

青稞精酿啤酒酿造工艺优化

陈祖乙^{1,2}, 安明哲³, 李 丽¹, 王祥余⁴, 宗绪岩^{1,2*}

(1.四川轻化工大学 生物工程学院, 四川 宜宾 643002; 2.酿酒生物技术及应用四川省重点实验室, 四川 宜宾 643002;
3.宜宾五粮液股份有限公司, 四川 宜宾 643002; 4.广东溢多利生物科技股份有限公司, 广东 珠海 519060)

摘要:以大麦芽、青稞为原料, 制备青稞精酿啤酒, 以感官评分为响应值, 通过单因素试验和响应面法对青稞精酿啤酒酿造工艺进行优化, 并对青稞精酿啤酒的基本指标和生物活性物质进行分析。结果表明, 青稞精酿啤酒的最佳酿造工艺条件为: 酒花添加量2 g/L, 初始麦汁浓度14 °P, 主发酵温度12 °C。在此优化条件下, 青稞精酿啤酒的感官评分为86.7分, 外观鲜亮金黄, 泡沫细腻, 香气丰富, 杀口力强。青稞精酿啤酒的酒精度为5.28%vol, β -葡聚糖、总黄酮和 γ -氨基丁酸含量分别为(124.26 \pm 9.74) mg/L、(138.65 \pm 2.07) mg/L和(81.79 \pm 6.37) mg/L。

关键词: 青稞; 精酿啤酒; 酿造工艺; 响应面优化; 生物活性物质

中图分类号: TS262.6

文章编号: 0254-5071 (2022) 04-0174-06

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2022.04.030

引文格式: 陈祖乙, 安明哲, 李丽, 等. 青稞精酿啤酒酿造工艺优化[J]. 中国酿造, 2022, 41 (4): 174-179.

Optimization for brewing process of highland barley craft beer

CHEN Zuyi^{1,2}, AN Mingzhe³, LI Li¹, WANG Xiangyu⁴, ZONG Xuyan^{1,2*}

(1.College of Bioengineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 643002, China;

2.Liquor Making Biotechnology & Application Key Lab of Sichuan Province, Yibin 643002, China;

3.Yibin Wuliangye Co., Ltd., Yibin 643002, China; 4.Guangdong VTR Bio-Tech Co., Ltd., Zhuhai 519060, China)

Abstract: Highland barley craft beer was prepared with barley malt and highland barley as raw materials, and taking sensory score as the response value, the brewing process of highland barley craft beer was optimized by single-factor test and response surface method, and the basic indexes and bioactive substances of highland barley craft beer were analyzed. The results showed that the optimal brewing process conditions for highland barley craft beer were as follows: hop addition 2 g/L, initial wort concentration 14 °P, and main fermentation temperature 12 °C. Under the optimized conditions, the sensory score of highland barley craft beer was 86.7, with bright golden appearance, fine foam, rich aroma and strong killing power. The alcohol content of the highland barley craft beer was 5.28%vol, and the contents of β -glucan, total flavonoids and γ -aminobutyric acid were (124.26 \pm 9.74) mg/L, (138.65 \pm 2.07) mg/L and (81.79 \pm 6.37) mg/L, respectively.

Key words: highland barley; craft beer; brewing process; response surface optimization; bioactive compounds

青稞 (*Hordeum vulgare* L.var.nudum Hook.f), 属禾本科小麦族大麦属一年生草本植物, 主要分布于我国青藏高原、川西高原等高海拔地区, 因其内外颖壳分离, 籽粒裸露也称为裸大麦^[1], 具有高蛋白、高膳食纤维、高维生素和低脂肪、低糖的组分特性, 并且富含 β -葡聚糖、酚类化合物和 γ -氨基丁酸等生物活性成分^[2], 具有抗氧化、降血糖、降血脂、抗衰老、抗癌、增强免疫力等功效^[3]。有研究指出我国种植的青稞 β -葡聚糖含量为3.66~8.62 g/100 g青稞, 普遍高于欧美等国家和地区培植的大麦中 β -葡聚糖含量^[4]; 青稞富含天然多酚类物质, 总酚含量为(132.15~912.51) mg/100 g干质量, 总黄酮含量为(32~58) mg/100 g干质量, 高于玉米、大米、小麦和燕麦等常见谷物^[5]; 高原藏青稞 γ -氨基丁酸的平均含量为19 mg/100 g, 高于其他地区的大麦和青稞品种^[6]。

人们求新求异、营养保健的需求促进了品种繁多的特

色精酿啤酒创新^[7], 如水果啤酒、浑浊啤酒、无醇啤酒和功能性啤酒等, 通过不同原料选择搭配赋予啤酒独特的口味和营养^[8]。其中特殊辅料啤酒是精酿啤酒中最受欢迎的品类之一, 因具有特色辅料的风味和丰富的营养特性而深受消费者喜爱。有研究表明在啤酒酿造中添加红薯^[9]、薏米^[10]、藜麦^[11]、黑米^[12]等辅料可以提高成品啤酒的生物活性物质含量并赋予啤酒独特口感。

由于青稞营养丰富, 富含生物活性成分, 将其添加到啤酒酿造中, 酿造出一款既具有特殊口感又可以保留青稞特殊营养价值的“特色辅料啤酒”, 不仅可以拓展青稞的应用范围, 也扩大了消费者对于啤酒品种的选择。周韶华等^[13]以大麦芽、小麦麦芽和青稞麦芽为原料, 通过上面发酵酵母No.303主发酵和下面发酵酵母No.308后发酵而成的青稞啤酒, 符合优质淡色啤酒国家标准且具有怡人的

收稿日期: 2021-09-15

修回日期: 2021-11-18

基金项目: 中国轻工业浓香型白酒固态发酵重点实验室开放基金项目(2018JJ012); 五粮液集团产学研合作项目(CXY2021ZR007)

作者简介: 陈祖乙(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为酿酒工程。

*通讯作者: 宗绪岩(1976-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为发酵过程控制与监测及食品生物化学。

特征香气;朱光炜等^[4]使用上面发酵酵母和大麦麦芽、青稞麦芽和大米,生产出杀口力强,泡沫洁白细腻,挂杯持久的青稞啤酒,通过添加硅胶、硅藻土、抗氧化剂初步解决了生产过程中出现的过滤困难等问题;薛文华等^[5]以青稞麦芽为主要原料制备青稞鲜啤,通过单因素和正交试验优化其酿造工艺,结果表明,适宜的发酵条件为:青稞发芽天数4 d,啤酒花添加量0.06%,麦芽汁浓度为10 °P,所制成的青稞鲜啤酒精度为3.2%vol,色度为5.0,酒体清澈透亮、泡沫细腻、香气明显;张荣霞等^[6]使用大麦麦芽、青稞麦芽和青稞红曲为原料制得青稞红曲啤酒,其 γ -氨基丁酸质量浓度为91.3 mg/L,高于市售啤酒中 γ -氨基丁酸质量浓度(40~65)mg/L。而关于响应面法优化青稞精酿啤酒酿造参数及其生物活性成分的分析,国内外研究相对较少。

本研究以大麦芽、青稞为原料,探讨了啤酒花添加量、初始麦汁浓度和主发酵温度对青稞精酿啤酒酒精度和感官评分的影响,在此基础上通过响应面法(response surface methodology, RSM)对青稞精酿啤酒酿造工艺进行优化,并对青稞精酿啤酒的基本指标和生物活性成分指标进行分析,为青稞精酿啤酒的产业化开发提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 原料与菌株

青稞(藏青8号):甘孜藏族自治州农业科学研究所;澳洲大麦芽(EBC3.3-5.0)、萨兹啤酒花:华东酿酒设备辅料有限公司;LALLEMAND钻石拉格酵母(*Saccharomyces pastorianus*):实验室保存。

1.1.2 试剂

高效液化酶(20 U/g):百斯杰生物技术有限公司; γ -氨基丁酸标准品(纯度>98%)、芦丁标准品(纯度>98%):酷尔化学科技有限公司; β -葡聚糖标准品(纯度>98%):南京都莱生技术有限公司;苯酚、硼酸、次氯酸钠、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、甲醇、乙醇、邻苯二胺、盐酸、刚果红、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

0~32%手持折光仪:邦西仪器科技(上海)有限公司;TUV-2600紫外可见分光光度计:日本岛津公司;AHC-600B智能人工气候箱:上海容威仪器有限公司;WGZ-200浊度仪:上海仪电物光有限公司;BHS-6数显恒温水浴锅:宁波市群安实验仪器有限公司;KQ-50B超声波清洗器:昆山市超声仪器有限公司;FA2204N电子天平:上海菁海仪器有限公司;TCS-60电子台秤:永康市华鹰衡器有限公司;304不锈钢对辊粉碎机:厦门新天工贸有限公司;10 L、20 L不锈钢锅:浙江邦丰实业有限公司;WS-38不锈钢电热开水器:广东伟纳斯不锈钢实业有限公司;30 L不锈钢小型锥形发酵罐、48 L精酿啤酒糖化一体机:合众精酿啤酒设备有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 青稞精酿啤酒的加工工艺流程及操作要点

青稞粉碎→糊化
↓
麦芽粉碎→糖化→麦汁过滤→麦汁煮沸→麦汁冷却→主发酵→后发酵→冷藏→青稞精酿啤酒成品

青稞糊化醪的制备:青稞磨碎成粉(占总原料30%)加入纯净自来水与20 U/g高效液化酶,料水比1:5(g:mL),分步糊化。第一步:于45 °C恒温保持10 min;第二步:于70 °C恒温保持40 min;第三步:于90 °C恒温保持10 min;然后煮沸10 min。

麦芽粉碎:称取一定量的大麦芽,将对辊粉碎机间隙调至0.2 mm进行研磨。研磨前需用大麦芽质量5%的水拌匀大麦芽,使粉碎的时候达到心碎皮不碎的效果,在糖化过程中不仅可以使麦芽中的营养物质充分析出到麦汁中,还能减少麦皮中有害物质溶解。保留较为完整的麦壳可以为麦汁过滤阶段提供天然的滤层。

糖化:参照管敦仪^[7]的双醪浸出糖化法:大麦芽粉碎(占总原料70%)与纯净自来水混合,料水比1.0:4.5(g:mL),分步糖化,升温过程中应保持搅拌(第一步酶浸出:于35 °C恒温保持15 min;第二步蛋白质休止:于50 °C恒温水解50 min;第三步糖化:与青稞糊化醪兑醪后于65 °C恒温保持60 min;第四步灭酶活:于78 °C恒温保持10 min,终止糖化)。

麦汁过滤:所得的麦汁搅拌均匀后静置20 min,使麦糟沉降形成糟层,进行三次回流的操作使过滤得到的麦汁比较清亮,露出糟层后使用78 °C的热水分两次进行洗糟,将麦汁糖度调节至设定的初始麦汁浓度值。且整个过滤与洗糟的过程麦汁流速度不能过快,避免破坏糟层影响过滤效果,直至过滤完成。

麦汁煮沸:将过滤得到的麦汁进行煮沸操作。根据麦汁体积计算需要的啤酒花总量(2.5 g/L),在麦汁微微沸腾时开始计时,同时立即加入占总量50%的萨兹啤酒花,在煮沸结束前10 min加上剩余50%的萨兹啤酒花。整个煮沸时间为60 min,控制10%左右的煮沸强度。

麦汁冷却:利用灭菌处理过的盘管换热器将麦汁冷却到20 °C左右后,用虹吸管迅速将清澈麦汁导入灭菌后的带泄压阀2 L玻璃三角瓶,并将三角瓶置于气候箱中使温度降至12 °C。

干酵母的活化:以1 g/L(酵母质量/麦汁体积)的比例称取干酵母,在100 mL的烧杯中加入5倍于干酵母质量的20 °C无菌水,然后添加干酵母至无菌水中,混匀后于20 °C气候箱静置20 min。

发酵:将活化好的酵母液添加到冷麦汁中,封罐进行主发酵(12 °C发酵14 d左右),当麦汁糖度降至5 °P时分离发酵液,添加质量浓度为2.2 g/L的蔗糖混匀装入450 mL棕色啤酒瓶定后发酵14 d,至酒体中无明显双乙酰气味时

(馒头), 发酵成熟, 后酵结束即得青稞精酿啤酒成品。

冷藏: 后发酵完成, 将啤酒储存温度降温到4℃冷藏3 d, 以保持啤酒非生物稳定性, 即得青稞精酿啤酒成品。

1.3.2 青稞精酿啤酒的酿造工艺优化

(1) 单因素试验

分别考察啤酒花添加量(0.5 g/L、1.5 g/L、2.5 g/L、3.5 g/L和4.5 g/L)、初始麦汁浓度(8 °P、10 °P、12 °P、14 °P和16 °P)、主发酵温度(8℃、10℃、12℃、14℃和16℃)对青稞精酿啤酒酒精度和感官评分的影响。

(2) 响应面试验

在单因素试验基础上, 选取啤酒花添加量(A)、初始麦汁浓度(B)、主发酵温度(C)为考察因子, 以感官评分(Y)为响应值, 利用响应面软件Design-Expert V8.0.6进行响应面优化试验设计, 响应面试验因素与水平见表1。

表1 青稞精酿啤酒的酿造工艺参数优化响应面试验因素与水平			
Table 1 Factors and levels of response surface tests for brewing process parameters optimization of highland barley craft beer			
水平	A 啤酒花添加量/(g·L ⁻¹)	B 初始麦汁浓度/°P	C 主发酵温度/℃
-1	1.5	12	10
0	2.0	14	12
1	2.5	16	14

1.3.3 青稞精酿啤酒分析检测

(1) 基本理化性质

样品预处理: 将样品在超声10 min(振荡频率调节至在30 kHz)除气并过滤, 4℃储存备用。

酒精度、原麦汁浓度、浸出物浓度、真正发酵度、泡持性、浊度、总酸含量、苦味值、色度、双乙酰的测定: 按照GB/T 4928—2008《啤酒分析方法》中的方法进行测定。

(2) 生物活性成分

青稞精酿啤酒β-葡聚糖的测定采用刚果红法^[18], γ-氨基丁酸的测定采用Berthelot比色法^[19], 总黄酮的测定采用芦丁比色法^[20]。

1.3.4 感官评价

邀请20位经培训的酿酒工程专业同学和老师, 分别对青稞精酿啤酒外观、泡沫、香气以及口感进行评分^[21], 总分100分, 具体评分标准见表2。

表2 青稞精酿啤酒感官评价标准		
Table 2 Sensory evaluation standards of highland barley craft beer		
项目	评分标准	评分/分
外观 (20分)	酒液清亮透明有光泽, 无悬浮物	16~20
	酒液略清亮透明有光泽, 无悬浮物	11~15
	酒液略浊颜色暗淡, 存在悬浮物	≤10
泡沫 (15分)	泡沫洁白细腻厚实, 挂壁持久	12~15
	泡沫较洁白细腻, 挂壁较持久	9~11
	泡沫松散不洁白, 挂壁时间较短或不起泡沫	≤8

续表		
项目	评分标准	评分/分
香气 (25分)	具有明显的酒花香、麦芽香气、水果香气, 各香协调	21~25
	酒花香气、麦芽香气、水果香气不明显	16~20
	存在异味(酸味、腐败味), 无独特香气	≤15
口感 (40分)	酒体爽口协调, 杀口力舒适、甜苦适中, 口感细腻, 略显愉悦, 有再饮欲	36~40
	酒体协调, 较爽口、有一定杀口力, 较苦或较甜	31~35
	酒体粗糙淡薄、略有杂味, 过苦或过甜	21~30
	杂味明显, 无杀口感, 口味杂乱	≤20

1.3.5 数据统计与分析

采用Origin 2019软件和Excel2019软件对试验数据进行整理作图和统计学分析, 采用Design-Expert 8.0.6进行响应面试验设计和分析, 所有试验均重复3次。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 啤酒花添加量的确定

啤酒花有助于啤酒呈现独特的感官特性^[22]。啤酒花添加量是影响啤酒口感风味的重要因素, 它不仅可以平衡麦芽的甜味、提供特殊的口感与香气, 还可以澄清麦芽汁和抑制革兰氏阳性菌生长, 使啤酒具有一定的保质期^[23]。啤酒花添加量对青稞精酿啤酒品质的影响见图1。

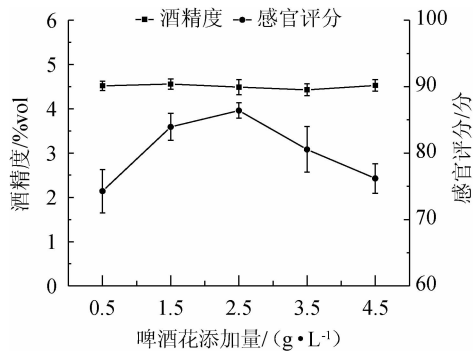


图1 啤酒花添加量对青稞精酿啤酒品质的影响
Fig. 1 Effect of hop addition on the quality of highland barley craft beer

由图1可知, 青稞精酿啤酒随啤酒花添加量在0.5~4.5 g/L范围内的增加, 酒精度变化趋势不明显。随着啤酒花添加量在0.5~2.5 g/L范围内的增加, 感官评分逐渐增加; 当啤酒花添加量为2.5 g/L时, 感官评分最高, 为86.4分; 继续增加啤酒花添加量时, 感官评分下降。当啤酒花添加量较低时, 体现不出青稞精酿啤酒的风味, 口感较甘甜、丰富感低、缺乏酒体; 啤酒花添加量较高时, 青稞精酿啤酒不爽口, 苦味值增大, 并且覆盖麦芽的香气, 使啤酒口感不佳。因此, 选择啤酒花添加量1.5 g/L、2.0 g/L、2.5 g/L进行响应面试验。

2.1.2 初始麦汁浓度的确定

初始麦汁浓度与酵母细胞活力及发酵性能有关, 其

几乎决定了酵母生长可以利用物质的多少和成品啤酒的各项理化指标^[24]。初始麦汁浓度对青稞精酿啤酒品质的影响见图2。由图2可知,随着初始麦汁浓度在8~16 °P范围内的增大,青稞精酿啤酒的酒精度呈逐渐增加的趋势。其原因可能是,随着初始麦汁浓度的增加,酵母的可发酵糖含量也增加,产生的乙醇含量也增加。随着初始麦汁浓度在8~14 °P范围内的增加,感官评分呈逐渐增加的趋势;当麦汁浓度为14 °P时,感官评分最高,为86分;当初始麦汁浓度继续增加,感官评分逐渐下降。其原因可能是初始麦汁浓度较低时,麦汁中酵母可利用的可发酵糖、氨基酸等营养物质含量较少,发酵力弱,导致酒体轻薄,产生的风味物质少,青稞精酿啤酒寡淡无味,感官品评分数较低;当初始麦汁浓度较高时,酵母的可发酵糖含量增加,产生的乙醇含量也增加,但由于麦汁的黏度和渗透压较大,影响了酵母的代谢过程,并且啤酒中剩余糖分过多导致啤酒的浑浊度变高,甜味掩盖了酒花带来的清苦口感,导致酒精味和麦香削弱了酒花香气^[25]。因此,选择初始麦汁浓度12 °P、14 °P和16 °P进行响应面试验。

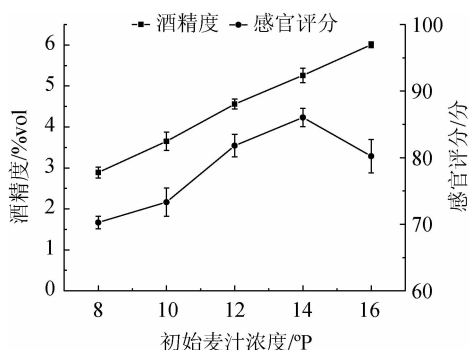


图2 初始麦汁浓度对青稞精酿啤酒品质的影响

Fig. 2 Effect of initial wort concentration on the quality of highland barley craft beer

2.1.3 主发酵温度的确定

发酵温度是影响啤酒口感和香气的重要因素,同时影响乙醇和啤酒产量^[26]。主发酵温度对青稞精酿啤酒品质的影响见图3。由图3可知,随着主发酵温度在8~12 °C范围内的升高,酒精度呈逐渐增加的趋势;当发酵温度为12 °C时,酒精度达到最高值,为5.29%vol;继续增加主发酵温度,青稞精酿啤酒的酒精度有所下降。其原因可能是,发酵温度的提高有利于提高啤酒酵母发酵能力,使得啤酒中乙醇含量增加;但温度过多会影响酵母的繁殖代谢速度,导致酵母衰老过快,缩短发酵周期,降低酵母的产酒能力^[27]。随着主发酵温度在8~12 °C的增加时,感官评分逐渐增加;当主发酵温度为12 °C时,感官评分最高,为83.9分;继续增加主发酵温度,感官评分下降。其原因可能是,在较低的温度环境下,酵母呼吸作用不强。在较高温度的环境下,酵母的增殖速度提高,呼吸作用增强,青稞精酿啤酒的感官品质

下降。因此,选择主发酵温度10 °C、12 °C和14 °C进行响应面试验。

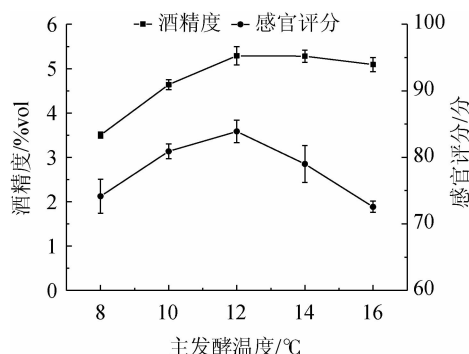


图3 主发酵温度对青稞精酿啤酒品质的影响

Fig. 3 Effect of main fermentation temperature on the quality of highland barley craft beer

2.2 青稞精酿啤酒酿造工艺优化响应面试验结果

2.2.1 响应面试验结果及方差分析

响应面试验设计及结果见表3,方差分析见表4。

表3 青稞精酿啤酒酿造工艺优化响应面试验设计及结果

Table 3 Design and results of response surface tests for brewing process optimization of highland barley craft beer

试验号	A 啤酒花添加量/ (g·L ⁻¹)	B 初始麦汁浓度/ °P	C 主发酵温度/ °C	感官评分/ 分
1	2.0	14.0	12.0	87.44
2	2.0	14.0	12.0	86.73
3	1.5	14.0	14.0	82.46
4	2.5	16.0	12.0	82.52
5	2.0	14.0	12.0	86.86
6	1.5	14.0	10.0	80.92
7	2.0	16.0	14.0	83.27
8	2.5	14.0	14.0	83.08
9	2.5	12.0	12.0	81.63
10	2.0	16.0	10.0	82.24
11	2.5	14.0	10.0	83.38
12	2.0	12.0	10.0	82.30
13	2.0	14.0	12.0	87.20
14	2.0	12.0	14.0	82.61
15	2.0	14.0	12.0	86.52
16	1.5	12.0	12.0	78.62
17	1.5	16.0	12.0	81.44

利用Design Expert8.0.6软件对表3的试验数据进行多元回归拟合,得到感官评分对啤酒花添加量(A)、初始麦汁浓度(B)、主发酵温度(C)的拟合方程:

$$Y=86.95+0.90A+0.54B+0.32C-0.48AB-0.46AC+0.18BC-3.02A^2-2.88B^2-1.47C^2。$$

表4 回归模型方差分析
Table 4 Variance analysis of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	102.49	9	11.39	42.36	<0.000 1	
A	6.43	1	6.43	23.9	0.001 8	**
B	2.32	1	2.32	8.64	0.021 7	*
C	0.83	1	0.83	3.1	0.121 9	
AB	0.93	1	0.93	3.46	0.105 0	
AC	0.85	1	0.85	3.15	0.119 3	
BC	0.13	1	0.13	0.48	0.509 9	
A ²	38.43	1	38.43	142.97	<0.000 1	**
B ²	34.83	1	34.83	129.57	<0.000 1	**
C ²	9.08	1	9.08	33.79	0.000 7	**
残差	1.88	7	0.27			
失拟项	1.34	3	0.45	3.28	0.140 7	
纯误差	0.54	4	0.14			
总和	104.34	16				

注：“**”表示对结果影响极显著 ($P<0.01$)；“*”表示对结果影响显著 ($P<0.05$)。

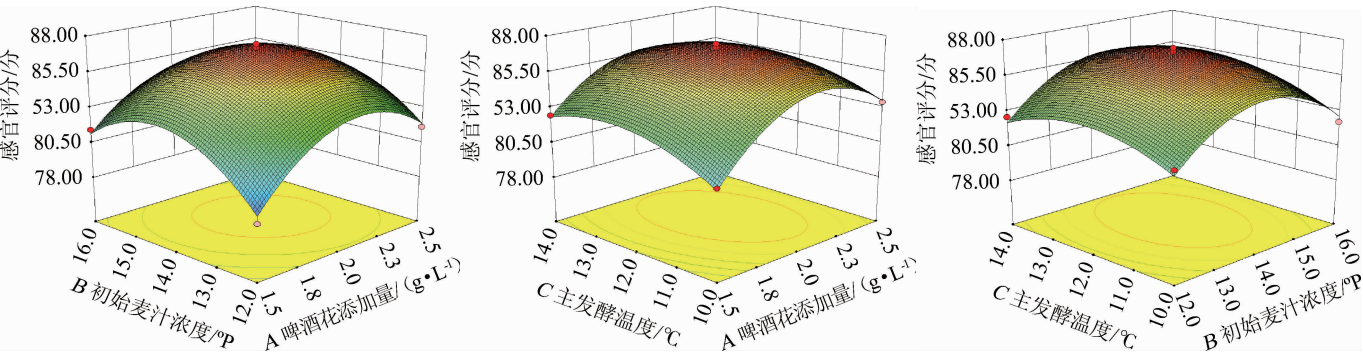


图4 各因素的交互作用对感官评分影响的响应曲面和等高线
Fig. 4 Response surface plots and contour lines of effects of interaction between various factors on sensory scores

2.2.3 验证试验

通过Design-Expert 8.0.6软件分析得到青稞精酿啤酒最佳酿造条件为：啤酒花添加量2.1 g/L、初始麦汁浓度14.2 °P、主发酵温度12.2 °C，在此条件下进行酿造，青稞精酿啤酒的感官评分预测值为87.5分。考虑到实际操作的可能性，将青稞精酿啤酒酿造工艺调整为：啤酒花添加量2 g/L、初始麦汁浓度14 °P、主发酵温度12 °C，采用20 L的发酵罐进行3次平行验证试验，得到的青稞精酿啤酒口味纯正、爽口、酒体协调，具有青稞麦香的特征，感官评分实际值为86.7分，实际值与预测值近似。说明青稞精酿啤酒酿造工艺条件具有实际可行性。

2.3 青稞精酿啤酒的品质分析

2.3.1 理化指标结果

在青稞精酿啤酒最佳酿造条件下酿造青稞精酿啤酒，对其基本指标进行检测，结果见表5。由表5可知，啤酒色度为16.58，属于GB/T 4927—2008《啤酒》中浓色啤酒的

由表4可知，所建立的感官评分回归模型极显著 ($P<0.000 1$)，失拟项不显著 ($P=0.140 7>0.05$)。回归模型的决定系数 $R^2=0.982 0$ ，调整决定系数 $R^2_{Adj}=0.958 8$ ，说明模型能够较好地反映响应值的变化，回归模型和预测值之间有较好拟合度试验结果具有一定可靠性。由 P 值可知，回归模型的一次项A及二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对感官评分的影响极显著 ($P<0.01$)；一次项B对结果影响显著 ($P<0.05$)；其他项对结果影响不显著 ($P>0.05$)。由 F 值可知，3个因素对感官评分的影响大小次序为啤酒花添加量>初始麦汁浓度>主发酵温度。

2.2.2 响应因子交互作用分析

各因素的交互作用对感官评分影响的响应面和等高线见图4。从图4可知，固定主发酵温度(C)，感官得分随着啤酒花添加量(A)与初始麦汁浓度(B)的增加呈先缓慢增加后下降的趋势，啤酒花添加量(A)与初始麦汁浓度(B)相互作用较明显。啤酒花添加量和初始麦汁浓度的交互作用(AB)大于啤酒花添加量和主发酵温度交互作用(AC)，初始麦汁浓度和主发酵温度的交互作用(BC)最小。

范围。其中青稞精酿啤酒的总酸、酒精度和泡持性指标均达到浓色啤酒优级标准，说明添加30%青稞作为辅料酿造青稞精酿啤酒的工艺是可行的。双乙酰是啤酒异味的主要来源，为主发酵过程中酵母代谢产物，在后发酵期会逐步被还原，使其浓度下降，此啤酒的双乙酰含量在国标允许的正常范围内。

表5 青稞精酿啤酒基本指标检测结果
Table 5 Detection results of basic indexes of highland barley craft beer

项目	结果	项目	结果
酒精度/%vol	5.28	浸出物浓度/°P	4.14
原麦汁浓度/°P	14.25	苦味值/BU	18.52
真正发酵度/%	72.49	色度/EBC	16.58
总酸含量/(mL•100 mL ⁻¹)	2.24	浊度/EBC	26.77
双乙酰含量/(mg•L ⁻¹)	0.121	泡持性/s	426

2.3.2 青稞精酿啤酒生物活性化合物分析

对实验室酿造的全大麦啤酒(100%大麦芽)、普通啤酒(70%大麦芽+30%大米)和青稞精酿啤酒(70%大麦芽+30%青稞)的 β -葡聚糖、 γ -氨基丁酸、总黄酮的含量进行对比,结果见表6。由表6可知,添加青稞酿造的青稞精酿啤酒中 β -葡聚糖、 γ -氨基丁酸和总黄酮含量较高。开发富含生物活性成分的青稞精酿啤酒既能够丰富啤酒市场,也能丰富特色谷物啤酒种类,是一种较好的摄入 β -葡聚糖、 γ -氨基丁酸和黄酮的饮品。

表6 青稞精酿啤酒的生物活性物质含量测定结果

Table 6 Determination results of bioactive substances contents of highland barley craft beer

啤酒样品	β -葡聚糖/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	γ -氨基丁酸/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总黄酮/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
全大麦啤酒	82.60 \pm 6.41b	65.22 \pm 5.41b	106.09 \pm 5.08b
普通啤酒	53.58 \pm 5.66c	45.40 \pm 7.43c	77.89 \pm 2.35c
青稞精酿啤酒	124.26 \pm 9.74a	81.79 \pm 6.37a	138.65 \pm 2.07a

注:同列肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

3 结论

本研究以感官评分为响应值,通过单因素试验和响应面试验优化得到青稞精酿啤酒的最优酿造工艺条件为:啤酒花添加量2 g/L,初始麦汁浓度14 °P,主发酵温度12 °C。在此优化工艺条件下,青稞精酿啤酒的感官评分为86.7分,酒精度为5.28%vol,颜色纯正、酒体丰满、香气典型, β -葡聚糖、 γ -氨基丁酸和总黄酮的含量较高,分别为(124.26 \pm 9.74) mg/L、(81.79 \pm 6.37) mg/L、(138.65 \pm 2.07) mg/L。本研究为青稞精酿啤酒的生产提供了理论和实践基础,对青稞的有效利用有重要的指导意义。青稞精酿啤酒的整体风味是多种物质或工艺条件共同作用的结果,本研究仅对青稞精酿的酿造工艺进行了优化,青稞精酿啤酒的抗氧化能力与风味物质还有待研究。

参考文献:

- [1] ZENG X Q, GUO Y, XU Q J, et al. Origin and evolution of qingke barley in Tibet[J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 5433.
- [2] 王梦倩. 青稞的营养价值和功效作用研究现状[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(23): 214-219.
- [3] LIN S, GUO H, GONG J D B, et al. Phenolic profiles, β -glucan contents, and antioxidant capacities of colored Qingke (Tibetan hullless barley) cultivars[J]. *J Cereal Sci*, 2018, 81: 69-75.
- [4] 王新坤, 刘超, 杨清梅, 等. 青稞籽粒 β -葡聚糖含量及不同加工方式对其变化的影响[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(2): 124-130.
- [5] 夏雪娟. 青稞全谷粉对高脂膳食大鼠胆固醇肝肠代谢的影响机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [6] 罗静. 不同产地青稞天然维生素E分离, 氧化活性及品种亲缘关系的研究[D]. 成都: 西华大学, 2019.
- [7] OLAS B, BRYŚ M. Beer components and their beneficial effect on the hemostasis and cardiovascular diseases-truth or falsehood[J]. *Food Chem Toxicol*, 2020, 146: 111782.
- [8] MAIA P D D S, BAIÃO D D S, SILVA V P F D, et al. Microencapsulation of a craft beer, nutritional composition, antioxidant stability, and drink acceptance[J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2020: 110104.
- [9] HUMIA B V, SANTOS K S, SCHNEIDER J K, et al. Physicochemical and sensory profile of Beaugard sweet potato beer[J]. *Food Chem*, 2020, 312: 126087.
- [10] 虞思倩, 吴迪, 杨盼盼, 等. 薏米啤酒的加工工艺研究与优化[J]. *食品工业*, 2020, 41(4): 6.
- [11] 苑萌, 杨贵恒, 聂聪, 等. 藜麦啤酒的酿造方法及香气化合物[J]. *食品工业*, 2020, 41(11): 56-59.
- [12] SANTOS J P D, ACUNHA T D S, PRESTES D N, et al. From brown, red, and black rice to beer: Changes in phenolics, γ -aminobutyric acid, and physicochemical attributes[J]. *Cereal Chem*, 2020, 97(6): 1148-1157.
- [13] 周韶华, 宋扬, 周广田. 二次发酵青稞啤酒工艺的研究[J]. *齐鲁工业大学学报(自然科学版)*, 2015, 29(2): 33-37.
- [14] 朱光炜, 张乃斌, 姚淼, 等. 青稞啤酒生产工艺的研究[J]. *农业开发与装备*, 2013(6): 44-46.
- [15] 薛文华, 李京城, 蒋红梅, 等. 青稞鲜啤酿造工艺研究[J]. *西藏农业科技*, 2018, 40(S1): 26-29.
- [16] 张荣霞, 李崎, 朱林江, 等. 青稞红曲啤酒中 γ -氨基丁酸(GABA)的研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2018, 37(11): 1148-1152.
- [17] 管敦仪. 啤酒工业手册[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 252-257.
- [18] 张楷正, 吕开斌, 邓楷. 改良刚果红法检测分析羌族咂酒中的 β -葡聚糖[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(1): 4.
- [19] 石林娟, 曹磊, 宋玉, 等. HPLC法和Berthelot比色法测定发芽糙米中 γ -氨基丁酸的含量[J]. *粮食与饲料工业*, 2015(1): 61-65.
- [20] BAYAT P, FARSHCHI M, YOUSEFIAN M, et al. Flavonoids, the compounds with anti-inflammatory and immunomodulatory properties, as promising tools in multiple sclerosis (MS) therapy: A systematic review of preclinical evidence[J]. *Int Immunopharmacol*, 2021, 95: 107562.
- [21] 董小雷. 啤酒感官品评[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 126-130.
- [22] YAN D D, YONG Y F, SHELLIE R A, et al. Assessment of the phytochemical profiles of novel hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars: A potential route to beer crafting[J]. *Food Chem*, 2019, 275: 15-23.
- [23] 李宪臻, 王伟, 蒋宝航, 等. 啤酒花抗性机制的研究进展[J]. *微生物学杂志*, 2015, 35(5): 1-7.
- [24] STERCZYŃSKA M, STACHNIK M, POREDA A, et al. Ionic composition of beer worts produced with selected unmalted grains[J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 137(3): 110348.
- [25] 杨川. 马铃薯啤酒的工艺技术研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2020.
- [26] KUCHARCZYK K, TUSZYŃSKI T. The effect of temperature on fermentation and beer volatiles at an industrial scale[J]. *J I Brewing*, 2018, 124(3): 230-235.
- [27] SOLGAJOVÁ M, FRANČÁKOVÁ H, DRÁB Š, et al. Effect of temperature on the process of beer primary fermentation[J]. *J Microbiol Biotechnol*, 2013, 2(Special issue 1): 1791-1799.