成分组成差异及瘤胃发酵特性的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.  
LI Qian. Study on nutrients composition and ruminal fermentation characteristics of different types distillers' grains[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2017.
- [12] MUSSATTO S I, DRAGONE G, ROBERTO I C. Brewers' spent grain:

- Generation, characteristics and potential applications[J]. Journal of Cereal Science, 2006, 43(1): 1-14.
- [13] YANG S Q, FAN W L, XU Y. Melanoidins from Chinese distilled spent grain: Content, preliminary structure, antioxidant, and ACE-inhibitory activities *in vitro*[J]. Foods, 2019, 8(10): 516.
- [14] LANDEKA JURČEVIĆ I, DORA M, GUBEROVIĆ I, et al. Wine lees polyphenols as a novel functional bioactive compound in the protection against oxidative stress and hyperlipidemia[J]. Food Technology and Biotechnology, 2017, 55(1): 109-116.
- [15] CARCIOCHI R, SOLOGUBIK C, FERNÁNDEZ M, et al. Extraction of antioxidant phenolic compounds from brewer's spent grain: Optimization and kinetics modeling[J]. Antioxidants, 2018, 7(4): 45.
- [16] 朱俊玲, 柳青山. 清香型酒糟多酚提取工艺的研究[J]. 食品工程, 2018(3): 33-38.  
ZHU Junling, LIU Qingshan. Research on the polyphenol extraction process of Fen-flavor vinasse[J]. Food Engineering, 2018(3): 33-38.
- [17] 安徽省食品行业协会. 植物提取物及其制品中总多酚含量的测定: T/AHFIA 005—2018[S]. 安徽: 安徽省食品行业协会, 2019.  
Anhui Food Industry Association. Determination of total polyphenol content in plant extracts and their products: T/AHFIA 005—2018[S]. Anhui: Anhui Food Industry Association, 2019.
- [18] ABEYNAYAKE R, ZHANG S T, YANG W Z, et al. Development of antioxidant peptides from brewers' spent grain proteins[J]. LWT—Food Science and Technology, 2022, 158: 113162.
- [19] 谷睿, 邹蓉, 唐健民, 等. 普通油茶总黄酮提取工艺优化及抗氧化活性比较[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(4): 163-169.  
GU Rui, ZOU Rong, TANG Jianmin, et al. Optimization of extraction process of total flavonoids from *Camellia oleifera* and comparison of antioxidant activity[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(4): 163-169.
- [20] KISS A K, NARUSZEWICZ M. Polyphenolic compounds characterization and reactive nitrogen species scavenging capacity of *Oenothera paradoxa* defatted seed extracts[J]. Food Chemistry, 2012, 131(2): 485-492.
- [21] 夏陈, 向卓亚, 朱永清, 等. 不同品种青稞中总多酚、总黄酮含量及抗氧化性比较[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 162-165.  
XIA Chen, XIANG Zhuoya, ZHU Yongqing, et al. Comparative analysis of total flavonoids, total polyphenols and antioxidant properties in different varieties of Hulless barley[J]. Food & Machinery, 2020, 36(6): 162-165.
- [22] 王富盈. 发酵对燕麦和青稞的成分及功能性质的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.  
WANG Fuying. Effect of fermentation on the composition and functional properties of oats and highland barley[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [23] 冉宇舟, 何喜红, 毛严根, 等. 黄酒酒糟的抗氧化活性分析[J]. 酿酒科技, 2014(4): 38-41.  
RAN Yuzhou, HE Xihong, MAO Yangen, et al. Analysis of the antioxidant activities of yellow rice wine lees[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2014(4): 38-41.
- [24] 许世浩, 刘宏炳, 何晨露, 等. 酒糟总氨基酸、总多酚、多糖含量测定及抗氧化活性研究[J]. 化学试剂, 2022, 44(1): 32-38.  
XU Shihao, LIU Hongbing, HE Chenlu, et al. Determination of total amino acids, total polyphenols, polysaccharide content and antioxidant activity of distiller's grains[J]. Chemical Reagents, 2022, 44(1): 32-38.
- [25] 谢雨寻, 叶有明, 李龙越, 等. 茶酒糟中茶多酚提取工艺优化及其抗氧化活性的研究[J]. 中国酿造, 2022, 41(2): 204-209.  
XIE Yuxun, YE Youming, LI Longyue, et al. Optimization of extraction process and antioxidant activity of tea polyphenols from tea distiller's grains[J]. China Brewing, 2022, 41(2): 204-209.
- [26] ZAGO E, TILLIER C, DE LEENER G, et al. Sustainable production of low molecular weight phenolic compounds from Belgian Brewers' spent grain[J]. Bioresource Technology Reports, 2022, 17: 100964.
- [27] 井璐珍. 不同色泽青稞及发芽青稞中酚类物质的定性定量分析及抗氧化活性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.  
JING Luzhen. Qualitative and quantitative analysis of phenolic compounds in different colors of highland barley and germinated highland barley and their antioxidant activity[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [28] PATRIGNANI M, BRANTSSEN J F, AWIKA J M, et al. Application of a novel microwave energy treatment on brewers' spent grain (BSG): Effect on its functionality and chemical characteristics[J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128935.
- [29] VO Q V, HOA N T, THONG N M, et al. The hydroperoxyl and superoxide anion radical scavenging activity of anthocyanidins in physiological environments: Theoretical insights into mechanisms and kinetics[J]. Phytochemistry, 2021, 192: 112968.
- [30] 阎欲晓, 吴国燕, 杨龙, 等. 甘蔗叶多酚物质的超声提取及生理活性研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(4): 63-66.  
YAN Yuxiao, WU Guoyan, YANG Long, et al. Ultrasonic-assisted extraction and physiological activities of polyphenols from sugar cane leaves[J]. Food Research and Development, 2012, 33(4): 63-66.