

申光辉, 李志洪, 赵清锋, 等. 以紫色马铃薯酶解汁液为辅料的浓色啤酒发酵工艺优化及抗氧化活性 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(2): 124-132.  
SHEN Guanghui, LI Zhihong, ZHAO Qingfeng, et al. Fermentation optimization and antioxidant activities of dark beer prepared with the addition of purple potato enzymolysis juice by freeze-thaw process[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(2): 124-132.

# 以紫色马铃薯酶解汁液为辅料的浓色啤酒 发酵工艺优化及抗氧化活性

申光辉, 李志洪, 赵清锋, 曾雨虹, 赵欣悦, 邹 涵, 刘玫婷, 张志清, 陈安均  
(四川农业大学 食品学院, 四川 雅安 625014)

**摘要:**【目的】冻融分离产生的汁液是固液分离法制备紫色马铃薯全粉的副产物, 富含碳水化合物和花青素。为提高该汁液的利用价值, 将酶解后的汁液作为辅料添加至麦芽汁中发酵制备浓色啤酒。【方法】采用单因素结合正交试验优化浓色啤酒的发酵条件, 分析其主要抗氧化成分含量及抗氧化能力。【结果】添加紫色马铃薯酶解汁液制备浓色啤酒的最佳发酵条件为: 马铃薯酶解汁液添加体积分数为 25%, 初始 pH 6.5, 接种 2%( $\varphi$ ) 的 M21 啤酒酵母, 15 ℃ 条件下发酵 10 d。所得啤酒呈琥珀色、晶莹剔透, 酒香协调、入口柔顺, 感官评分为 86.9, 酒精度 [ $\varphi$ (乙醇)]5.84%, 总酸体积分数 15.6 mL/L, 还原糖质量浓度 18.69 mg/mL, 色度 37.71 EBC, 总酚、绿原酸和花青素质量浓度分别为 360.2、685.7 和 208.4 mg/L, 每 100 mL 啤酒中含啤酒 10 倍稀释液的总还原能力与 0.150 mg/mL 维生素 C 相当, DPPH 自由基清除率为 49.9%, 与质量浓度为 0.043 mg/mL 维生素 C 相当, ABTS 自由基清除率 83.9%。【结论】紫色马铃薯冻融分离酶解汁液可部分替代麦芽汁发酵高抗氧化活性的浓色啤酒。

**关键词:** 紫色马铃薯; 冻融分离; 浓色啤酒; 发酵工艺; 抗氧化活性  
**中图分类号:** TS209      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-411X(2021)02-0124-09

## Fermentation optimization and antioxidant activities of dark beer prepared with the addition of purple potato enzymolysis juice by freeze-thaw process

SHEN Guanghui, LI Zhihong, ZHAO Qingfeng, ZENG Yuhong, ZHAO Xinyue,  
ZOU Han, LIU Meiting, ZHANG Zhiqing, CHEN Anjun  
(College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya' an 625014, China)

**Abstract:** 【Objective】Potato juice of freeze-thaw process is the liquid by-product derived from the production of purple potato flour by solid-liquid separation method, and it is rich in carbohydrates and anthocyanins. In order to increase the utilization value of the liquid by-product, the enzymolysis juice was added as supplementary ingredient into wort to prepare dark beer by fermentation. 【Method】Single factor test combining orthogonal experiment was performed to optimize the fermentation conditions. The contents and activities of antioxidant components in the dark beer were evaluated. 【Result】The optimum fermentation conditions for dark beer preparation with addition of purple potato enzymolysis liquid were as follows: Content

of potato enzymolysis liquid was 25% ( $\varphi$ ), initial pH was 6.5, inoculation of 2% ( $\varphi$ ) M21 beer starter, and fermentation for 10 d under the temperature of 15 °C. The prepared beer was amber color and crystal clear, had harmonious flavor and mellow taste. Its sensory score was 86.9, alcohol content was 5.84%, total acid content was 15.6 mL/L beer, total reducing sugar content was 18.69 mg/mL, chroma was 37.71 EBC, total phenol content was 360.2 mg/L, chlorogenic acid content was 685.7 mg/L, and anthocyanin content was 208.4 mg/L. The total reduction capacity of 10-fold diluent beer was equivalent to that of 0.150 mg/mL vitamin C, the scavenging rate of DPPH radical was 49.9%, which was equivalent to that of 0.043 mg/mL vitamin C, and the scavenging rate of ABTS<sup>+</sup> was 83.9%. **【Conclusion】** Addition of purple potato juice of freeze-thaw process can partially replace wort for brewing of dark beer with high antioxidant activities.

**Key words:** purple potato; freeze-thaw separation; dark beer; fermentation condition; antioxidant activity

紫色马铃薯原产于南美洲, 其果皮和果肉呈现紫色至黑色, 较普通马铃薯含有更高的花青素等抗氧化成分, 具有抗氧化、抗衰老、降脂等重要保健功能<sup>[1]</sup>。随着我国马铃薯主食加工技术的开发和成熟, 作为主食加工的主要原料, 马铃薯全粉的市场需求趋旺。冻融固液分离法是制备马铃薯全粉的一种方法, 主要通过冻融离心分离去除薯泥中大部分的水分, 缩短薯泥干燥环节消耗的时间, 具有能耗低、全粉细胞破损率低等优势<sup>[2-3]</sup>。但该工艺离心环节会产生 30%~35% 的汁液副产物, 其含有丰富的碳水化合物、游离氨基酸等营养成分及 Patatin 糖蛋白、多酚和花色苷等活性成分<sup>[4-9]</sup>, 具有较强的再加工利用潜力。然而目前因缺乏成熟的转化利用技术, 该工艺产生的马铃薯汁液只能直接或经处理后排放, 不仅导致了资源的严重浪费, 也产生了严重的环境污染问题。因此有必要对该工艺的冻融分离汁液副产物进行再转化利用, 解决汁液排放带来的环保问题, 提高资源利用率, 延伸马铃薯产业链, 增加附加值。

作为世界第一大啤酒生产和消费国, 中国国产啤酒产品结构单一、口味淡薄、同质化严重, 随着消费的逐步转型和升级, 其已无法满足多元化、个性化和高端化的消费需求<sup>[10]</sup>。近几年来, 个性风格突出、具有保健功能的啤酒新产品逐渐成为市场的新宠, 已有利用蓝莓汁<sup>[11]</sup>、红枣<sup>[12]</sup>、香蕉<sup>[13]</sup>、樱桃<sup>[14]</sup>、可可浆<sup>[15]</sup>等作为辅料, 添加入麦芽汁中发酵不同类型保健啤酒的研究报道。薯类含有丰富的淀粉, 已被不少研究者作为添加辅料用于发酵薯酒饮料<sup>[16-17]</sup>。Panda 等<sup>[18]</sup>将紫甘薯泥作为辅料发酵富含花青素的啤酒, 结果表明添加 30%(w)的紫甘薯所酿造的啤酒风味最好, 且具有较强的 DPPH 清除活性。本试验将紫色马铃薯全粉加工过程中产生的冻融分离汁液用酶解糖化处理后, 添加到麦芽汁中发酵浓色啤酒。对酶解汁液添加量、pH、温度等发酵条件进行优化,

并分析所酿造啤酒的主要抗氧化成分及含量, 评价其体外抗氧化活性, 以期利用紫色马铃薯汁液发酵富含花青素的浓色啤酒提供技术参考, 促进马铃薯冻融分离汁液的资源化利用。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

紫色马铃薯“黑金刚”, 产自甘肃陇西; 大麦芽(浓香琥珀麦芽、焦香麦芽、欧麦淡色艾尔麦芽)、啤酒花颗粒(布兰科), 均购自超级麦芽(北京)贸易有限公司; 啤酒酵母(M20、M21、M36、M44、M47)、Mangrove Jack’s 公司生产, 购自超级麦芽(北京)贸易有限公司;  $\alpha$ -淀粉酶(5 万 U/g)、糖化酶(5 万 U/g), 购自北京索莱宝科技有限公司; 麦芽糖浆购自蕲春县天利生物工程有限公司。

3,5-二硝基水杨酸(分析纯)购自成都市科隆化学品有限公司; Folin-Ciocalteu 试剂购自北京索莱宝科技有限公司; 没食子酸标准品、绿原酸标准品、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS)购自南京都莱生物技术有限公司。

CPA225D 型电子天平, 德国赛多利斯股份有限公司; YXQ-LS-50SII 高压蒸汽灭菌锅, 上海博讯实业有限公司; SS300-N 食品工业用离心机, 张家港市永泰阳光机械制造有限公司; ST16R 冷冻离心机, 美国 Thermo 公司; PHS-4C+型酸度计, 成都世纪方舟科技有限公司; UV-3100PC 型紫外分光光度仪计, 上海美谱达仪器有限公司; LB-20T 型折光仪, 深圳市汇科计量检测技术有限公司; HZQ-X100A 型恒温振荡培养箱, 上海一恒科学仪器有限公司; DK-8D 型电热恒温水槽, 上海齐欣科学仪器有限公司; SHP-160 型智能生化培养箱, 上海三发科学仪器有限公司。

### 1.2 方法

1.2.1 啤酒发酵工艺流程 清洗马铃薯、切片、蒸

汽熟化、冷冻、解冻、离心等步骤制备马铃薯全粉，收集离心产生的汁液。采用双酶水解法酶解糖化马铃薯汁液，每 100 mL 汁液添加 0.8 g  $\alpha$ -淀粉酶和 1.0 g 糖化酶，糖化温度为 70 ℃，糖化时间为 1 h，pH 5.0，糖化结束后煮沸 5 min 灭活并过滤。经测定，酶解汁液还原糖为 19.57 mg/mL， $\alpha$ -氨基氮为 360.6  $\mu$ g/mL，花青素为 1.38 mg/mL，总酚为 296.5  $\mu$ g/mL。

取破碎麦芽，将焦香麦芽、浓香琥珀麦芽、欧麦淡色艾尔麦芽按照质量比 1:2:3 混合，添加 4 倍质量的水，调 pH 至 5.5。糖化程序：45 ℃ 30 min；60 ℃ 60 min；72 ℃ 10 min；78 ℃ 10 min；迅速降温至 45 ℃，趁热滤布过滤，并添加浓缩麦芽糖浆调整麦芽汁浓度至 16°P。经测定，还原糖为 103.5 mg/mL， $\alpha$ -氨基氮为 121.2  $\mu$ g/mL，总酚为 409.0  $\mu$ g/mL。

向酶解糖化麦芽汁中添加一定体积的糖化马铃薯汁液，并混合均匀。将混合汁液煮沸 15 min 后，按 0.12 g/L 添加啤酒花，继续煮沸 30 min，再按 0.28 g/L 添加啤酒花。

酵母种子液的制备：取活化的斜面菌种接种于 10 mL 12°P 麦芽汁中，28 ℃ 培养 36 h，再转接种于 10 mL 12°P 麦芽汁中，20 ℃ 培养 36 h，再转接种于 200 mL 12°P 麦芽汁中，15 ℃ 培养 24~36 h，得到种子液，其酵母细胞数量为  $1\times10^7$  mL<sup>-1</sup>。

采用下面酵母发酵法进行主发酵，接种啤酒酵母种子液，恒温发酵至 24 h 质量损失不超过 0.2 g，即为发酵终点。主发酵结束后缓慢降温至 0 ℃，经过 7 d 的后熟及饱和 CO<sub>2</sub> 处理。采用 4000 r/min 离心 15 min，过滤分离即得啤酒。啤酒发酵工艺流程图见图 1。

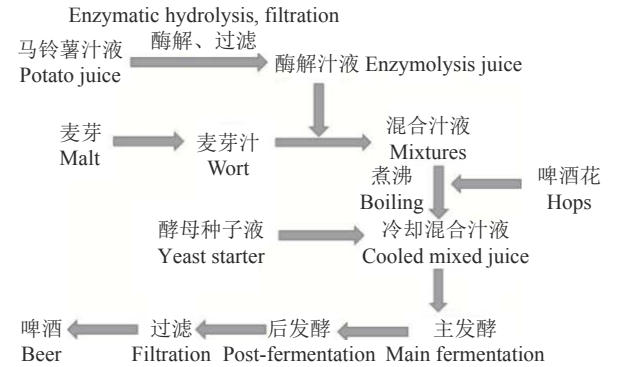


图 1 啤酒发酵工艺流程图

Fig. 1 Schematic flow diagram for beer fermentation operation

1.2.2 啤酒发酵单因素试验 主要考察马铃薯酶解汁液添加体积分数 (0、25%、33%、50%、67%、75%)、初始 pH (5.0、5.5、6.0、6.5、7.0)、酵母接种体积分数 (2%、4%、6%、8%、10%)、发酵温度 (10、12、15、18、22 ℃) 和酵母种类 (M20、M21、M36、M44、M47) 对啤酒发酵过程主要指标的影响，各因素试验固定水平分别为：马铃薯酶解汁液添加体积分数 50%，初始 pH 6.0，酵母接种体积分数 6.0%，发酵温度 15 ℃，酵母种类 M21。取 150 mL 混合汁置于 250 mL 三角瓶，接种啤酒酵母进行发酵。采用模糊数学评定法对后发酵结束的样品进行感官评价，测定发酵液的发酵度、酒精度、还原糖含量、总酸、pH、色泽等理化指标。

1.2.3 啤酒发酵条件正交试验优化 根据单因素试验结果，选取对啤酒指标影响最大的 3 个因素：马铃薯酶解汁液添加体积分数、pH 和温度，以啤酒感官评分及酒精度为指标，采用 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 正交试验进行发酵工艺优化，因素及水平见表 1。

表1 啤酒发酵条件正交试验因素水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment for beer fermentation conditions

| 水平 Level | 因素 Factor                                       |       |                 |
|----------|-------------------------------------------------|-------|-----------------|
|          | 紫色马铃薯酶解汁液添加体积分数/%                               |       |                 |
|          | Addition of purple potato enzymolysis juice (A) | pH(B) | $\theta$ /℃ (C) |
| 1        | 75                                              | 5.0   | 12              |
| 2        | 50                                              | 5.5   | 15              |
| 3        | 25                                              | 6.5   | 18              |

1.2.4 啤酒感官评定 由 10 名食品感官评定专业人员组成评定小组，对啤酒的色泽、泡沫、香气、杀口和口味进行感官评定，并设 4 个等级：优、良、中和差。评价为优的啤酒色泽暗红、酒体澄清透明；泡沫丰富、细腻，挂杯持久性好；麻舌感强烈，有明显的舒适、新鲜、刺激感；口味纯正、爽口、醇厚；有明

显的酒花芳香，无异香。评价为良的啤酒色泽暗红、较透明；泡沫较丰富细腻，挂杯持久性较好；舒适、新鲜、刺激的感觉较为明显；口味纯正、较爽口、较醇厚；有较明显的酒花芳香。评价为中的啤酒色泽较浅、微浑浊；泡沫少，挂杯持久性差；较新鲜，刺激感较差；口味单薄，不爽口；无明显的酒花芳香。评

价为差的啤酒色泽浅、明显浑浊状;无舒适、新鲜、刺激感;口味很单薄,不爽口;有其他异味。以色泽、泡沫、杀口、口味、香气为因素集,以好、较好、一般、差为评语集,根据感官评定结果,建立 4 个单因素评价矩阵,用模糊数学评定方法对其进行分析。因素集  $U=\{\text{色泽, 泡沫, 香气, 杀口, 口味}\}$ ;评语集  $V=\{\text{好, 较好, 一般, 差}\}$ ;其中,好(100 分),较好(80 分),一般(70 分),差(60 分)。权重集  $X=\{0.15, 0.20, 0.20, 0.30, 0.15\}$ ,色泽 15 分,泡沫 20 分,杀口 20 分,口味 30 分,香气 15 分,共 100 分。模糊关系综合评定集  $Y=XR$ ,其中  $X$  为权重集, $R$  为模糊矩阵。

1.2.5 啤酒理化指标测定 还原糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定<sup>[19]</sup>;发酵度、酒精度、色度、总酸含量均采用 GB/T 4928—2008《啤酒分析方法》<sup>[20]</sup>测定;pH 采用酸度计测定。

1.2.6 啤酒抗氧化成分及体外活性测定 总多酚含量测定采用 Folin-Ciocalteu 法<sup>[21]</sup>;绿原酸含量测定采用比色法<sup>[22]</sup>;花青素含量测定采用 pH 示差法<sup>[23]</sup>;总抗氧化能力测定采用 ABTS 法<sup>[22]</sup>;DPPH 自由基清除率测定采用比色法<sup>[24]</sup>,总还原力测定采用铁离

子还原法 (FRAP)<sup>[25]</sup>。

1.3 数据处理

运用 Office Excel 2010 对数据进行处理及方差分析,差异显著性分析用 Duncan’s 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 发酵单因素试验结果

2.1.1 酶解汁液添加体积分数 由表 2 可知,与纯麦芽汁啤酒 (CK) 相比,添加不同体积分数的紫色马铃薯酶解汁液均降低了发酵啤酒的酒精度、提高了发酵啤酒的 pH,但随着酶解汁液添加体积分数的增加,啤酒酒精度、色度、发酵度和 pH 均呈降低趋势,而还原糖含量、总酸含量呈逐渐增加趋势。表明啤酒酵母对紫色马铃薯酶解汁液的利用转化能力弱于麦芽汁,这与马铃薯酶解汁液中  $\alpha$ -氨基氮含量较高,而还原糖含量较低有关<sup>[26]</sup>。紫色马铃薯酶解汁液添加体积分数为 25%~50% 较为适宜,综合感官评分均在 80 以上,其中酶解汁液添加体积分数为 25% 时发酵的啤酒感官综合评分为 88.0,且酒精度、发酵度较高,分别为 4.28% 和 56.47%。

表2 紫色马铃薯酶解汁液添加体积分数对浓色啤酒感官评分及理化指标的影响<sup>1)</sup>

Table 2 Effects of potato enzymolysis juice addition on sensory score and physicochemical properties of dark beer

| $\varphi$ (紫色马铃薯酶解汁液)/%<br>Addition of purple potato enzymolysis juice | 感官评分<br>Sensory score | 酒精度( $\varphi$ )/%<br>Alcohol content | $\rho$ (还原糖)/(mg·mL <sup>-1</sup> )<br>Reducing sugar content | 色度/EBC<br>Chroma | $\varphi$ (总酸)/(mL·L <sup>-1</sup> )<br>Total acids | pH   | 发酵度/%<br>Fermentative degree | 发酵力/(g·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )<br>Fermentation capacity |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 0(CK)                                                                  | 85.8                  | 4.48±0.03a                            | 32.53±4.89a                                                   | 34.83±0.25ab     | 12.8±0.3a                                           | 4.17 | 60.87                        | 6.85                                                               |
| 25                                                                     | 88.0                  | 4.28±0.02b                            | 9.96±0.02f                                                    | 34.35±0.26b      | 7.9±0.1c                                            | 4.81 | 56.47                        | 6.09                                                               |
| 33                                                                     | 84.8                  | 4.23±0.04b                            | 10.10±0.03e                                                   | 35.04±0.20a      | 8.1±0.1c                                            | 4.74 | 53.85                        | 5.41                                                               |
| 50                                                                     | 80.5                  | 4.11±0.05c                            | 11.16±0.03c                                                   | 30.84±0.15d      | 9.1±0.3b                                            | 4.54 | 52.43                        | 4.26                                                               |
| 67                                                                     | 76.6                  | 3.14±0.03d                            | 10.37±0.02d                                                   | 27.23±0.20e      | 9.3±0.4b                                            | 4.33 | 50.32                        | 3.21                                                               |
| 75                                                                     | 72.2                  | 3.08±0.05d                            | 12.59±0.03b                                                   | 20.19±0.20c      | 9.4±0.4b                                            | 4.25 | 48.89                        | 3.21                                                               |

1)同列数据后的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ , Duncan’s法)

1)Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ , Duncan’s test)

2.1.2 初始 pH 由表 3 可知,随着发酵初始 pH 的增加,啤酒样品酒精度、还原糖含量、色度、总酸和发酵度均呈下降趋势。相对较高的 pH 不利于乙醇发酵,不能利用酵母代谢产生更多的有机酸成分。较适宜的发酵初始 pH 范围为 5.0~6.5,其中 pH 为 6.0 时,综合感官评分最高,为 85.4;酒精度在 pH 为 6.5 时最高,为 4.66%,发酵度则在 pH 为 5.0 时最高,为 66.15%。

2.1.3 酵母菌株 由表 4 可知,不同酵母菌株对啤酒发酵的各项指标影响不同。M20 发酵的啤酒酒精

度相对较高;M36 发酵的啤酒还原糖含量最低,发酵度、色度最高;而各组样品的总酸含量则没有明显差别。这表明 M36 会更多地利用还原糖进行繁殖,乙醇转化能力较弱。酵母菌株选用 M21 或 M20 较适宜,综合感官评分较高。其中选用 M21 酵母时,发酵的啤酒综合评分为 86.3,且酒精度、发酵度较高,分别为 4.25% 和 53.08%。

2.1.4 酵母接种量 由表 5 可知,随着酵母接种量 ( $\varphi$ ) 的增加,啤酒样品酒精度和发酵度均呈下降趋势,而还原糖含量、色度呈上升趋势,总酸和 pH 则

表 3 不同初始 pH 对浓色啤酒感官评分及理化指标的影响<sup>1)</sup>

Table 3 Effects of initial pH on sensory score and physicochemical properties of dark beer

| 初始 pH<br>Initial pH | 感官评分<br>Sensory score | 酒精度( $\varphi$ )/%<br>Alcohol content | $\rho$ (还原糖)/<br>(mg·mL <sup>-1</sup> )<br>Reducing<br>sugar content | 色度/EBC<br>Chroma | $\varphi$ (总酸)/<br>(mL·L <sup>-1</sup> )<br>Total acids | pH   | 发酵度/%<br>Fermentative degree | 发酵力/<br>(g·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )<br>Fermentation capacity |
|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------|------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 5.0                 | 82.6                  | 4.49±0.04b                            | 18.92±0.15a                                                          | 39.50±0.20a      | 9.7±0.1a                                                | 4.67 | 66.15                        | 4.67                                                                   |
| 5.5                 | 83.2                  | 4.26±0.04d                            | 18.64±0.20a                                                          | 38.88±0.10ac     | 9.7±0.1a                                                | 4.69 | 63.08                        | 4.76                                                                   |
| 6.0                 | 85.4                  | 4.53±0.03c                            | 13.96±0.20b                                                          | 38.29±0.20bc     | 9.4±0.1b                                                | 4.68 | 64.62                        | 4.85                                                                   |
| 6.5                 | 82.3                  | 4.66±0.02a                            | 8.61±0.21c                                                           | 34.88±0.15e      | 8.2±0.1c                                                | 4.73 | 65.38                        | 5.18                                                                   |
| 7.0                 | 80.2                  | 4.63±0.05a                            | 5.75±0.31d                                                           | 36.52±0.20d      | 8.0±0.1d                                                | 4.66 | 61.52                        | 5.22                                                                   |

1)同列数据后的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ , Duncan’s法)

1)Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ , Duncan’s test)

表 4 不同酵母菌种对浓色啤酒感官评分及理化指标的影响<sup>1)</sup>

Table 4 Effects of yeast strains on sensory score and physicochemical properties of dark beer

| 酵母菌株<br>Yeast starter | 感官评分<br>Sensory score | 酒精度( $\varphi$ )/%<br>Alcohol content | $\rho$ (还原糖)/<br>(mg·mL <sup>-1</sup> )<br>Reducing<br>sugar content | 色度/EBC<br>Chroma | $\varphi$ (总酸)/<br>(mL·L <sup>-1</sup> )<br>Total acids | pH   | 发酵度/%<br>Fermentative degree | 发酵力/<br>(g·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )<br>Fermentation capacity |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------|------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| M20                   | 84.3                  | 4.49±0.00a                            | 15.18±0.05b                                                          | 36.06±0.06b      | 9.5±0.3a                                                | 4.56 | 51.54                        | 5.84                                                                   |
| M21                   | 86.3                  | 4.25±0.00b                            | 13.47±0.03c                                                          | 35.66±0.11c      | 9.5±0.2a                                                | 4.53 | 53.08                        | 5.54                                                                   |
| M36                   | 80.8                  | 4.26±0.00b                            | 8.70±0.02e                                                           | 37.21±0.35a      | 9.1±0.3a                                                | 4.61 | 60.38                        | 5.83                                                                   |
| M44                   | 84.1                  | 4.24±0.00b                            | 15.72±0.03a                                                          | 34.94±0.26d      | 10.5±2.1a                                               | 4.34 | 47.31                        | 4.66                                                                   |
| M47                   | 81.6                  | 4.17±0.00c                            | 12.92±0.04d                                                          | 33.17±0.10e      | 9.1±1.0a                                                | 4.62 | 53.08                        | 5.74                                                                   |

1)同列数据后的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ , Duncan’s法)

1)Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ , Duncan’s test)

表 5 不同酵母接种体积分数对浓色啤酒感官评分及理化指标的影响<sup>1)</sup>

Table 5 Effects of yeast inoculation doses on sensory score and physicochemical properties of dark beer

| $\varphi$ (酵母接种)/%<br>Yeast inoculation dosage | 感官评分<br>Sensory score | 酒精度( $\varphi$ )/%<br>Alcohol content | $\rho$ (还原糖)/<br>(mg·mL <sup>-1</sup> )<br>Reducing<br>sugar content | 色度/EBC<br>Chroma | $\varphi$ (总酸)/<br>(mL·L <sup>-1</sup> )<br>Total acids | pH   | 发酵度/%<br>Fermentative degree | 发酵力/<br>(g·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )<br>Fermentation capacity |
|------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------|------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 2                                              | 82.1                  | 5.84±0.00a                            | 9.39±0.04c                                                           | 33.24±0.15c      | 10.1±0.2a                                               | 4.57 | 61.54                        | 6.06                                                                   |
| 4                                              | 85.1                  | 5.09±0.00c                            | 9.25±0.03d                                                           | 32.18±0.10d      | 9.7±0.1a                                                | 4.64 | 61.15                        | 6.20                                                                   |
| 6                                              | 87.2                  | 5.01±0.00d                            | 9.41±0.04c                                                           | 33.01±0.20c      | 9.6±0.2a                                                | 4.64 | 60.38                        | 6.19                                                                   |
| 8                                              | 81.2                  | 4.83±0.00e                            | 11.01±0.12a                                                          | 34.02±0.15a      | 9.1±0.9a                                                | 4.61 | 60.38                        | 6.53                                                                   |
| 10                                             | 78.5                  | 5.33±0.00b                            | 10.14±0.03b                                                          | 33.60±0.15b      | 9.6±1.4a                                                | 4.51 | 59.62                        | 7.80                                                                   |

1)同列数据后的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ , Duncan’s法)

1)Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ , Duncan’s test)

无明显变化。结果表明啤酒酵母接种量越多，其用于繁殖的糖就越多，产生酒精的量就越少。初始酵母接种量( $\varphi$ )为2%~6%较为适宜，综合感官评分较高，其中酵母接种量( $\varphi$ )为6%时发酵的啤酒综合评分为87.2，且酒精度、发酵度较高，分别为5.01%和60.38%。

2.1.5 发酵温度 由表6可知，随着主发酵温度的升高，啤酒样品酒精度均呈先升后降趋势，而还原糖含量、色度呈下降趋势，且色度间差异显著，但pH、发酵度间无显著差异。在一定范围之内，酵

母的代谢活动随着温度的升高而加快, 酒精的产量也随之增加, 产品风味逐渐变得丰满。发酵温度过高, 酵母代谢活动受到抑制, 酒精产量反而下降, 甲醇和杂醇油等发酵副产物含量增多<sup>[27]</sup>, 导致原酒品质变差。主发酵温度为 12~18 ℃ 较为适宜, 综合感官评分较高, 其中 15 ℃ 发酵的啤酒综合评分为 86.3, 且酒精度、发酵度最高, 分别为 4.85% 和 60.77%。

表6 不同发酵温度对浓色啤酒感官评分及理化指标的影响<sup>1)</sup>

| Table 6 Effects of fermentation temperatures on sensory score and physicochemical properties of dark beer |                       |                                       |                                                                   |                  |                                                         |      |                              |                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------|------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 发酵温度/℃<br>Fermentation temperature                                                                        | 感官评分<br>Sensory score | 酒精度( $\varphi$ )/%<br>Alcohol content | $\rho$ (还原糖)/<br>(mg·mL <sup>-1</sup> )<br>Reducing sugar content | 色度/EBC<br>Chroma | $\varphi$ (总酸)/<br>(mL·L <sup>-1</sup> )<br>Total acids | pH   | 发酵度/%<br>Fermentative degree | 发酵力/<br>(g·L <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )<br>Fermentation capacity |
| 10                                                                                                        | 85.1                  | 4.62±0.00d                            | 11.65±0.02a                                                       | 39.80±0.20a      | 10.4±0.5a                                               | 4.71 | 55.38                        | 5.52                                                                   |
| 12                                                                                                        | 84.8                  | 4.59±0.00e                            | 8.83±0.04b                                                        | 38.42±0.15b      | 9.7±0.1ab                                               | 4.70 | 60.38                        | 5.67                                                                   |
| 15                                                                                                        | 86.3                  | 4.85±0.00a                            | 8.59±0.02c                                                        | 37.96±0.15b      | 9.1±0.2b                                                | 4.85 | 60.77                        | 8.87                                                                   |
| 18                                                                                                        | 84.1                  | 4.79±0.00b                            | 8.77±0.02b                                                        | 36.45±0.20c      | 9.3±1.0ab                                               | 4.46 | 60.77                        | 6.53                                                                   |
| 22                                                                                                        | 76.2                  | 4.65±0.00c                            | 8.59±0.03c                                                        | 34.97±0.20d      | 8.9±0.9b                                                | 4.71 | 60.38                        | 5.50                                                                   |

1)同列数据后的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ , Duncan's法)  
1)Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ , Duncan's test)

2.2 添加紫色马铃薯酶解汁液的啤酒发酵正交试验结果

根据单因素试验结果, 选取紫色马铃薯酶解汁液添加体积分数 ( $A$ )、发酵 pH ( $B$ )、发酵温度 ( $C$ ) 为因素, 采用  $L_9(3^4)$  正交试验进行糖化工艺优化, 结果见表 7。由表 7 可知, 试验因素对添加紫色马铃薯酶解汁液的啤酒感官评分的影响顺序为 pH( $B$ )>发酵温度 ( $C$ )>酶解汁液添加体积分数 ( $A$ ), 最优水平组合为  $A_3B_3C_2$ , 即紫色马铃薯酶解汁液添加量

( $\varphi$ )为 25%, 初始 pH 为 6.5, 15 ℃ 条件下发酵 10 d 的啤酒感官评分最高 (86.9), 且酒液呈琥珀色、晶莹剔透, 酒香协调、入口柔顺, 色度为 37.71 EBC, 还原糖为 18.69 mg/mL, 酒精度为 5.84%, pH 为 5.01, 残糖度为 9.53°Bx, 总酸为 15.6 mL/L, 符合国标 GB 4927—2008《啤酒》<sup>[28]</sup> 相关指标要求。

2.3 添加紫色马铃薯酶解汁液浓色啤酒的抗氧化成分含量

采用最优工艺条件制备的紫色马铃薯浓色啤

表 7 添加紫色马铃薯酶解汁液的浓色啤酒发酵正交试验结果

| Table 7 Results of orthogonal experiment for dark beer fermentation with addition of purple potato enzymolysis juice |        |        |        |             |                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-------------|-----------------------|
| 试验号<br>Experiment No.                                                                                                | $A$    | $B$    | $C$    | 误差<br>Error | 感官评分<br>Sensory score |
| 1                                                                                                                    | 1      | 1      | 1      | 1           | 73.2                  |
| 2                                                                                                                    | 1      | 2      | 2      | 2           | 78.8                  |
| 3                                                                                                                    | 1      | 3      | 3      | 3           | 79.6                  |
| 4                                                                                                                    | 2      | 1      | 2      | 3           | 78.7                  |
| 5                                                                                                                    | 2      | 2      | 3      | 1           | 68.8                  |
| 6                                                                                                                    | 2      | 3      | 1      | 2           | 83.7                  |
| 7                                                                                                                    | 3      | 1      | 3      | 2           | 75.0                  |
| 8                                                                                                                    | 3      | 2      | 1      | 3           | 81.5                  |
| 9                                                                                                                    | 3      | 3      | 2      | 1           | 86.9                  |
| $k_1$                                                                                                                | 72.150 | 70.603 | 74.450 | 71.250      |                       |
| $k_2$                                                                                                                | 72.050 | 71.333 | 76.433 | 74.137      |                       |
| $k_3$                                                                                                                | 76.103 | 78.367 | 69.420 | 74.917      |                       |
| 极差 Range                                                                                                             | 4.053  | 7.764  | 7.013  | 3.667       |                       |

酒, 与市售浓色啤酒中的主要抗氧化成分含量进行比较。由表 8 可知, 纯麦芽浓色啤酒及市售浓色啤酒未检出花青素成分。与纯麦芽浓色啤酒及市售浓色啤酒相比, 本研究制备的紫色马铃薯浓色啤酒总酚、绿原酸含量显著提高, 并含有丰富的来自于马铃薯酶解汁液的花青素成分, 总酚、绿原酸和花青素含量分别为 360.2、685.7 和 208.4 mg/L。其中总酚和绿原酸含量分别为市售产品含量的 2.90 和

1.14 倍。与未发酵混合汁液相比, 添加紫色马铃薯酶解汁液浓色啤酒的总酚含量显著提高, 可能与发酵过程中酚类物质的部分释放有关<sup>[29]</sup>; 绿原酸和花青素含量减少表明其在发酵过程中的稳定性较差, 但在最后的啤酒中其含量仍高于市售产品。因此, 添加紫色马铃薯酶解汁液可以赋予浓色啤酒更多的抗氧化物质。

表8 添加紫色马铃薯酶解汁液的浓色啤酒与市售浓色啤酒抗氧化成分含量比较<sup>1)</sup>  
Table 8 Contents of antioxidants in commercial dark beer and dark beer with addition of purple potato enzymolysis juice

| 样品<br>Sample                                                                   | $\rho$ /(mg·L <sup>-1</sup> ) |                      |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------|
|                                                                                | 总酚 Total phenol               | 绿原酸 Chlorogenic acid | 花青素 Anthocyanin |
| 添加紫色马铃薯酶解汁液的浓色啤酒<br>Dark beer with addition of purple potato enzymolysis juice | 360.2±3.9a                    | 685.7±11.6c          | 208.4±6.0b      |
| 未发酵混合汁液 Mixture juice before fermentation                                      | 352.7±1.8b                    | 1 104.9±7.9a         | 691.3±23.1a     |
| 纯麦芽浓色啤酒 Dark beer prepared with pure wort                                      | 186.0±1.5c                    | 1 020.0±41.9b        | 0               |
| 某市售浓色啤酒 A commercial dark beer                                                 | 124.2±2.8d                    | 602.1±24.4d          | 0               |

1)同列数据后的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ , Duncan's法)  
1)Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ , Duncan's test)

2.4 添加紫色马铃薯酶解汁液浓色啤酒的体外抗氧化能力

选择最优发酵条件制备的添加紫色马铃薯酶解汁液的浓色啤酒, 将其稀释 10 倍后进行体外抗氧化活性评价。由表 9 可知, 与纯麦芽浓色啤酒及市售浓色啤酒相比, 添加 25%( $\varphi$ )紫色马铃薯酶解汁液发酵制备的浓色啤酒具有更高的体外抗氧化

能力。样品 10 倍稀释液总还原力与 0.150 mg/mL 维生素 C 溶液相当, 分别为纯麦芽浓色啤酒和市售浓色啤酒的 1.80 和 2.80 倍; DPPH 自由基清除率为 49.9%, 与 0.043 mg/mL 维生素 C 溶液清除能力相当, 分别为纯麦芽浓色啤酒和市售浓色啤酒的 1.06 和 1.44 倍; ABTS 自由基清除率为 83.9%, 分别为纯麦芽浓色啤酒和市售浓色啤酒 1.13 和 1.20 倍。

表 9 添加紫色马铃薯酶解汁液的浓色啤酒与市售浓色啤酒体外抗氧化能力比较<sup>1)</sup>  
Table 9 Comparison of antioxidant capacities *in vitro* between commercial dark beer and dark beer with addition of purple potato enzymolysis juice

| 样品<br>Sample                                                                   | 总还原力                     |                                                               | DPPH自由基清除能力                      |                                                               | ABTS自由基清除率/%<br>ABTS radical scavenging rate |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                                                                | Total reduction capacity |                                                               | DPPH radical scavenging capacity |                                                               |                                              |
|                                                                                | 还原值<br>Reduction value   | $\rho$ (维生素C)/<br>(mg·mL <sup>-1</sup> )<br>Vitamin C content | 清除率/%<br>Scavenging rate         | $\rho$ (维生素C)/<br>(mg·mL <sup>-1</sup> )<br>Vitamin C content |                                              |
|                                                                                |                          |                                                               |                                  |                                                               |                                              |
| 添加紫色马铃薯酶解汁液的浓色啤酒<br>Dark beer with addition of purple potato enzymolysis juice | 0.9509±0.022 4a          | 0.150±0.016a                                                  | 49.9±0.6b                        | 0.043±0.003b                                                  | 83.9±2.3a                                    |
| 未发酵混合汁液<br>Mixture juice before fermentation                                   | 0.913 8±0.006 5b         | 0.143±0.019a                                                  | 55.3±0.8a                        | 0.048±0.004a                                                  | 37.0±3.3c                                    |
| 纯麦芽浓色啤酒<br>Dark beer prepared with pure wort                                   | 0.525 9±0.006 8c         | 0.074±0.019b                                                  | 46.8±0.5c                        | 0.040±0.003c                                                  | 74.0±3.4b                                    |
| 某市售浓色啤酒 A commercial dark beer                                                 | 0.346 0±0.001 8d         | 0.042±0.020c                                                  | 34.6±0.5d                        | 0.028±0.003d                                                  | 69.9±1.3b                                    |

1)同列数据后的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ , Duncan's法)  
1)Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ , Duncan's test)

综合各抗氧化指标,添加 25%( $\varphi$ )紫色马铃薯酶解汁液可赋予浓色啤酒更强的体外抗氧化活性。与未发酵混合汁液相比,紫色马铃薯浓色啤酒 DPPH 自由基清除率略有下降,可能与啤酒酵母细胞在发酵过程中吸附花青素等抗氧化成分有关<sup>[30]</sup>。

### 3 讨论与结论

紫色马铃薯冻融分离汁液作为马铃薯全粉冻融制备工艺的加工副产物,含有丰富的碳水化合物等营养物质成分及花青素、多酚等功能活性成分,具有较强的再加工转化及利用的潜力。目前对于该副产物的开发利用尚处于初步探索阶段,鲜见相关产品开发的研究报道。薯类含有大量淀粉,对酿制啤酒用大米等发酵辅料具有很强的替代潜力。张赟彬等<sup>[31]</sup>研究表明,添加马铃薯粉作为辅料可酿造高氨基酸营养深色啤酒,且各项指标均符合国家标准的要求。姚立华等<sup>[32]</sup>采用两次喂饭法,以新鲜马铃薯为辅料进行黄酒酿造的研究,结果表明,所酿造的黄酒符合国家黄酒标准,且游离氨基酸含量是普通黄酒的 1.2~2.5 倍。紫色马铃薯冻融分离汁液除了含有一定的可发酵糖类物质外,还有丰富的花青素和多酚。本研究将紫色马铃薯酶解汁液作为辅料加入麦芽汁中,探讨添加马铃薯酶解汁液发酵较强抗氧化活性浓色啤酒的可行性。结果表明,添加紫色马铃薯酶解汁液可作为辅料发酵具特色风味的浓色啤酒。但在试验中发现,啤酒酵母对马铃薯酶解汁液的转化利用能力弱于麦芽汁,添加过多的马铃薯酶解汁液会导致发酵度下降。这可能与紫色马铃薯酶解汁液中碳水化合物组成与麦芽汁差异有关,将其加入麦芽汁改变了可发酵糖及  $\alpha$ -氨基氮的含量及组成。因此,下一步将对紫色马铃薯酶解汁液碳水化合物、氨基酸种类及其含量进行分析,通过外源添加优化碳氮源以提高紫色马铃薯啤酒的发酵度。另一方面,还可通过筛选适合紫色马铃薯酶解汁液发酵的啤酒酵母菌种,进一步减少麦芽汁用量,提高发酵浓色啤酒的综合质量。

紫色马铃薯全粉分离酶解汁液制备浓色啤酒的最佳主发酵条件为:混合麦芽汁浓度 16°P,紫色马铃薯酶解汁液添加体积分数为 25%,初始 pH 6.5, M21 酵母接种量( $\varphi$ )为 2%, 15℃ 发酵 10 d,所得浓色啤酒色泽晶莹、色若琥珀,酒香协调、入口柔顺,酒精度为 5.83%,感官评分 86.9 分,还原糖为 18.69 mg/mL,色度为 37.71 EBC,总酸为 15.6 mL/L,均符合国标相关指标要求。酿造的紫色马铃薯浓色啤酒含有总酚、绿原酸和花青素等抗氧化成分,具有较强的体外抗氧化活性。

### 参考文献:

[1] 王兰, 邓放明, 赵玲艳, 等. 紫色马铃薯保健功效及其利用研究进展[J]. *中国酿造*, 2015, 34(7): 117-120.

[2] SHEN G, ZHANG L, HU T, et al. Preparation of potato flour by freeze-thaw pretreatment: Effect of different thawing methods on hot-air drying process and physico-chemical properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 133: 110157.

[3] 罗尚兵, 罗兴友. 节能环保型马铃薯全粉加工方法: CN106072183A[P]. 2016-11-09.

[4] 木泰华, 李鹏高. 马铃薯中生物活性成分及其功能[J]. *食品科学*, 2016, 37(19): 269-276.

[5] SUN Y, JIANG L Z, WEI D X. Partial characterization, in vitro antioxidant and antiproliferative activities of patatin purified from potato fruit juice[J]. *Food and Function*, 2013, 4(10): 1502-1511.

[6] MAKINEN S, KELLONIEMI J, PIHLANTO A, et al. Inhibition of angiotensin converting enzyme I caused by autolysis of potato proteins by enzymatic activities confined to different parts of the potato tuber[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(21): 9875-9883.

[7] KIM T H, PARK J S, AN S S, et al. Inhibition of thrombin activated fibrinolysis inhibitor decreases postoperative adhesion[J]. *Journal of Surgical Research*, 2015, 193(2): 560-566.

[8] LANGNER E, NUNES F M, POZAROWSKI P, et al. Antiproliferative activity of melanoidins isolated from heated potato fiber (potex) in glioma cell culture model[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(6): 2708-2716.

[9] ANDRE C M, OUFIR M, GUIGNARD C, et al. Antioxidant profiling of native Andean potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) reveals cultivars with high levels of beta-carotene, alpha-tocopherol, chlorogenic acid, and petanin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(26): 10839-10849.

[10] 杨婧娥, 王佐民, 于宏伟, 等. 精酿啤酒的发展前景[J]. *酿酒*, 2018, 45(4): 35-37.

[11] 刘金鹏, 秦艳霞, 俞志敏, 等. 响应面法优化蓝莓啤酒酿制工艺[J]. *大连工业大学学报*, 2016, 35(6): 36-39.

[12] 孙科. 保健型红枣啤酒发酵工艺研究[J]. *山东食品发酵*, 2014, 33(1): 105-108.

[13] CARVALHO G B M, SILVA D P, BENTO C V, et al. Banana as adjunct in beer production: Applicability and performance of fermentative parameters[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2009, 155(1/2/3): 53-62.

[14] BONCIU C, STOICESCU A. Obtaining and characterization of beers with cherries[J]. *Innovative Romanian Food Biotechnology*, 2008, 3: 23-27.

[15] NUNES C D S O, SILVA G P D, MACHADO B A S, et al. Cocoa pulp in beer production: Applicability and fermentative process performance[J]. *PLoS One*, 2017, 12(4): e0175677.

[16] RAY R C, PANDA S K, SWAIN M R, et al. Proximate composition and sensory evaluation of anthocyanin-rich purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) wine[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2012, 47(3): 452-458.

[17] PANDA S K, SWAIN M R, SINGH S, et al. Proximate compositions of a herbal purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) wine[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2013, 37(5): 596-604.

[18] PANDA S K, PANDA S H, SWAIN M R, et al. Anthocyanin-rich sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) beer: Technology, biochemical and sensory evaluation[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 3040-3049.

[19] 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): 1283-1288.

[20] 国家质量监督检验检疫总局. 啤酒分析方法: GB/T 4928—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[21] 牛广财, 闫公昕, 朱丹, 等. Folin-Ciocalteu 比色法测定沙棘酒中总多酚含量的工艺优化[J]. *食品与机械*, 2016, 32(4): 80-83.

[22] NIO-MEDINA G, ROMO-LONGORIA J D, RAMÍREZ-GONZÁLEZ I V, et al. Phenolic content and antioxidant capacity level in commercial Mexican lager beers[J]. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2017, 75(2): 156-158.

[23] 桑戈, 赵力, 谭婷婷, 等. pH 示差法测定紫薯酒中花青素的含量[J]. *酿酒科技*, 2015(6): 88-91.

[24] SINGH S, SINGH R P. In vitro methods of assay of anti-oxidants: An overview[J]. *Food Reviews International*, 2008, 24(4): 392-415.

[25] BENZIE I F, STRAIN J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: The FRAP assay[J]. *Analytical Biochemistry*, 1996, 239(1): 70-76.

[26] 蔡柳, 董文, 胡新喜, 等. 马铃薯块茎中单糖组分及含量的测定[J]. *食品科技*, 2018, 43(4): 327-331.

[27] 尹乐斌, 周娟, 李立才, 等. 石榴五味子保健酒发酵工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(3): 208-214.

[28] 国家质量监督检验检疫总局. 啤酒: GB/T 4927—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[29] CHEN Y, MA Y, DONG L, et al. Extrusion and fungal fermentation change the profile and antioxidant activity of free and bound phenolics in rice bran together with the phenolic bioaccessibility[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 115: 108461.

[30] ECHEVERRIGARAY S, SCARIOT F J, MENEGOTTO M, et al. Anthocyanin adsorption by *Saccharomyces cerevisiae* during wine fermentation is associated to the loss of yeast cell wall/membrane integrity[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2020, 314: 108383.

[31] 张赞彬, 何国庆. 添加马铃薯辅料酿制高氨基酸营养啤酒的研究[J]. *酿酒*, 2004, 31(1): 83-84.

[32] 姚立华, 何国庆, 陈启和. 以马铃薯为辅料的黄酒发酵条件优化[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12): 228-233.

【责任编辑 霍 欢】