

不同比例黑青稞麦芽汁中酵母的发酵性能及啤酒品质

刘皓¹, 陈焯¹, 曾英杰¹, 陈炼红¹, 李思宁¹, 王媚², 李媛媛¹, 阳辉蓉^{1*}

(1. 西南民族大学食品科学与技术学院, 四川成都 610041)

(2. 四川省酒业集团有限责任公司, 四川成都 610041)

摘要: 黑青稞富含多种营养物质和生物活性成分, 具有重要的研究意义和开发价值。该文探究了不同配比大麦芽与黑青稞麦芽 (10:0、8:2、6:4、4:6、2:8、0:10 *m/m*) 麦汁 (HA、HB、HC、HD、HE、HF) 中酵母的发酵特性及其啤酒的营养成分、品质和感官特性。结果表明: 黑青稞麦芽的增加影响了酵母的发酵性能, 其中显著降低了 pH 值、发酵度和乙醇产量 ($P < 0.05$); 随着黑青稞麦芽比例的增加, 啤酒的 β - 葡聚糖、浊度、花色苷和色度显著增大 ($P < 0.05$), 而 HB 啤酒中多酚含量最高 105.31 mg/L; HD 和 HE 啤酒的起泡性最好; HB、HC、HD 和 HE 啤酒持泡性均较好; 6 组啤酒样品中共检出 54 种风味物质, 黑青稞麦芽的添加导致啤酒中醇类物质的种类和含量有所减少, 但增加了酯类物质的种类, HB 和 HC 啤酒中酯类最多有 32 种; PCA 分析显示各组风味成分呈现明显差异, 表明黑青稞麦芽的添加可显著改变啤酒的风味组成; 感官分析中 HB 和 HC 展现出较好评分。综合来看, 黑青稞麦芽占比 20%~40% (*m/m*) 时, 啤酒展现出较好的品质、风味和感官特性。

关键词: 黑青稞麦芽; 啤酒; 发酵性能; 理化特性; 泡沫特性; 风味物质; 感官评价

文章编号: 1673-9078(2024)03-74-82

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.3.0416

Fermentation Performance of Yeast in Malt Wort with Different Proportions of Black Highland Barley and the Resulting Beer Quality

LIU Hao¹, CHEN Ye¹, ZENG Yingjie¹, CHEN Lianhong¹, LI Sining¹, WANG Mei², LI Yuanyuan¹, YANG Huirong^{1*}

(1. College of Food Science and Technology, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

(2. Sichuan Liquor Group Co. Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Black highland barley is rich in a variety of nutrients and bioactive ingredients, and hence of important research significance and development value. This work investigated the fermentation characteristics of yeast in the wort having different proportions of black barley malt and barley malt (10:0, 8:2, 6:4, 4:6, 2:8, and 0:10 *m/m*; referred to as HA, HB, HC, HD, HE and HF, respectively) and the nutritional composition, quality, and sensory characteristics of the resulting

引文格式:

刘皓, 陈焯, 曾英杰, 等. 不同比例黑青稞麦芽汁中酵母的发酵性能及啤酒品质[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 74-82.

LIU Hao, CHEN Ye, ZENG Yingjie, et al. Fermentation performance of yeast in malt wort with different proportions of black highland barley and the resulting beer quality [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 74-82.

收稿日期: 2023-04-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32001675); 四川省自然科学基金项目 (23NSFSC1199); 西南民族大学引进人才科研启动金资助项目 (RQD2021077)

作者简介: 刘皓 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: 1484002371@qq.com

通讯作者: 阳辉蓉 (1988-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品生物技术、功能性食品, E-mail: zyjyhr@sina.com

beer. The results indicated that the addition of black barley malt significantly decreased the pH value, fermentability, and ethanol yield ($P<0.05$) thereby affecting yeast fermentation performance. An increase in the proportion of black barley malt resulted in an increase, in the β -glucan and anthocyanin contents, turbidity, and chroma of the resulting beer while the polyphenol content increased up to 105.31 mg/L in HB beer sample. The HE and HD beer samples exhibited high foaming ability, while the HB, HC, HD, and HE beer samples demonstrated good foam retention capacity. A total of 54 types of flavor substances were detected from the six beer samples. The addition of black barley malt caused a reduction in the type and concentration of alcohols while increasing the ester compounds. Around 32 esters were identified in the HB and HC beer samples. PCA analysis revealed significant differences in the flavor components of the different samples indicating that the addition of black barley malt could significantly improve the flavor composition of beer. The HB and HC beer samples obtained higher scores in sensory analysis. In summary, addition of black barley malt at 20% to 40% (m/m), resulted in beer with excellent quality, flavor, and sensory characteristics.

Key words: black highland barley malt; beer; fermentability; physicochemical properties; foaming characteristics; flavor substances; sensory evaluation

青稞 (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook.f.) 是一种成熟后外稃与颖果分离且籽粒裸露的大麦, 广泛分布于我国青藏高原、川西、云南等高原地区^[1]。与大麦和小麦品种相比, 青稞富含矿物质、蛋白质、氨基酸、 β -葡聚糖、多酚、维生素和黄酮类等多种活性成分^[2], 具备多种生物功能, 如抗炎、抗癌、抗糖尿病、抗菌、抗肥胖、抗疲劳、抗衰老、治疗高血糖和高血脂以及心脏病等^[2]。

随着人民生活水平的不断提高, 人们对营养健康越来越重视, 高端啤酒也越来越受消费者喜爱。近几年, 青稞因自身丰富的营养价值和生物活性成分, 在啤酒领域广受关注。在啤酒酿造过程中, 通过添加不同比例的青稞或青稞麦芽制备成的麦汁进行发酵, 可获得不同风味和口感的青稞啤酒。与普通啤酒相比, 青稞啤酒富含多种有益身体健康的成分, 如 γ -氨基丁酸、 β -葡聚糖、多酚类和黄酮类等^[3-5]。青稞根据颜色的不同, 又分为白青稞、蓝青稞、紫青稞和黑青稞等。研究发现, 黑青稞与其它有色青稞相比营养物质更丰富、活性成分含量更高^[6]。林津等^[7]研究发现西藏黑青稞中的蛋白质、氨基酸、矿物质、维生素、花青素等营养成分和生物活性物质均高于白青稞。朱昱霖等^[8]发现长黑青稞中含有 18 种酚类化合物, 且抗氧化效果显著。同时, 与水稻、小麦、玉米相比, 黑青稞的营养成分高, 且其营养比例更适合人体需要, 并具有低糖、低脂肪、高蛋白、高维生素及高纤维的特点, 更符合人们对营养健康的要求。

目前, 黑青稞用于啤酒酿造的研究报道鲜见。本文以大麦芽和黑青稞麦芽为原料, 研究了不同大麦芽和黑青稞麦芽比例 (大麦芽: 黑青稞麦芽 = 10:0、

8:2、6:4、4:6、2:8、0:10, m/m) 的麦汁发酵过程中酵母的发酵性能变化, 以及嫩啤酒的理化特征、营养成分、风味物质和感官品质的差异, 以期获得最优的黑青稞麦芽添加比例, 酿造出品质优良的黑青稞啤酒, 为青稞啤酒新品和产业开发提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大麦芽, 欧麦麦芽有限公司; 黑青稞, 四川省甘孜州; 啤酒酵母 *Saccharomyces pastorianus* CGMCC No.4466 来自华南理工大学食品生物技术实验室。

试剂: 啤酒花萨兹酒花蛋白胨、酵母膏, 北京奥博星生物技术有限责任公司; 葡萄糖, 西王药业有限公司; 福林酚试剂, 广州合为医药科技有限公司; 高峰 α -淀粉酶, 安徽酷尔生物工程有限公司; 刚果红试剂, 天津市大茂化学试剂厂; 茚三酮, 湖北汉达飞生物科技有限公司; 其它试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

紫外-可见分光光度计 UV1780, 日本岛津公司; BGT-8A 全自动糖化仪, 杭州博日科技有限公司; 5804R 冷冻离心机, 德国 Eppendorf 公司; 数字 pH 计, 瑞士 Mettler-Toledo 公司; TraceDSQ 型 GC-MS 联用仪, 美国 Thermos 公司。

1.3 方法

1.3.1 黑青稞麦芽的制备及质量

黑青稞麦芽的制备参考张乃斌等^[9]的方法并稍

作改进：称取 6 kg 青稞种子，剔除杂质，加入 10 L 1.5% 次氯酸钠溶液消毒 15 min，随后将种子冲洗至中性。浸麦工艺按照 18 °C 浸 6 断 10 浸 9 断 9 浸 6，共 40 h，浸麦料液比为 1:2。浸麦结束后，在温度 15 °C 和湿度 95% 下发芽 96 h。发芽结束后进行调萎参数：45 °C 4 h → 55 °C 5 h → 69 °C 5 h → 76 °C 5 h；焙焦参数：83 °C 3 h。黑青稞麦芽质量： α -N 128.7 mg/100 g、糖化力 213.6 WK、库值 34.2%、浸出物 81.3%。

1.3.2 麦汁制备

将大麦芽：黑青稞麦芽分别按照 10:0、8:2、6:4、4:6、2:8、0:10 m/m 的比例称量、粉碎，按 1:4 的料液比 (g/mL) 加入蒸馏水，搅拌均匀进行糖化。糖化程序：升温至 45 °C 保温 30 min；后升温至 63 °C 保温 60 min；再升温至 72 °C 保温 10 min；最后升温至 78 °C 保温 10 min。升温速度为 1 °C /min。糖化结束后迅速冷却至 45 °C 进行滤布过滤、80 °C 热水洗糟，滤液煮沸 90 min，煮沸过程中分三次添加酒花，添加量以麦汁体积计算约 1.0 g/L。煮沸结束后再次过滤，将澄清的麦汁用饮用水分别定型至 11 °P，后分别装至 3 L 的锥形瓶中，于 121 °C 灭菌备用，分别命名为 HA、HB、HC、HD、HE、HF。

1.3.3 啤酒酵母接种及发酵

将酵母泥接种于 10 mL 种子培养基中，28 °C 摇床 (180 r/min) 培育 24 h，后转至 200 mL 种子培养基中，摇床 (20 °C，140 r/min) 培养 48 h，最后转至 1 L 种子培养基中，15 °C 静置培养 72 h，离心 (4 °C，8 000 \times g，10 min) 收集酵母泥。将酵母泥按 4 g/L 接种量接入麦汁中，插上发酵栓，置于 12 °C 培养箱进行发酵，离心收集发酵液，低温保藏待测。

1.3.4 生物量的测定

参考 Yang 等^[10]方法，将 50 mL 发酵液在 5 000 \times g 离心 20 min，去除上清液，用去离子水洗涤 2 次，105 °C 烘干后称量。

1.3.5 理化指标测定

通过 pH 计测定样品的 pH 值。

酒精度、原麦汁浓度、浸出物浓度、真正发酵度、游离氨基氮、泡持性、浊度、色度的测定：按照 GB/T4928-2008《啤酒分析方法》中的方法进行测定。

1.3.6 β -葡聚糖的测定

β -葡聚糖测定参考 Gribkova 等^[11]的方法并

稍作改进。 β -葡聚糖标准曲线 $y=0.0035x+0.0116$ ($R^2=0.996$)，分别取稀释后的发酵液 2 mL，加入 4 mL 的刚果红溶液，反应 10 min，于波长 520 nm 处测定吸光度 ($A_{520\text{nm}}$)，根据标准曲线计算不同样品中的 β -葡聚糖含量。

1.3.7 多酚的测定

多酚含量测定采用 Dang 等^[12]改进的 Folin-Ciocalteu 法。标准曲线为： $y=2.0229x+0.0122$ ($R^2=0.998$)。760 nm 波长处测定吸光度，再根据标准曲线计算不同比例麦芽汁中的多酚含量。

1.3.8 花色苷的测定

采用 pH 示差法测定啤酒样品中花色苷含量，参考 Jin 等^[13]的方法并稍作改进。取 1 mL 各组分啤酒样品，分别用 pH 值 1.0 和 pH 值 4.5 的缓冲液稀释至 5 mL，混均后于 40 °C 静置平衡 0.5 h，分别于 520、700 nm 波长处测定其吸光度值，计算花色苷含量，其公式如下：

$$W = \frac{A \times M_w \times D \times 1000}{\delta \times 1} \quad (1)$$

式中：

W ——花色苷含量，g/L；

A ——($A_{520\text{nm}} - A_{700\text{nm}}$) pH 1.0 - ($A_{520\text{nm}} - A_{700\text{nm}}$) pH 4.5；

M_w ——矢车菊-3-葡萄糖苷的分子量，449.2 g/mol；

D ——稀释倍数；

δ ——矢车菊素-3-葡萄糖苷消光系数，26900 L \cdot cm/mol。

1.3.9 风味物质的测定

采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术测定啤酒中的风味物质。参考陈华磊等^[14]的方法稍作修改，在 20 mL 的顶空瓶中加入 6 mL 啤酒样品和 1.5 g 氯化钠，然后加入 20 μ L 的 2-辛醇 (20 mg/mL) 作为内标。采用 75 μ m CAR-PDMS 萃取头，样品在 40 °C 平衡 20 min，顶空萃取 30 min。在气相色谱进样口 250 °C 进行解吸，解吸 1 min。

气相色谱条件：样品通过 DB-1 ms 毛细色谱柱 (60 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m) 进行分离；起始柱温 40 °C；进样口温度保持 230 °C；40 °C 保持 3 min，然后以 4 °C /min 升至 120 °C，再以 6 °C /min 升至 240 °C，保持 9 min；载气为高纯氦气，流速为 1.0 mL/min；不分流进样。

质谱条件：离子源温度为 230 °C，电子电离源 (Electronic Ionization, EI)，电子能量为 70 eV，质量扫描范围 35~400 m/z ，传输线温度为 250 °C。

将风味物质的离子扫描质谱图与 NIST 数据库

进行对比分析, 再结合人工谱图解析, 定性确定各种组分。定量采用内标法进行半定量分析, 计算公式为:

$$E = \frac{B_i}{B_0} \times c \quad (2)$$

式中:

E ——风味物质的含量, mg/L;

B_i ——各物质的峰面积;

B_0 ——内标的峰面积;

c ——内标物质量浓度, mg/L。

1.3.10 感官评定

啤酒感官评价是由 20 人组成感官评定小组 (男女各 10 名) 来完成, 感官评定小组年龄介于 22~35 岁且评定人员对啤酒无明显喜好或厌恶。对 6 组啤酒随机进行感官评定分析。各个样品随机排序, 感官评定小组人员参照 Titus 等^[15]方法进行品鉴。感官评价以量化选定的与外观和味道相关的感官属性, 并以 7~9 的强度来打分, 其中 7 表示强度最弱, 而 9 表示最强。感官属性如下: 协调性、外观、口味、泡沫、香气类。

1.3.11 数据分析与处理

各数据均是 3 次测定的平均值, 采用 SPSS 25.0 软件进行统计和相关性分析, 利用 Origin 2022b 软件作图, Metabo Analyst 5.0 进行 PCA 分析。

2 结果与分析

2.1 不同组分麦汁中酿酒酵母的发酵性能

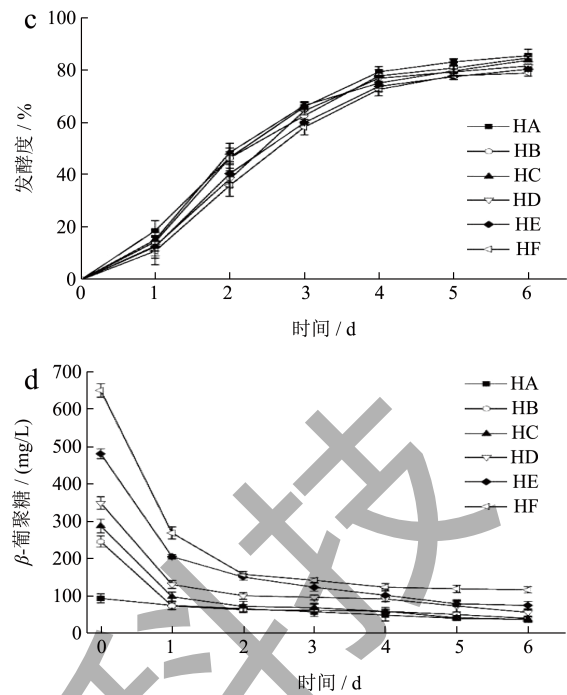
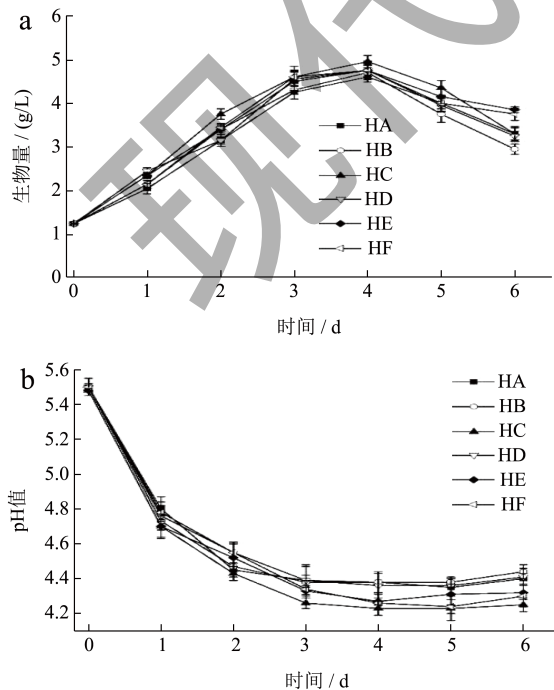


图 1 不同组分麦汁发酵过程中生物量 (a)、pH 值 (b)、发酵度 (c) 和 β -葡聚糖的变化 (d)

Fig.1 Changes on biomass (a), pH (b), fermentability (c), β -glucan (d) of different wort during fermentation

如图 1a 所示, 在发酵 0~4 d 时, 6 组发酵液的生物含量均呈上升趋势, 此期间酵母菌利用麦汁中的营养物质快速生长繁殖数量急剧增加, 进入对数期。其中, HC 组显示出较快的生长速率。在发酵 4~6 d 时, 6 组发酵液生物量因细胞凝絮均呈下降趋势。

pH 值不仅反映发酵过程中游离酸的变化, 还是影响细胞生理特性、成品酒口感和颜色的重要因素^[10,16]。由图 1b 可知, 6 组发酵液的 pH 值在发酵 0~3 d 均快速下降, 这可能是由于发酵过程中酵母利用麦汁中的营养物质代谢产生酸性物质引起^[17]。发酵 3~5 d 时, 各组的 pH 值趋于稳定。发酵后期, 各组的 pH 值均有轻微上升, 这可能是由于麦汁中营养物质减少 (如糖), 酵母代谢发生变化导致酸含量下降^[17,18]。发酵结束后, HA (pH 值 4.40)、HB (pH 值 4.44)、HC (pH 值 4.25)、HD (pH 值 4.41)、HE (pH 值 4.32) 和 HF (pH 值 4.30) 组啤酒的 pH 值均符合啤酒国家标准的规定 (pH 值 4.40~4.60)。

如图 1c 所示, 酵母在 6 组发酵液中呈现出不同的发酵速率。在发酵 0~4 d, 6 组发酵液的糖度均迅速下降, 但黑青稞麦芽添加组的降糖速率均低于大麦芽组; 而且, 随着黑青稞麦芽添加比例的增加, 降糖速率逐渐降低, 可能是由于黑青稞麦芽中碳源和氮源的种类和含量不同, 酵母代谢模式不同, 进

而引起发酵糖度出现差异^[19]。发酵4 d后,酵母停止增殖,糖度缓慢降低。

研究发现, β -葡聚糖不仅具有对人体有益多种功能活性,对啤酒的浊度和口感也存在显著影响,黑青稞是有色青稞中 β -葡聚糖含量最高的品种^[20]。由图1d可知,随着黑青稞麦芽添加量的增加,11 °P麦汁中的 β -葡聚糖含量也逐渐升高,且100% (*m/m*)黑青稞麦芽汁中 β -葡聚糖的含量最高(649.14 $\mu\text{g/mL}$)。在发酵过程中,随着发酵时间的延长,6组发酵液中 β -葡聚糖含量均显著降低($P<0.05$),此结果与糖度变化趋势一致(图1c)。发酵过程中,6组麦汁中的 β -葡聚糖含量均下降,主要是由于 β -葡聚糖的分子量较大,发酵过程中受到凝固物以及酿酒酵母沉降等因素的影响会有所降低^[21,22];普遍公认啤酒 β -葡聚糖含量控制标准为低于150 mg/L。发酵结束后,6组发酵液 β -葡聚糖含量均符合标准要求,其中,HF组 β -葡聚糖含量(117.71 mg/L)显著高于其它五组($P<0.05$),HA组含量最低为39.14 mg/L。

2.2 不同麦芽比例啤酒的乙醇含量

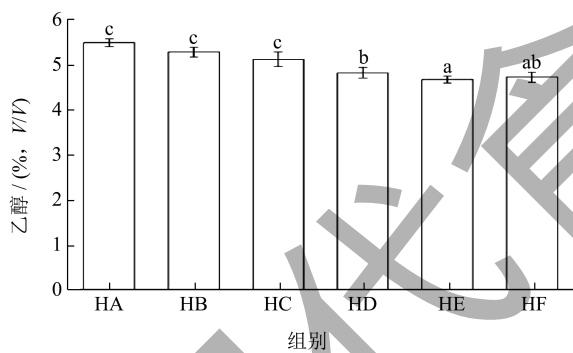


图2 不同啤酒的乙醇含量

Fig.2 Ethanol content of different beer

麦汁中的大部分糖类物质被酵母用于增殖和乙醇发酵,6组啤酒样品中残糖最少是HA(1.73 °P),HF组残糖最高为2.25 °P,结果如图2所示。随着黑青稞麦芽添加比例的增大,啤酒的乙醇含量呈现降低趋势,其中HA、HB和HC组啤酒之间乙醇含量不存在显著差异,但与HD、HE和HF组啤酒的乙醇含量存在显著差异($P<0.05$)。乙醇含量的降低与麦汁中碳水化合物和氮源种类含量密切相关,而麦汁成分受麦芽种类和麦汁制备工艺影响^[1,2,10]。HA组啤酒中乙醇含量最高为5.49% (*V/V*),而HF组啤酒中乙醇含量最低为4.67% (*V/V*)。上述结果说明,过高的黑青稞麦芽添加会影响乙醇的生产效

率,黑青稞啤酒发酵所需的适宜黑青稞麦芽添加比例在0~40% (*m/m*)之间。

2.3 不同麦芽比例啤酒的浊度和色度分析

浊度是啤酒透明度的外观指标,直接影响啤酒的外观质量和非生物稳定性^[23]。由图3a可知,随着黑青稞麦芽的添加,啤酒的透光率呈现降低趋势,其中,HF组啤酒的透光率显著低于HA和HB($P<0.05$),表明随着黑青稞麦芽比例的增加,啤酒的浊度升高。啤酒生产过程中有多种原因均能导致啤酒混浊升高,如多酚含量、氧含量、温度、碳水化合物等。随着黑青稞麦芽比例的增加,麦汁中对啤酒浊度有显著影响的花色苷和碳水化合物(如 β 葡聚糖)均显著增加,这是引起黑青稞啤酒浊度改变的重要因素。

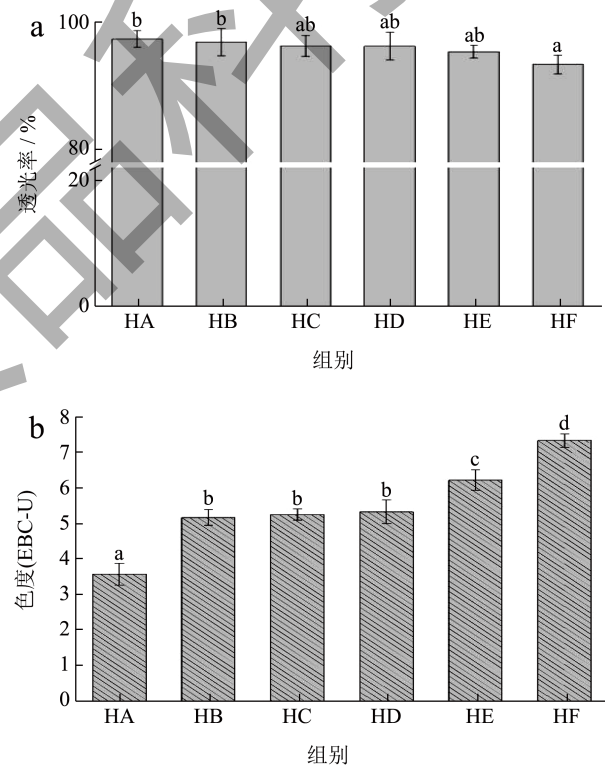


图3 不同啤酒的透光率(a)和色度(b)

Fig.3 Transmittance (a) and chroma (b) of different beer

如图3b所示,随着黑青稞麦芽添加比例增大,6组啤酒样品色度整体呈现逐渐升高趋势,并且添加黑青稞麦芽的啤酒色度与大麦芽啤酒色度存在显著差异($P<0.05$)。100% (*m/m*)黑青稞啤酒色度最高为6.19 EBC-U。上述结果表明:6组啤酒的色度受黑青稞麦芽含量的影响更大,原因可能是黑青稞麦芽中的酚类和花色苷等物质的含量及种类不同引起。研究发现,酚类化合物和花色苷对啤酒的颜

色以及非生物稳定性存在较大影响^[23], 如啤酒生产过程中酚类化合物与蛋白质作用形成不溶性沉淀, 酚类物质氧化聚合都会影响啤酒的色度^[24]。研究表明, 在发酵过程中, 色素物质的形成如花色苷等也会影响啤酒色度^[25-27]。

2.4 不同麦芽比例啤酒的多酚和花色苷含量分析

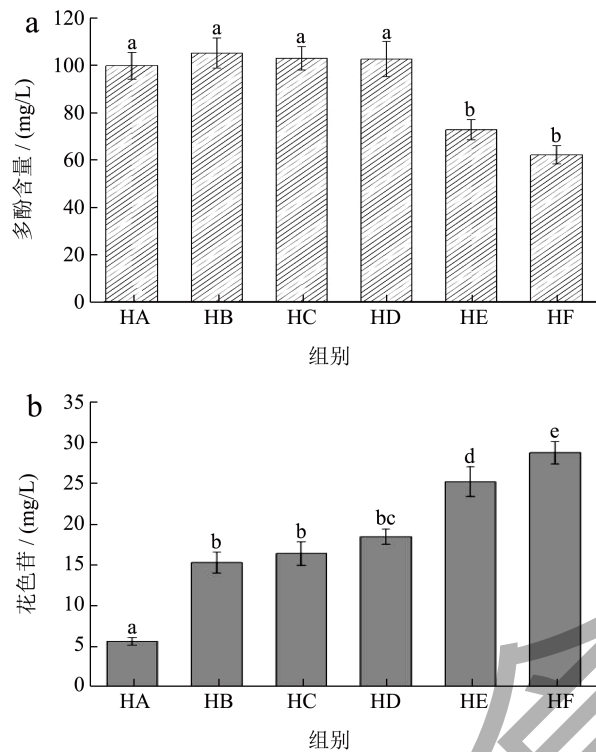


图4 不同啤酒的多酚含量 (a) 和花色苷含量 (b)

Fig.4 Contents of polyphenols (a) and anthocyanins (b) in different components of Beer

啤酒中含有多种酚类化合物, 多酚物质不仅影响啤酒浊度和色度, 还能直接影响啤酒的口感、风味、丰满度和涩味等^[28]。基于多酚物质对啤酒的影响, 进一步测定了6组啤酒中的多酚含量。由图4a可知, 6组啤酒样品中多酚含量分别为99.94、105.31、103.12、102.67、72.85和62.24 mg/L。HA、HB、HC和HD啤酒中的多酚含量无显著差异, 但与HE和HF组啤酒中多酚含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。随着黑青稞麦芽比例增大, 6组啤酒中多酚含量整体呈现逐渐降低的趋势, 这不仅与发酵过程有关 (如多酚物质与麦汁中蛋白结合产生浑浊), 还与黑青稞麦芽添加量有关, 因为啤酒中约70%~80%的酚类化合物来自麦芽本身^[29]。进一步分析了大麦芽和黑青稞麦芽的多酚含量分别为8.56和6.72 mg/g。因此, 啤酒中多酚水平是由原料和发

酵综合产生的结果。其中, 花色苷是多酚类物质中的一类, 花色苷的含量对啤酒色度也具有一定的影响。黑青稞中富含花色苷类物质^[6,13], 因此进一步测定了啤酒中花色苷物质的含量。由图4b可知, 随着样品中黑青稞麦芽比例增大, 花色苷的含量整体呈现逐渐升高的规律, 100% (m/m) 黑青稞啤酒中花色苷含量最高为28.73 mg/L。这是由于黑青稞麦芽比例增加也提升了花色苷的含量。啤酒中花色苷含量与多酚物质含量呈负相关, 与黑青稞麦芽比例呈正相关, 表明花色苷可能主要来源于黑青稞麦芽。这个结果与色度变化呈正相关, 说明麦芽中花色苷的含量很可能是啤酒色度的一个重要影响因素。

2.5 啤酒泡沫特性

啤酒泡沫是评价啤酒质量的关键指标, 良好的泡沫性可提升啤酒清凉爽口的口感^[30]。由图5可知, 随着黑青稞麦芽添加量增大, 啤酒的起泡性先升高后降低, 其中60% (m/m) 黑青稞麦芽添加组的啤酒起泡性最高, 相比100% (m/m) 大麦芽啤酒提高了53.13%。另外, 6组啤酒的持泡性也是随着黑青稞麦芽添加量的增加先升高后降低, HB、HC和HD组啤酒均显示较好的持泡性。糖类和蛋白质 (啤酒泡沫的骨架结构) 作为啤酒中的重要组分, 对啤酒的起泡性和维持泡沫稳定性有重要意义。黑青稞啤酒高起泡性和持泡性可能与青稞麦芽中富含的糖类 (如 β -葡聚糖) 和蛋白质密切相关^[4,23,31]。

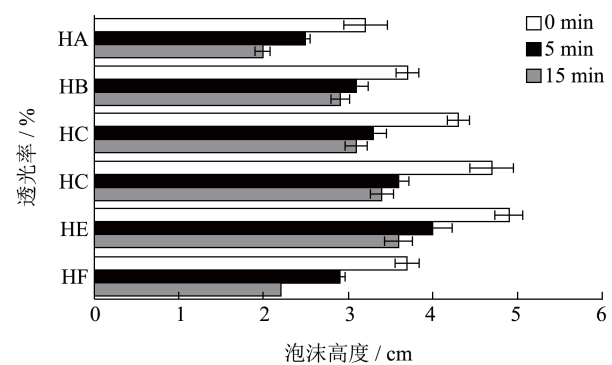


图5 不同啤酒泡沫特性

Fig.5 Foam characteristics of different beer

2.6 添加黑青稞麦芽对啤酒风味物质的影响

啤酒中含有的醇类、酯类等风味物质对啤酒风味具有重要作用^[26,32]。这些风味物质富集在一起, 相互协调, 赋予啤酒浓郁而独特的风味^[36]。采用顶空固相微萃取并结合GC-MS技术, 对6组啤酒样品中的主要风味物质醇类和酯类物质进行分析, 结

果如图 6a 所示。6 组啤酒样品中检测出 54 种高级醇 (20 种) 和酯类物质 (34 种), 啤酒样品的风味组成存在一定差异。HA 中高级醇 16 种, 酯类物质 25 种; HB 中高级醇 16 种, 酯类物质 32 种; HC 中高级醇 14 种、酯类物质 32 种; HD 中高级醇 14 种, 酯类物质 30 种; HE 中高级醇 14 种, 酯类物质 29 种; HF 中高级醇 14 种, 酯类物质 30 种。通过主成分分析法 (Principal component analysis, PCA) 进一

步分析 6 组啤酒风味物质之间差异性, 结果如图 6b 所示。PC2 的贡献率分别为 78.6% 和 14.1%, 累计达到 92.7%, 说明两个主成分能够较好反映 6 个啤酒样品风味物质信息。从载荷图 6c 可知, β -苯乙醇、辛酸乙酯、反式-4-癸烯酸乙酯、乙酸苯乙酯、癸酸乙酯、棕榈酸乙酯和月桂酸乙酯等对 PC1 和 PC2 的贡献率较大。这些结果表明添加黑青稞麦芽能显著改变啤酒风味。

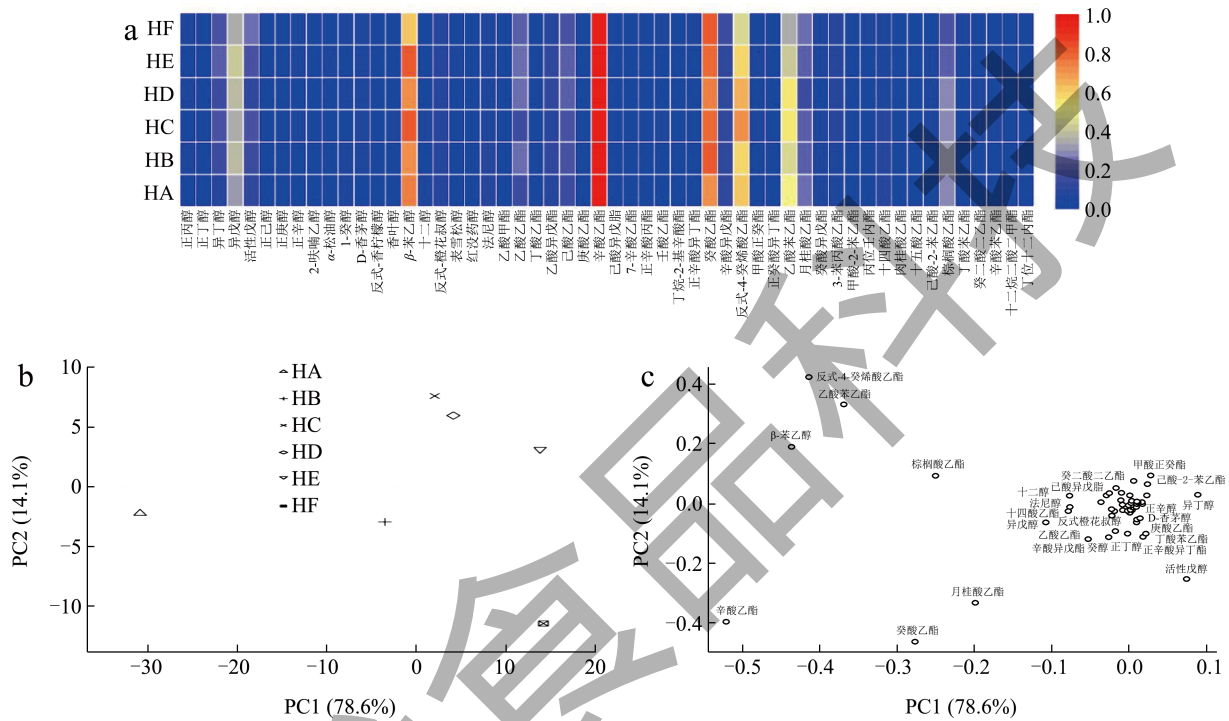


图 6 不同啤酒风味物质热力图 (a)、PCA 得分图 (b) 和载荷图 (c)

Fig.6 Thermal diagram (a), PCA score plot (b) and loading plot (c) of different beer flavor components

2.7 感官评价

感官品质是啤酒能否获得消费者青睐的重要指标。如图 7 所示, 在啤酒外观方面, HF 组透明度较低浊度高, 而 HA 和 HB 组酒体清澈透明, 故而得分更高, 这一点与浊度结果一致; 在口味方面, 得分较高的是 HB 和 HC 组, 其口味纯正淡爽, 酒体醇厚, 没有异味, HE 和 HF 酒体中略有酸味; 在香气方面, HB 和 HC 组得分较高, 主要是具有大麦芽和黑青稞麦芽香味, 且香味浓郁醇厚; 在泡沫方面, HA、HB、HC 和 HD 组啤酒泡沫洁白细腻、挂杯明显, 但 HD 组得分最高, 这与其良好的起泡性和持泡性密切相关。在协调性方面, HB 和 HC 组得分较高, 综合了大麦芽啤酒和青稞啤酒的优点, 酒体呈金黄色且透明, 啤酒香味浓郁、泡沫丰富细腻且持泡性好。综上, 黑青稞麦芽添加 [比例

20%~40% (m/m) 之间] 促使啤酒在一定程度上显示出较好的感官品质, 并且黑青稞麦芽可改变啤酒的香气和口感, 使得啤酒香气浓郁并具有独特的青稞麦芽风味。

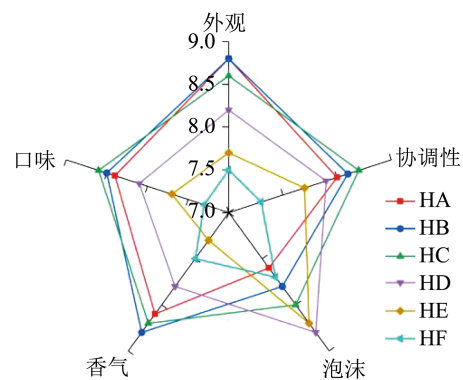


图 7 不同啤酒感官评价雷达图

Fig.7 Sensory evaluation radar of different beer

3 结论

黑青稞麦芽的添加改变了酵母的发酵性能,显著降低了啤酒的 pH 值、发酵度和乙醇产量 ($P < 0.05$);随着黑青稞麦芽比例的增加,啤酒中的 β -葡聚糖、浊度、花色苷和色度明显增加 ($P < 0.05$), HF 中均最大分别为 117.71 mg/L、93.33%、28.73 mg/L 和 6.19 EBC-U; 而 HB 中多酚含量最多 (105.31 mg/L); HD 和 HE 显示了较好的起泡性和持泡性。在风味物质方面,6 组啤酒样品共检出 54 种醇酯类,随着黑青稞麦芽比例增加啤酒中醇类物质种类和含量减少,酯类物质种类有所增加,HB 和 HC 中酯类最多有 32 种,说明黑青稞麦芽的添加改变了啤酒风味。PCA 分析显示各组分香气成分存在明显差异,能够较好的区分彼此。对比不同啤酒样品,HB 和 HC 组显示出较好的感官评分。上述结果说明酿造优质的黑青稞啤酒,黑青稞麦芽的添加比例具有一个适度的范围在 20%~40% (m/m) 之间。

综上所述,适当的添加黑青稞麦芽不仅能提高酵母发酵性能,还赋予啤酒更多的风味、改善啤酒口感。因此,本研究为开发新型健康啤酒提供理论依据,并为黑青稞的相关研究提供参考。

参考文献

- [1] ZHANG K Z, YANG J G, QIAO Z W, et al. Assessment of beta-glucans, phenols, flavor and volatile profiles of hulless barley wine originating from highland areas of China [J]. Food Chemistry, 2019, 293: 32-40.
- [2] OBADI M, SUN J, XU B. Highland barley: Chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications [J]. Food Research International, 2021, 140: 110065.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] CARVALHO DO, GUIDO LF. A review on the fate of phenolic compounds during malting and brewing: Technological strategies and beer styles [J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131093.
- [6] 周红,张杰,张文刚,等.青海黑青稞营养及活性成分分析与评价[J].核农学报,2021,35(7):1609-1618.
- [7] 林津,洛桑仁青,周陶鸿,等.西藏山南隆子县黑青稞与白青稞的营养成分及生理活性物质的比较分析[J].食品科技,2016,41(10):81-92.
- [8] 朱昱琳,杨士花,黄勇桦,等.长黑青稞中不同形态多酚的提取及体外抗氧化活性[J].食品科学,2020,41(7):8-13.
- [9] 张乃斌,王嵩,龚古迪,等.低 β -葡聚糖青稞麦芽制备工艺的研究[J].酿酒科技,2013,6:70-72.
- [10] YANG H R, COLDEA T E, ZENG Y J, et al. Wheat gluten hydrolysates promotes fermentation performance of brewer's yeast in very high gravity worts [J]. Bioresources and Bioprocessing, 2021, 8(1): 5.
- [11] GRIBKOVA I N, KHARLAMOVA L N, LAZAREVA I V, et al. The influence of hop phenolic compounds on dry hopping beer quality [J]. Molecules, 2022, 27(3): 740.
- [12] DANG B, ZHANG W G, ZHANG J, et al. Evaluation of nutritional components, phenolic composition, and antioxidant capacity of highland barley with different grain colors on the qinghai tibet plateau [J]. Foods, 2022, 11(14): 2025.
- [13] JIN H M, DANG B, ZHANG W G, et al. Polyphenol and anthocyanin composition and activity of highland barley with different colors [J]. Molecules, 2022, 27(11): 3411.
- [14] 陈华磊,黄克兴,郑敏,等.基于非靶向风味组学分析3种品牌啤酒的风味差异[J].食品科学,2021,42(6):223-228.
- [15] TITUS B M, LERNO L A, BEAVER J W, et al. Impact of dry hopping on beer flavor stability [J]. Foods, 2021, 10(6): 1264.
- [16] 胡文彬,尹雪林,李二虎.猕猴桃黑糯米复合发酵酒的制备工艺及品质特性分析[J].食品与发酵工业,2023,49(4): 23-29.
- [17] HESHAM A E, MOSTAFA Y S, ALSHARQI L E O. Optimization of citric acid production by immobilized cells of novel yeast isolates [J]. Mycobiology, 2020, 48(2): 122-132.
- [18] 王小平,雷激,唐诗,等.酵母发酵改善麸皮食用品质的研究[J].食品工业科技,2016,37(10):231-235,241.
- [19] OFOEDU C E, AKOSIM C Q, IWOUNO J O, et al. Characteristic changes in malt, wort, and beer produced from different nigerian rice varieties as influenced by varying malting conditions [J]. PeerJ, 2021, 9: e10968.
- [20] OBADI M, SUN J, XU B. Highland barley: Chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications [J]. Food Research International, 2021, 140: 110065.
- [21] BAI Y P, ZHOU H M, ZHU K R, et al. Effect of thermal processing on the molecular, structural, and antioxidant characteristics of highland barley β -glucan [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 271: 118416.
- [22] 梁海燕. β -葡聚糖在啤酒酿造过程中的变化及其影响[J].啤酒科技,2004,12:44-45.
- [23] SALEK RN, LORENCOVÁ E, GÁL R, et al. Physicochemical and sensory properties of Czech lager beers with increasing original wort extract values during cold

- storage [J]. Foods, 2022, 11(21): 3389.
- [24] PIECZONKA S A, HEMMLER D, MORITZ O F, et al. Hidden in its color: A molecular-level analysis of the beer's Maillard reaction network [J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130112.
- [25] DUCRUET J, RÉBÉNAQUE P, DISERENS S, et al. Amber ale beer enriched with goji berries-The effect on bioactive compound content and sensorial properties [J]. Food Chemistry, 2017, 226: 109-118.
- [26] CECCARONI D, SILEONI V, MARCONI O, et al. Specialty rice malt optimization and improvement of rice malt beer aspect and aroma [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2019, 99: 299-305.
- [27] 李小凤,赵培静,谢万勇,等.黑啤生产工艺研究[J].广东化工,2019,46(10):46-47,70.
- [28] GASINSKI A, KAWA-RYGIELSKA J, SZUMNY A, et al. Assessment of volatiles and polyphenol content, physico-chemical parameters and antioxidant activity in beers with dotted hawthorn (*Crataegus punctata*) [J]. Foods, 2020, 9(6): 775.
- [29] QUIFER-RADAP, VALLVERDÚ-QUERALTA, MARTÍNEZ-HUÉLAMO M, et al. A comprehensive characterisation of beer polyphenols by high resolution mass spectrometry (LC-ESI-LTQ-Orbitrap-MS) [J]. Food Chemistry, 2015, 169: 336-343.
- [30] 曹荣锬.啤酒辅料对啤酒泡沫的影响[D].无锡:江南大学, 2018.
- [31] 田金凤,王金晶,郑飞云,等.啤酒主要组分在泡沫中的富集及其对泡持性的影响[J].食品与发酵工业,2017,43(9): 22-27.
- [32] FILIPOWSKA W, JASKULA-GOIRIS B, DITRYCH M, et al. Determination of optimal sample preparation for aldehyde extraction from pale malts and their quantification via headspace solid-phase microextraction followed by gas chromatography and mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2020, 1612: 460647.