DOI:10.12441/spyswjs.20250218001 [文章编号] 1673-1689(2025)04-0124-11

青稞发芽对啤酒酿造特性和风味的影响

张永欣[1,2,3] 刘月琴[4] 李丁丁[1,2,3] 钟俊辉[4] 贺立东[4] 王 涛[4] 吴殿辉[1,2,3] 陆 健[1,2,3*]

(1. 江南大学工业生物技术教育部重点实验室,江苏 无锡 214122; 2. 江南大学粮食发酵与食品生物制造国家工程研究中心,江苏 无锡 214122; 3. 江南大学生物工程学院,江苏 无锡 214122; 4. 华润雪花啤酒(中国)有限公司 北京 100005)

摘要:【目的】探究青稞发芽对啤酒酿造和风味的影响。【方法】使用3种不同品种的青稞和青稞麦芽作为啤酒辅料进行酿造,系统测定了其糖化麦汁的理化特性、啤酒发酵液理化参数、挥发性风味物质组成和香气感官特征。【结果】发芽处理使青稞麦汁的α-氨基氮水平增加了54.01%,β-葡聚糖和浊度分别降低了11.30%和39.92%;在发酵特性方面,'藏青20'青稞品种表现出显著优势,其啤酒发酵液具有更高的发酵度(76.8%)、乙醇质量分数(4.1%)和总酸体积分数(2.4 mL/dL)。同一品种的青稞,发芽后制备的啤酒发酵液中挥发性物质质量浓度更高。在青稞啤酒中共检测出73种挥发性物质,并筛选出20种香气活性值(odor activity value, OAV)>1的关键风味化合物。其中,正己醇、乙酸苯乙酯、苯乙醇、乙酸乙酯、异戊醇、芳樟醇和辛酸乙酯可作为区分未发芽青稞啤酒和青稞麦芽啤酒的香气成分标记物。此外,通过偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)模型进一步明确了20种关键风味物质对不同的香气感官具有重要贡献,尤其是乙酯类物质与果香味、花香味、酸味、麦芽味和青草味等感官特性相关性较好。【结论】与未发芽青稞啤酒相比,青稞麦芽更适合作为啤酒辅料,其酿造出的啤酒综合指标更好。该研究有助于进一步完善青稞啤酒发酵工艺,为青稞啤酒产品的开发和品质提升提供理论支撑。

关键词:青稞发芽;啤酒;气相色谱-质谱联用;挥发性成分;香气感官;偏最小二乘回归

Effects of Malted Highland Barley on Beer Brewing Characteristics and Flavor

ZHANG Yongxin[1,2,3] *LIU Yueqin*[4] *LI Dingding*[1,2,3] *ZHONG Junhui*[4] *HE Lidong*[4] *WANG Tao*[4] *WU Dianhui*[1,2,3] *LU Jian*[1,2,3*]

(1. Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. National Engineering Research Center of Cereal Fermentation and Food Biomanufacturing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 4. China Resources Snow Breweries Co., Ltd., Beijing 100005, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to investigate the impacts of malted highland barley on beer brewing and flavor. [**Method**] Three distinct cultivars of highland barley and malted highland barley were used as adjuncts in beer production. The physicochemical properties of the saccharified wort, fermentation parameters of beer, volatile flavor compound composition, and aroma sensory characteristics were systematically analyzed. [**Result**] The malting process increased the α-amino nitrogen content in highland barley wort by 54.01%, while reducing the β-glucan content and turbidity by 11.30% and 39.92%, respectively. Regarding fermentation characteristics, the highland barley cultivar 'Zangqing 20' exhibited superior performance, with the fermented beer showing higher degree of fermentation (76.8%), ethanol mass fraction (4.1%), and total acid volume fraction (2.4 mL/dL). The beer

基金项目:高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(111-206)。

通信作者:陆健(1968—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事酿酒科学与生物技术研究。E-mail: jlu@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2025-02-18 **修回日期:**2025-03-21

produced from malted highland barley contained higher mass concentrations of volatile compounds than that from unmalted grains. A total of 73 volatile compounds were identified in the highland barley beer, with 20 key flavor compounds exhibiting odor activity values (OAV) >1. Notably, *n*-hexanol, phenethyl acetate, phenylethyl alcohol, ethyl acetate, isoamyl alcohol, linalool, and ethyl caprylate were identified as potential aroma markers for distinguishing between the beer produced from malted and unmalted highland barley. Furthermore, partial least squares regression analysis elucidated the significant contributions of these 20 key flavor compounds to various sensory attributes, particularly highlighting the strong correlations of esters with fruity, floral, sour, malty, and grassy aromas. [**Conclusion**] In summary, malted highland barley is more suitable as a beer adjunct than unmalted highland barley, and the beer produced with malted highland barley exhibits superior overall quality. These findings provide valuable insights into the fermentation technology of highland barley beer and offer theoretical support for the development and quality enhancement of highland barley beer products.

Keywords: malted highland barley; beer; gas chromatography-mass spectrometry; volatile compounds; aroma attributes; partial least squares regression

青稞是中国青藏高原地区常见的一年生草本植物，也是当地人民的主食和重要经济作物[1]。青稞具有许多独特的生物化学成分，例如高含量的*β*-葡聚糖和膳食纤维[2]。此外，青稞含有丰富的营养功能成分，包括蛋白质、阿拉伯木聚糖、维生素和多酚类物质，这些物质也使青稞具备了一定的抗氧化、抗癌和抗菌特性[3-4]，将其添加到啤酒中会带来更高的抗氧化能力和更好的香气感受。

青稞啤酒作为一种以全谷物为特色的啤酒，近年来受到啤酒酿造行业的广泛关注，尤其是在中国西藏、青海等青稞主产区及其他青稞种植地区[1]。随着特色啤酒和健康饮品市场的持续扩展，青稞啤酒的市场份额也呈现逐步增长的趋势[5]。当前，青稞啤酒的研究重点主要集中在利用青稞麦芽部分替代传统大麦芽，以开发兼具独特风味特征和营养价值的新型啤酒产品。陈祖乙等[6]发现使用青稞酿造出来的青稞啤酒酒体丰满，香气浓郁，富含*β*-葡聚糖、*γ*-氨基丁酸和总黄酮等生物活性物质。Zong等[7]研究表明，与未添加青稞的啤酒相比，青稞的加入使啤酒的还原力增加了8.22%，高级醇（68.29 mg/L）和酯类（76.71 mg/L）质量浓度分别增加了7.80%和20.38%，这为青稞的潜在开发利用提供了重要参考。此外，谷物在发芽过程中可以诱导多种酶来提高其食用价值，从而促进大分子物质分解和生物活性的增加[8]。目前，对于青稞啤酒的研究更多集中在对营养物质（如*β*-葡聚糖和酚类物质）的研究上，在青稞发芽对啤酒风味的影响方面仍很少。此外，今后的研究应更加关注建立具有先进设备的青稞全过程加工工厂，完善工艺流程，优化青稞啤酒的糖化、发酵、澄清、灭菌和包装运输等技术参数，稳定生产品质，从而为市场提供更多优质青稞啤酒。

将不同品种的未发芽与发芽青稞应用于啤酒酿造，采用顶空固相微萃取的方法测定青稞啤酒样品中的挥发性物质分布，结合OAV分析和OPLS-DA，确定出对青稞啤酒具有重要贡献的风味物质并进行香气差异分析。结合以香气活性化合物和香气感官属性为双因变量的PLSR模型，进一步分析得出香气活性化合物与香气感官属性的相关性。该研究旨在为我国青稞啤酒的品质监控和风味机制研究提供试验数据和理论基础，弥补不同品种未发芽青稞和青稞麦芽在啤酒酿造中风味研究的缺失。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

麦特卡夫麦芽：江苏省农垦麦芽有限公司；‘昆仑14’青稞：粤海永顺泰（广州）麦芽有限公司；‘藏青2000’青稞：华润雪花啤酒（中国）有限公司；‘藏青20’青稞：西藏堆龙市当地藏民种植；卡斯卡特苦花：美国雅基玛联合酒花有限公司；马格鲁门香花：北京理博兆禾酒花有限公司；Lager酿酒酵母S189：Fermentis公司（酒花、酵母于0 ℃冰箱冷藏）；*β*-葡聚糖、葡萄糖、刚果红、NaCl、NaOH、NaH_2PO_4、Na_2HPO_4、乙酸、乙醇、异戊醇、苯乙醇、乙酸乙酯、4-乙烯基愈疮木酚、乙醛、C7~C30标准品（纯度99%）：上海国药集团化学试剂有限公司；

2-辛醇：美国 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

低温生化培养箱：SHP-2500 型，上海精密实验设备有限公司；恒温恒湿培养箱：KCL-2000 型，岛津（上海）实验器材有限公司；气相色谱-质谱联用仪（GC-MS）：TSQ8000 型，美国赛默飞世尔科技公司；自动糖化仪：YQ-PJ-6B 型，轻工业部西安轻机所光电公司。

1.3 试验方法

1.3.1 青稞麦芽的制备

称取 200 g 去除杂质后的青稞，清水洗净，加入一定水使其能够完全浸润青稞，采用间歇浸麦法（水中浸泡 4 h，空气中静置 14 h，水中浸泡 5 h，空气中静置 2 h，共 25 h），使青稞水分体积分数达到 45%。将青稞放入自制不锈钢制麦槽中，萌发 96 h，使青稞麦芽长至麦粒长度的 2/3～3/4 的占比为 75% 以上。在发芽阶段，每 12 h 翻麦一次，每 24 h 补水 20 mL，以上均在恒温恒湿培养箱中进行（14 ℃、相对湿度 95%）。将绿色青稞麦芽颗粒进行干燥：45 ℃干燥 4 h，55 ℃干燥 4 h，65 ℃干燥 14 h，75 ℃干燥 2 h，85 ℃干燥 2h。趁热去除麦芽根部，制麦结束。

1.3.2 青稞啤酒的酿造

称取粉碎的大麦 60 g 和青稞 40 g，以 1∶3.5 的固液比加入糖化罐中糖化，程序如下：48 ℃ 10 min，63 ℃ 60 min，72 ℃ 10 min，78 ℃下碘试不变色后，趁热用滤纸过滤获得麦汁。麦汁煮沸 60 min，投入 0.4 g/L 的苦花和 0.2 g/L 的香花，将麦芽汁的定型麦汁浓度调节至 10 °P，过滤冷却。加入已活化的 Lager 酵母（S189），酵母接种量为 1×10^7 CFU/mL，发酵温度保持在（12±1）°C。监测发酵系统的质量损失，每 12 h 称一次质量，直到日失重降至 0.2 g 以下，随后在 4 ℃冰箱后贮存 7 d，发酵完成。

发酵液分为 6 组。F1：添加‘昆仑 14’青稞的啤酒；M1：添加‘昆仑 14’青稞麦芽的啤酒；F2：添加‘藏青 2000’青稞的啤酒；M2：添加‘藏青 2000’青稞麦芽的啤酒；F3：添加‘藏青 20’青稞的啤酒；M3：添加‘藏青 20’青稞麦芽的啤酒。

1.3.3 麦汁和啤酒基本理化性质测定

麦汁的还原糖、α-氨基氮、β-葡聚糖和浊度等基本理化指标参照 QB/T 1686—2008《啤酒麦芽》中的相关方法测定。

将啤酒样品过滤，超声 5 min 除气备用，啤酒乙醇质量分数、真正浓度（质量分数%）、发酵度、总酸和浊度等基本指标参照 GB/T 4928—2008《啤酒分析方法》中的相关方法测定。

1.3.4 啤酒挥发性物质检测

采用顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱（headspace solid phase micro-extraction gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）对啤酒样品的挥发性化合物进行分析[9]。通过与 NIST 质谱库中的标准光谱和文献报道的 Kovats 保留指数（RI）比较，对化合物进行定性。挥发性化合物的定量计算采用内标法，见式（1）。

$$C_1 = A_1 \times C_2 / A_2 \quad (1)$$

式中：

C_1——待测风味物质的质量浓度，μg/L；

C_2——2-辛醇的质量浓度，μg/L；

A_1——待测物质的峰面积；

A_2——2-辛醇的峰面积。

根据青稞啤酒中风味物质的质量浓度和各化合物在水或体积分数 3.5% 乙醇溶液中的嗅觉阈值计算 OAV[10]，见式（2）。

$$O_1 = C_3 / T_1 \quad (2)$$

式中：

O_1——各风味物质的 OAV；

C_3——风味物质的质量浓度，μg/L；

T_1——风味物质的气味阈值，μg/L。

1.3.5 香气感官评价

感官评价由来自江南大学粮食发酵与食品生物制造国家工程研究中心的 5 名男性和 5 名女性（年龄 20~32 岁）进行，采用 9 分制定量描述性分析法评价青稞啤酒样品香气的差异[11]，小组成员根据 GB/T 16291.1—2012 和 ISO 5496 AMD1—2018 均进行了至少 15 h 的培训。制备了 7 种明显高于阈值水平的有气味的标准溶液，建立了青稞啤酒感官描述词汇和评分量表，7 种香气属性的标准品溶液包括乙酸（20.00 mg/L，酸味）、乙醇（100.00 mg/L，乙醇味）、异戊醇（0.05 mg/L，麦芽味）、苯乙醇（1.00 mg/L，花香味）、乙酸乙酯（0.10 mg/L，果香味）、4-乙烯基愈疮木酚（0.01 mg/L，木香味）和乙醛（1.00 mg/L，草香味）。将 20 mL 样品置于覆盖有塑料培养皿的杯子（100 mL）中，并在评价前随机标记 3 位数

字。每个样品选3份进行评价。

1.4 数据分析

结果用3个独立试验的平均值±标准差表示，数据的显著性差异采用IBM SPSS统计软件的最小显著性差异（LSD）检验进行分析，$P<0.05$表示有显著差异。使用Origin软件绘图，并进行OPLS-DA、VIP和PLSR分析。

2 结果与讨论

2.1 青稞麦芽对定型麦汁的影响

选取3个品种的青稞和青稞麦芽应用于啤酒酿造，其10 °P定型麦汁常规理化指标的测定结果见表1。麦汁中的还原糖是酵母发酵的主要碳源，本研究中的还原糖质量浓度无显著差异，这表明青稞品种以及发芽与否对麦汁还原糖水平无显著影响。相较于未发芽青稞麦汁，青稞麦芽麦汁的α-氨基氮处于较高水平，在‘昆仑14’、‘藏青2000’和‘藏青20’等3个品种麦芽麦汁中分别增加了61.69%、46.16%、54.19%，其中‘藏青20’青稞麦芽麦汁质量浓度最高（285.2 mg/L），这表明‘藏青20’青稞是3个品种中更能够提高发酵效率和啤酒品质的优质青稞辅料。谷类植物胚乳细胞壁中的葡聚糖由于发芽过程中β-葡聚糖酶的激活分解[8]，导致β-葡聚糖在发芽青稞麦汁中的质量浓度较低，降低了麦汁黏度和麦糟过滤的困难，其在‘藏青20’青稞中由253.9 mg/L降至218.5 mg/L。未发芽青稞的麦汁浊度（‘昆仑14’青稞：9.54 EBC；‘藏青2000’青稞：8.73 EBC；‘藏青20’青稞：8.72 EBC）处于较高水平，这可能与高β-葡聚糖质量浓度有密不可分的关系。一些酶（淀粉酶、β-葡聚糖酶、植酸酶和蛋白酶等）在整个萌发过程中产生或激活，使一些主要成分（如蛋白质和淀粉）降解，刺激生化活性，这也导致了一些新的次要成分的合成，如氨基酸、低聚糖、维生素和膳食纤维等[8]。

表1 不同原料制备的10 °P定型麦汁理化指标

Table 1 Physicochemical properties of 10 °P wort from different raw materials

样品	还原糖质量浓度/（g/L）	α-氨基氮质量浓度/（mg/L）	β-葡聚糖质量浓度/（mg/L）	浊度/EBC
‘昆仑14’青稞麦汁	6.8±0.2^{a}	146.3±0.9^{f}	247.2±9.0^{ab}	9.54±0.02^{a}
‘昆仑14’青稞麦芽麦汁	6.8±0.1^{a}	236.5±2.1^{c}	221.9±12.7^{ab}	7.43±0.03^{c}
‘藏青2000’青稞麦汁	6.8±0.1^{a}	174.7±0.5^{e}	247.2±11.5^{ab}	8.73±0.02^{b}
‘藏青2000’青稞麦芽麦汁	6.7±0.2^{a}	255.3±1.7^{b}	237.9±8.6^{ab}	4.68±0.01^{d}
‘藏青20’青稞麦汁	6.8±0.3^{a}	185.0±0.5^{d}	253.9±2.5^{a}	8.72±0.01^{b}
‘藏青20’青稞麦芽麦汁	6.7±0.1^{a}	285.2±1.0^{a}	218.5±5.9^{b}	4.25±0.01^{e}

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

2.2 青稞麦芽对啤酒理化指标的影响

表2为不同青稞品种未发芽与发芽后酿造啤酒的基本理化指标。结果表明，青稞麦芽啤酒的乙醇质量分数高于未发芽青稞啤酒，‘昆仑14’、‘藏青2000’和‘藏青20’青稞分别增加了2.56%、5.26%和5.13%，这表明谷物发芽更有利于酵母将麦汁中的可发酵性糖通过糖酵解、丙酮酸脱羧和乙醛还原等途径转化为乙醇和二氧化碳。相应地，青稞麦芽啤酒的真正浓度低于未发芽青稞啤酒。此外，在3个青稞品种中，‘藏青20’青稞麦芽啤酒的乙醇质量分数（4.1%）和发酵度（76.8%）显著高于其他2个麦芽品种，表明其具有更高的原料利用率，这可能是由于青稞的产地、生长条件、气候等因素的不同，导致其营养物质的组成出现差异[12]。麦汁中的α-氨基氮可改变酵母的生理活性，影响发酵效率。这可能是相同麦汁浓度导致啤酒中乙醇质量分数有显著差异的主要原因。啤酒发酵度的高低不仅取决于糖化工艺、麦芽质量、酵母的种类[4]，还与β-葡聚糖的分布有关，这可能是未发芽青稞啤酒发酵度较低的原因之一。虽然少量的β-葡聚糖可被酵母降解，但是大部分β-葡聚糖会降低淀粉的消解程度，增加麦汁黏度，阻碍过滤和限制酵母代谢[13]，因此，选择合适的方法有效控制β-葡聚糖的负面影响来提高发酵度应当引起重视。与未发芽青稞啤酒相比，青稞麦芽啤酒具有更高体积分数的总酸，平均提高了22.02%；青

表2 青稞啤酒的理化指标分析

Table 2 Physicochemical properties analysis of highland barley beer

样品	乙醇质量分数/%	青稞啤酒质量分数/%	真正浓度(质量分数)/%	总酸体积分数/%	浊度/EBC
F1	3.9±0.1^{c}	3.2±0.1^{b}	71.2±0.3^{bc}	2.4±0.1^{c}	4.66±0.02^{b}
M1	4.0±0.1^{b}	2.9±0.0^{c}	74.1±0.2^{ab}	2.8±0.0^{a}	4.54±0.01^{c}
F2	3.8±0.0^{c}	3.5±0.1^{a}	69.5±0.3^{c}	2.4±0.0^{c}	4.63±0.01^{b}
M2	4.0±0.1^{b}	3.3±0.0^{b}	71.4±0.1^{bc}	2.6±0.0^{b}	4.58±0.02^{c}
F3	3.9±0.1^{c}	2.9±0.0^{c}	75.1±1.7^{a}	2.0±0.1^{d}	4.92±0.01^{a}
M3	4.1±0.2^{a}	2.6±0.1^{d}	76.8±1.3^{a}	2.4±0.1^{c}	4.68±0.02^{b}

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

稞麦芽啤酒同时具有更低的浊度,平均降低了2.85%,这能为啤酒带来更愉悦的爽口感和更好的视觉感受。

2.3 青稞啤酒风味化合物初步分析

啤酒中的香气物质主要包括醇类、有机酸类、醛类、酯类、酮类、萜烯类和酚类等,构成了啤酒的麦芽香气、酒花香气和花果香类等主要风味特征。作者采用GC-MS对青稞啤酒样品的挥发性香气物质进行分析,结果见图1。在青稞啤酒中,总共鉴定出73种挥发性物质,其中包括36种酯类、11种醇类、7种萜烯类、6种酸类物质以及13种其他类物质。在所有的青稞啤酒样品中,挥发性物质质量浓度最高的3个样品为啤酒M3、M2和F3,挥发性物质质量浓度依次为13 547.36、12 805.52、9 314.78 μg/L。无论是物质种类还是质量浓度,醇类和酯类物质都是占比最高的。醇类物质在青稞啤酒中占比为36%~48%,酯类物质在青稞啤酒中占比为42%~54%,其余风味化合物占比为8%~14%。

醇类物质主要由苯乙醇、异戊醇、异丁醇等高级醇类物质组成,一般具有草药等植物类香气,其在F3啤酒中占比最高(47.78%),其次是F1啤酒(47.71%)。醇类物质在M3样品中总量最高,为5 111.37 μg/L,其余质量浓度高低依次为M2(4 714.10 μg/L)、F3(4 477.73 μg/L)、M1(4 435.55 μg/L)、F2(4 183.14 μg/L)、F1(3 542.57 μg/L),这表明相对于青稞麦芽啤酒,使用同品种未发芽青稞酿造啤酒的醇类物质质量浓度更高。高级醇是酵母通过Ehrlich途径将氨基酸转化而来,同时也是酸类、酯类物质形成的前体物质;若高级醇的质量浓度过高,会增加啤酒饮后冲辣刺激的感觉,略有苦感,易“上头”,对人机体也会产生一定的毒害作用[14]。

啤酒的花果香气特征主要是由酯类物质带来的,尤其是乙酯类和乙酸酯类物质。在青稞啤酒中检测中发现,3-苯丙酸乙酯、乙基9-癸烯酸酯、乙酸苯乙酯、乙酸乙酯、癸酸乙酯和乙酸异戊酯等24种酯类化合物是所有青稞啤酒共有的,且在青稞麦芽啤酒中的质量浓度普遍较高,因此青稞麦芽啤酒会表现出更强的香气,这与香气感官评价的结果一致。其中辛酸乙酯在青稞麦芽啤酒酯类中的质量浓度占比最大,尤其在M3啤酒中质量浓度(2 974.54 μg/L)最高。有研究表明,辛酸乙酯在较低的质量浓度下具有清凉的水果香气,类似于白兰地酒香[15]。辛酸乙酯主要由酵母在主发酵期间代谢产生,麦汁浓度和酵母接种体积分数对辛酸乙酯代谢水平影响较大[16],这也表明青稞的发芽更有利于酵母的生长代谢。乙酸苯乙酯和乙酸异戊酯的质量浓度在啤酒酯类物质中仅低于辛酸乙酯,对酒体香气的平衡协调同样起到重要作用。

挥发性脂肪酸是维持发酵酒香气平衡、增加香气复杂性的重要挥发性物质。当挥发性脂肪酸质量浓度低于20 mg/L时,会增加啤酒中的奶酪和黄油香味。在青稞啤酒中,主要有辛酸(平均值为806.95 μg/L)和正癸酸(平均值为63.60 μg/L)在酸类物质中占主导地位。辛酸是脂肪酸代谢中的主要代谢物质,天然存在于一些辣椒类食物中。天然合成辛酸常在食品中用作调味剂、增味剂和防腐剂[17],它在‘藏青2000’青稞啤酒中质量浓度较高(F2:766.49 μg/L;M2:1 202.35 μg/L),其酯类衍生物(辛酸乙酯、辛酸异戊脂等)为啤酒带来了更多柔和的水果香气;癸酸作为一种十碳饱和脂肪酸,酯化程度高,使酒体更加丰富饱满、香气协调,

且具有一定的抗菌作用，其在青稞麦芽啤酒中的质量浓度（48.35~177.08 μg/L）普遍高于未发芽青稞啤酒（23.46~41.74 μg/L）。

在所有样品中，萜烯类和醛酮类物质质量浓度低，占比较小。萜烯类物质广泛存在于植物体内，主要以游离和糖基化的形式存在于啤酒中，具有重要的生理活性[18]；在青稞啤酒中共检测到7种萜烯类物质，其中香茅醇和芳樟醇质量浓度相对较高，呈现出较多的花香和木香；*T*-杜松醇、反式-橙花叔醇和*α*-毕橙茄等物质仅在青稞麦芽啤酒中被检测到。醇、醛、酮类物质在青稞麦芽啤酒中的质量浓度较高，醛类物质增加了30.56%，酮类物质增加了28.81%，这可能是由于在麦芽烘焙过程中更利于一系列美拉德反应中间产物（如还原酮醛类）的生成[19]。酚类物质通常具有一定的抗氧化活性能力，在啤酒延缓老化方面起着积极作用；2,4-二叔丁基酚和2,4-二异丙基苯酚仅在青稞麦芽啤酒中被检测到，其中2,4-二叔丁基酚在M1啤酒中质量浓度（30.74 μg/L）最高，一般存在于啤酒花中，能够促进酒花生长和光合作用[20]，在啤酒中表现出独特的芳香。

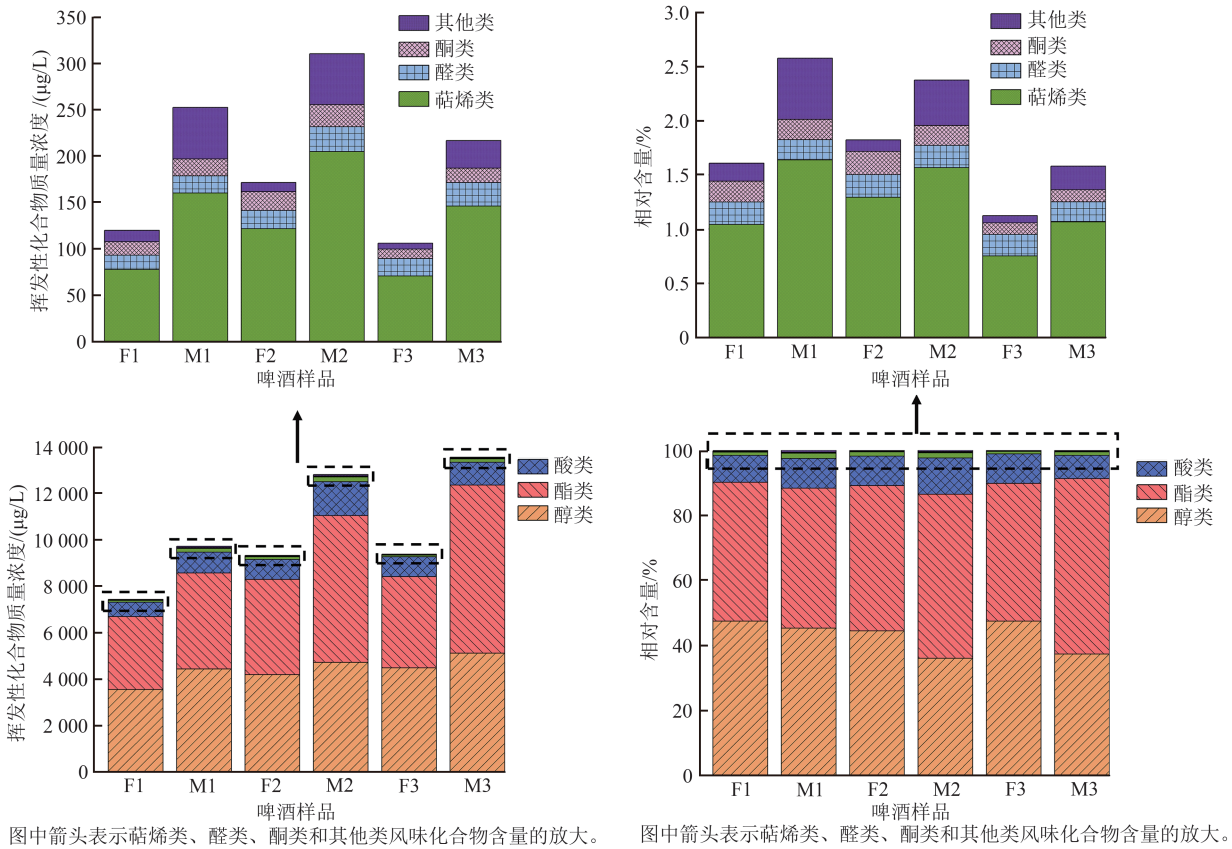


图1　青稞啤酒的挥发性物质质量浓度和相对含量

Fig. 1　Mass concentrations and relative content of volatile compounds of highland barley beer

2.4　青稞发芽对啤酒关键风味物质的影响

阈值定义为人类感知到香气时香料物质的最小浓度，不同挥发性物质在啤酒中的阈值存在较大差异[21]。由于不同的人对同种挥发性化合物感知的强弱程度不同，所以不能简单地通过它们的浓度高低来确定其对啤酒完整香气轮廓的贡献。因此，采用OAV计算挥发性组分对整体香气的影响。

显著影响青稞啤酒整体香气的20种挥发性化合物（OAV>1）如表3和图2所示。青稞啤酒中OAV>1的挥发性风味物质大部分为酯类物质（12种），包括3-甲基丁酸乙酯（果香、苹果味）、丙酸乙酯（菠萝味、朗姆酒味）、丁酸乙酯（甜果香）、庚酸乙酯（浆果香、脂肪味）、癸酸甲酯（蜡香、柑橘

表 3　青稞啤酒关键风味组分 OAV（>1）

Table 3　OAV（OAV>1）of key flavor compounds of highland barley beer

组分	阈值[23]/（μg/L）	香气描述	OAV					
			F1	M1	F2	M2	F3	M3
苯乙醇	560	玫瑰香、果香	1.74	2.01	1.97	2.35	2.77	1.64
异戊醇	4	苹果味、白兰地香	546.95	687.03	647.56	749.06	637.75	952.59
正己醇	5.6	树脂香、玫瑰香	0.93	0.51	1.24	0.85	0.74	1.01
正庚醇	5.4	清淡油脂味、酒香	—	—	—	1.46	—	—
3-甲基丁酸乙酯	3	果香、苹果味	0.71	0.67	0.67	2.80	0.93	2.90
丙酸乙酯	10	菠萝味、朗姆酒味	0.72	0.56	0.56	6.16	0.62	8.67
丁酸乙酯	0.9	葡萄香	49.61	36.63	34.78	51.81	37.10	76.14
庚酸乙酯	1.9	浆果香、脂肪味	5.05	3.94	4.93	6.48	2.80	4.62
癸酸甲酯	4.3	蜡香、柑橘香	1.09	1.97	2.59	6.08	1.80	3.98
癸酸乙酯	5	坚果香、白兰地香气	34.81	58.08	70.48	226.33	55.73	148.67
辛酸甲酯	200	果香、柑橘香	0.54	1.20	1.79	2.44	2.39	2.61
辛酸乙酯	19.3	水果味、脂肪味	66.32	91.98	88.63	126.02	91.98	154.12
乙酸苯乙酯	249.59	玫瑰香、蜂蜜甜香	0.44	0.60	0.46	0.84	0.40	1.12
乙酸乙酯	5	苹果味、甜香	50.73	58.43	54.46	66.41	46.49	92.74
乙酸异戊酯	30	香蕉味	11.66	13.36	9.54	16.01	8.17	27.75
正己酸乙酯	5	菠萝味	82.38	60.91	62.10	80.49	44.78	88.66
芳樟醇	0.22	甜花香、木香	83.82	103.82	54.00	155.55	21.77	40.45
香茅醇	6.6	花香、柠檬皮香	5.53	9.32	11.19	17.38	9.32	15.89
壬醛	1.1	青草味、蜡香	7.46	4.76	8.64	10.76	7.10	8.75
2,3-丁二酮	0.059	奶香味、脂肪味	33.90	37.46	54.24	45.25	55.93	47.12

注：—代表未检测到；香气特征来源于网站 https://www. femaflavor. org/flavor-library。

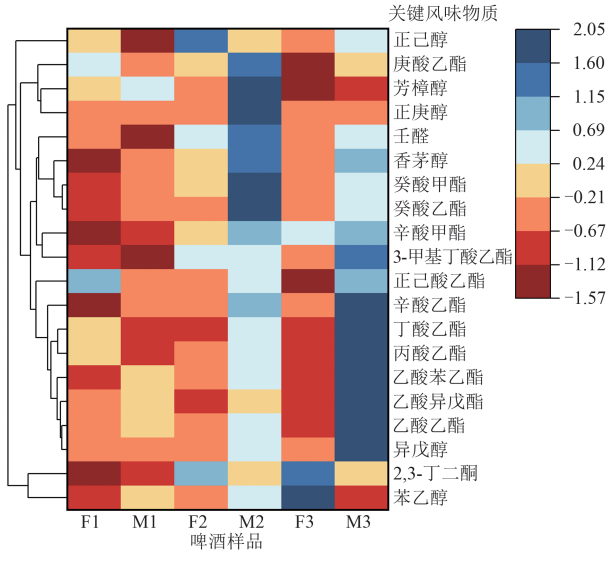


图 2　青稞啤酒关键挥发性物质热图

Fig. 2　Heatmap of key volatile compounds in highland barley beer

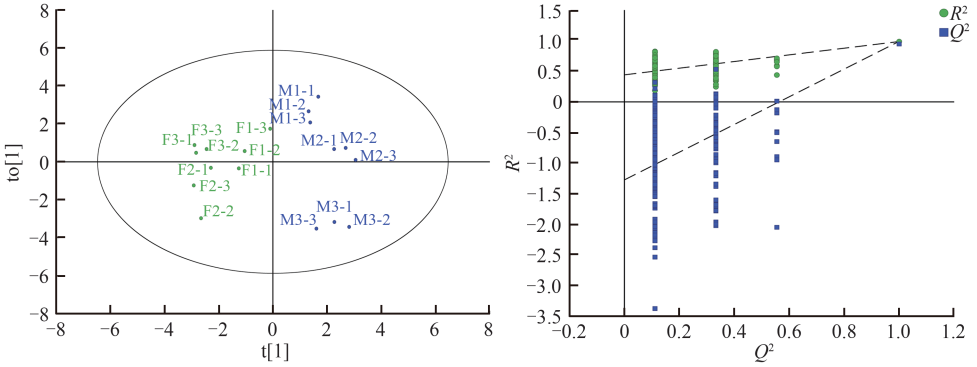
香）、癸酸乙酯（坚果香、白兰地香气）、辛酸甲酯（果香、柑橘香）、辛酸乙酯（水果味、脂肪味）、乙酸苯乙酯（玫瑰香、蜂蜜甜香）、乙酸乙酯（苹果味、甜香）、乙酸异戊酯（香蕉味）和正己酸乙酯（菠萝味），这些组分均为青稞啤酒的关键风味物质，对啤酒的总体风味贡献较大，由此推测酯类物质是青稞啤酒风味模型的主要轮廓物质。在 6 种青稞啤酒中也有醇类、萜烯类和醛酮类等关键香气活性化合物。醛酮类物质大多呈现出草木香，由于阈值较低，因此较低的质量浓度也能影响啤酒体系的香气[22]。

在啤酒组分的香气贡献中，10<OAV≤100 的组分通常被认为具有重大香气贡献，OAV>100 是能够改变啤酒的整体模型香气的组分。在 6 种添加不同辅料的青稞啤酒中，丁酸乙酯、癸酸甲酯、癸酸乙酯、辛酸乙酯、乙酸乙酯、乙酸异戊酯、正己酸乙

酯、芳樟醇和2,3-丁二酮等11种物质的OAV>10。在不同种类的青稞啤酒中，青稞的发芽能够显著提高啤酒中苯乙醇、异戊醇、芳樟醇、癸酸甲酯、癸酸乙酯、辛酸甲酯、辛酸乙酯、乙酸苯乙酯、乙酸乙酯、乙酸异戊酯、正己酸乙酯、芳樟醇和香茅醇的质量浓度，其中芳樟醇和辛酸乙酯的平均OAV最高。芳樟醇在M2啤酒中的OAV最高（155.55），同时辛酸乙酯在M3啤酒中的OAV最高（154.12），这也表明不同品种的青稞麦芽在香气组成上有很大的差别。异戊醇的合成代谢主要分为3个部分：乙醇代谢、乙酸代谢和乙酯代谢[14]，能够促进整体酿酒过程的发酵，其在青稞啤酒中由于高质量浓度和低阈值，风味贡献最为突出。不同啤酒样品中异戊醇香气贡献差异明显，在青稞麦芽啤酒中的平均OAV为796.23高于未发芽青稞啤酒（平均OAV为610.75），这表明异戊醇对青稞麦芽啤酒的整体香气贡献更大。壬醛和2,3-丁二酮的OAV在6种样品中的整体差异较小，因此推测它们不是青稞发芽造成啤酒香气差异的重要因素。这些研究结果为青稞啤酒的香气品质提高提供了参考。

2.5　青稞啤酒的OPLS-DA及VIP分析

为最大程度区分发芽对青稞啤酒发酵的挥发性物质差异，对上述青稞啤酒中20种OAV>1的关键挥发性风味物质进行OPLS-DA分析，探究不同辅料啤酒的差异风味组分。如图3所示，OPLS-DA模型可以实现未发芽青稞啤酒与青稞麦芽啤酒样品分离，且拟合模型预测成分的累计统计量R^2X=0.932、模型解释率参数R^2Y=0.982、预测能力参数Q^2=0.944，均大于0.500，表示OPLS-DA模型对2类青稞啤酒风味分析的预测能力和稳健能力较好。通过200次响应的排列置换检验，Q^2回归线与纵轴的相交点小于0，并且验证模拟的截距分别为R^2（0.451）和Q^2（−1.330），表明没有出现过拟合现象，该模型能被很好地解释。由OPLS-DA图可知，青稞发芽与否对酿造啤酒的关键挥发性香气成分的影响具有显著差异，青稞麦芽啤酒主要位于第二和第三象限，未发芽青稞啤酒主要位于第一和第四象限，且每组样品的重复点较密集，平行性较好。在青稞麦芽啤酒样品中，样品之间离散程度较大，这表明不同品种的青稞即使用相同的处理方式也存在明显区别。对于未发芽青稞样品，由于检测到的关键香气物质的质量浓度较为接近，所以分布更为集中。



(a) OPLS-DA得分图　　(b) 置换检验

图3　不同组啤酒OPLS-DA得分和200次置换检验结果

Fig. 3　OPLS-DA score (a) and 200 permutation test result (b) of different groups of beer

变量投影重要性（Variable importance in projection，VIP）是风味分析中用于评估某一变量在整体模型中重要性的指标，贡献率越高，VIP越大，一般选取VIP>1的物质作为筛选风味的差异标志物。如图4所示，在青稞啤酒中VIP>1的物质有7种，分别为乙酸苯乙酯（VIP为1.357）、正己醇（VIP为1.304）、苯乙醇（VIP为1.283）、乙酸乙酯（VIP为1.234）、异戊醇（VIP为1.201）、辛酸乙酯（VIP为1.160）和芳樟醇（VIP为1.029），这些物质可作为区分发芽与未发芽青稞啤酒样品的差异香气标记物。由于以上物质是基于OAV>1及VIP>1筛选获得，因此这些物质可作为2种类型青稞啤酒的差异组分代谢物，通过其质量浓度数值大小和香气特征来判定啤酒的差异，将其作为筛选青稞

啤酒发酵原料的风味指标，同时也是青稞啤酒的关键风味物质。

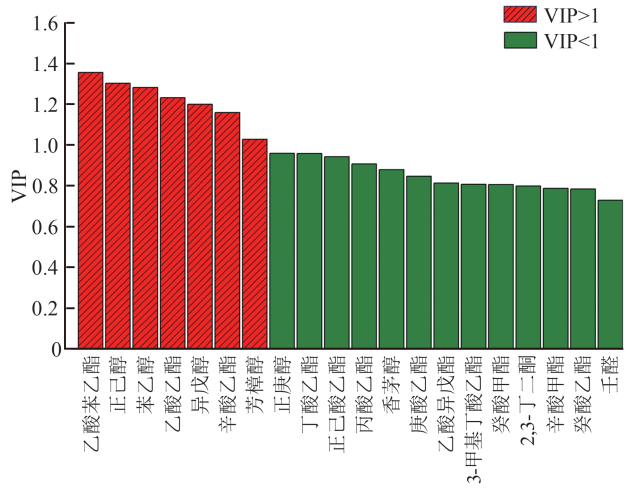


图 4　青稞啤酒关键风味物质的 VIP

Fig. 4　VIP of key flavor compounds of highland barley beer

2.6　青稞啤酒香气感官评价

使用 9 分制评分法，对青稞啤酒样品的 7 种香气属性（酸味、乙醇味、麦芽味、花香味、果香味、木香味和草香味）进行定量香气感官分析，将结果均值生成雷达图，见图 5。结果表明，不同样品在 7 种感官属性上差异显著。具体来说，青稞啤酒在麦芽味（30.6 分）、果香味（29.3 分）和花香味（29.1 分）上的香气总值高于其他属性，草木香气不明显。青稞啤酒 M3 和 M2 的总体得分较高，分别为 34.9 分和 34.8 分，啤酒 F1 得分最低（28.4 分）；青稞麦芽啤酒的感官总体得分略高于未发芽青稞啤酒，增加了 16.89%。值得注意的是，M3 样品在花香味和麦芽味属性上较为突出，F2 样品的乙醇味得分较高，这与啤酒中特征风味化合物的质量浓度和相对含量差异有关。

2.7　风味化合物与香气感官评价的相关性

采用 PLSR 研究了风味物质与香气感官特性之间的关系。通过对 20 种关键风味物质（x 变量）和 7 种香气感官属性（y 变量）（酸味、乙醇味、麦芽味、花香味、果香味、木香味和草香味）的 PLSR 分析获得双因子模型，见图 6。大椭圆和小椭圆分别代表解释方差的 50% 和 100%[24]。有关 x 和 y 变量的大多数结果都位于 2 个椭圆内，说明它们之间的关系可被 PLSR 模型很好地解释。

样品 M2 和 M3 位于 x 轴的正半轴，它们和

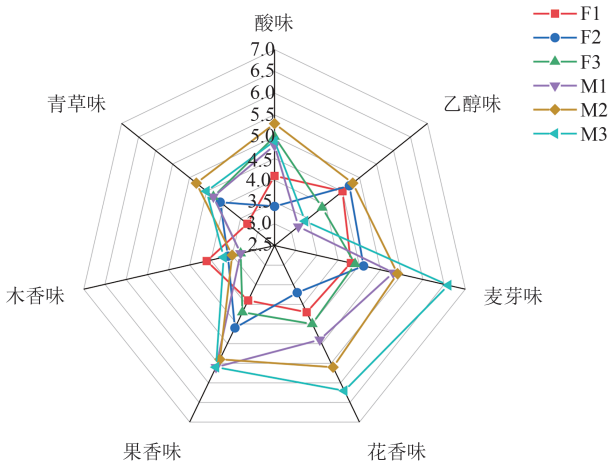


图 5　青稞啤酒的香气评价

Fig. 5　Aroma sensory evaluation of highland barely beer

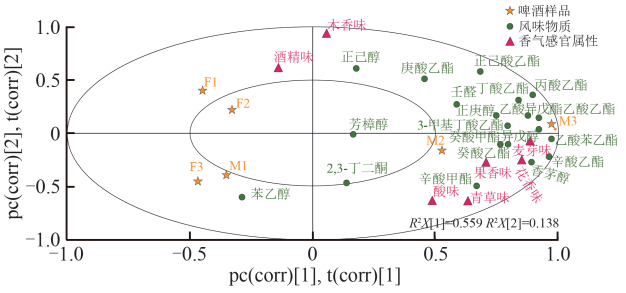


图 6　青稞啤酒 20 种关键风味物质与 7 种香气感官属性的 PLSR 加载图

Fig. 6　PLSR loading plot between 20 key flavor compounds and 7 aroma attributes of highland barley beer

麦芽味、花香味、果香味、青草味和酸味等香气属性密切相关，处于附近区域，这与样品中萜烯类和乙酯类物质的质量浓度较高有很大关系。其中，香气感官得分最高的 M3 样品与丁酸乙酯、乙酸苯乙酯、丙酸乙酯、癸酸乙酯、辛酸乙酯、乙酸异戊酯、正己酸乙酯异戊醇、香茅醇和乙酸乙酯等多个香气物质有良好的对应关系，这些香气物质与花香味、果香味和麦芽味密切相关。未发芽青稞啤酒样品均位于 x 轴的负半轴，与苯乙醇有较好的对应关系。青稞麦芽啤酒样品 M2 和 M3 与大部分关键香气物质和 5 种香气属性均有较好的对应关系，但 M1 样品与其距离较远，这与 GC-MS 和感官评价结果相同，以上这些结果的差异主要源于酿造使用原料的不同。

香气属性分布相似的化合物对该香气具有正向贡献[25]，苯乙醇对乙醇味有正向贡献，辛酸甲酯

对青草味和酸味有正向贡献，正己醇对木香味有正向贡献，癸酸甲酯、辛酸甲酯、辛酸乙酯、香茅醇、癸酸乙酯、异戊醇和乙酸苯乙酯等对麦芽味、花香味和果香味有正向贡献。乙酯类物质是果酒、啤酒中重要的酯类化合物，在醇酰基转移酶乙醇作用下由脂酰辅酶A与乙醇合成，大多数香气特性（果香味、花香味、酸味、麦芽味和青草味）均位于附近区域，这表明乙酯类物质对青稞啤酒香气具有重要的贡献，能够增强啤酒的香气复杂性和丰富性。

3 结论

作者以不同品种的青稞样品（发芽/不发芽）为研究对象，通过对其麦汁理化指标、啤酒理化指标、挥发性化合物和香气属性的分析，发现发芽青稞能够显著增强啤酒的乙醇质量分数、发酵度和香气感官得分。在6组青稞啤酒中，共检测到72种风味物质、20种OAV>1的关键风味物质，其中酯类物质的质量浓度和种类占比最高。根据OPLS-DA和VIP分析，发现未发芽青稞啤酒和青稞麦芽啤酒的风味存在显著差异，其中正己醇、乙酸苯乙酯、苯乙醇、乙酸乙酯、异戊醇、芳樟醇和辛酸乙酯这7种差异性挥发性化合物可以作为区分2类青稞啤酒的标记物。综合以上结果，表明青稞的发芽对增强青稞啤酒的品质起到了积极作用，使啤酒中具有麦芽香和花果香的风味物质有所增加，并且综合分析后发现‘藏青20’青稞麦芽是本研究中啤酒酿造的最佳辅料。然而，目前关于不同青稞品种及其发芽过程中代谢产物变化对啤酒风味特征形成的影响机制尚未明晰，这是未来研究的重要方向。

参考文献

[1] GUO T L，HORVATH C，CHEN L，et al. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley（Qingke）：a review[J]. Trends in Food Science & Technology，2020，103：109-117.

[2] QIAN Y L，AN Y Q，CHEN S，et al. Characterization of Qingke liquor aroma from Tibet[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2019，67（50）：13870-13881.

[3] HONG Q Y，CHEN G J，WANG Z R，et al. Effects of different thermal processing methods on bioactive components，phenolic compounds，and antioxidant activities of Qingke（highland hull-less barley）[J]. Food Science and Human Wellness，2023，12（1）：119-129.

[4] CADENAS R，CABALLERO I，NIMUBONA D，et al. Brewing with starchy adjuncts：its influence on the sensory and nutritional properties of beer[J]. Foods，2021，10（8）：1726.

[5] ZHANG K Z，YANG J G，QIAO Z W，et al. Assessment of β-glucans，phenols，flavor and volatile profiles of hulless barley wine originating from highland areas of China[J]. Food Chemistry，2019，293：32-40.

[6] 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.
CHEN Z Y，AN M Z，LI L，et al. Optimization for brewing process of highland barley craft beer[J]. China Brewing，2022，41（4）：174-179.（in Chinese）

[7] ZONG X Y，WU J H，CHEN Z Y，et al. Impact of Qingke（hulless barley）application on antioxidant capacity and flavor compounds of beer[J]. Journal of Cereal Science，2023，109：103624.

[8] PAN R R，HASSANE H A，BIN X. Germination in improving the nutrition，health benefits and processing of highland barley[J]. International Journal of Food Science & Technology，2024，59（4）：2162-2171.

[9] YANG S J，LI K，LIU H，et al. Enhancing citric acid tolerance of *Acetobacter tropicalis* using chemical and physical mutagenesis and adaptive evolution to improve the quality of lemon fruit vinegar [J]. Journal of Food Science，2024，89（5）：2581-2596.

[10] YANG N，WU C，YANG H，et al. Bioactive compounds，antioxidant activities and flavor volatiles of lager beer produced by supplementing six jujube cultivars as adjuncts[J]. Food Bioscience，2022，50：102008.

[11] FAN S S，TANG K，XU Y，et al. Characterization of the potent odorants in Tibetan Qingke Jiu by sensory analysis，aroma extract dilution analysis，quantitative analysis and odor activity values[J]. Food Research International，2020，137：109349.

[12] 姜欣，江伟，谢三款，等. 青稞品种对青稞发酵酒营养与感官品质的影响[J]. 食品科学，2023，44（5）：38-44.
JIANG X，JIANG W，XIE S K，et al. Influence of highland barley varieties on the nutritional and sensory quality of highland barley wine[J]. Food Science，2023，44（5）：38-44.（in Chinese）

[13] LI Q，LIU J，ZHAI H S，et al. Extraction and characterization of waxy and normal barley β-glucans and their effects on waxy and normal barley starch pasting and degradation properties and mash filtration rate [J]. Carbohydrate Polymers，2023，302：120405.

[14] 褚继阳，夏天禹，吴殿辉，等. 大米精白度对酶法酿造米酒风味品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2024，43（9）：142-152.
CHU J Y，XIA T Y，WU D H，et al. Effect of rice polishing degree on flavor quality of enzymatically brewed rice wine[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43（9）：142-152.（in Chinese）

[15] BETTENHAUSEN H M，BARR L，BROECKLING C D，et al. Influence of malt source on beer chemistry，flavor，and flavor stability[J]. Food Research International，2018，113：487-504.

[16] MARTINS C，BRANDÃO T，ALMEIDA A，et al. Enlarging knowledge on lager beer volatile metabolites using multidimensional gas chromatography[J]. Foods，2020，9（9）：1276.

[17] WANG R F，ZHU Q Z，QIAO L N，et al. Characterization of the key aroma-active compounds in Qingke Baijiu by application of the sensory approach[J]. Journal of Food Composition and Analysis，2023，118：105196.

[18] 宋家麟. 啤酒酿造过程中萜烯类物质演化过程的研究[D]. 济南：齐鲁工业大学，2024.

[19] KAYADELEN F，AGIRMAN B，JOLLY N P，et al. The influence of *Torulaspora delbrueckii*on beer fermentation[J]. FEMS Yeast Research，2023，23：foad006.

[20] 张新慧，王霞霞，张恩和. 2，4-二叔丁基苯酚对啤酒花根际土壤微生物数量的化感效应研究[J]. 中国生态农业学报，2008，16（6）：1606-1608.
ZHANG X H，WANG X X，ZHANG E H. Allelopathic effect of phenol 2，4-bis（1，1-dimethylethyl）on microorganism of *Hamulus lupulus* L.（hops）rhizospheric soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2008，16（6）：1606-1608.（in Chinese）

[21] 曾著莉，魏晋梅，牛黎莉，等. HS-SPME-GC-MS分析马铃薯挥发性风味物质[J]. 食品与生物技术学报，2019，38（6）：123-130.
ZENG Z L，WEI J M，NIU L L，et al. Analysis of flavor in potato by headspace-solid phase microextration-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2019，38（6）：123-130.（in Chinese）

[22] LI H H，QIN D，WU Z Y，et al. Characterization of key aroma compounds in Chinese Guojing sesame-flavor Baijiu by means of molecular sensory science[J]. Food Chemistry，2019，284：100-107.

[23] VAN GEMERT L J. Odour thresholds：compilations of odour threshold values in air，water and other media[M]. Zeist：Oliemans Punter & Partners BV，2011.

[24] DONG T Y，TIAN Z L，WANG S W，et al. Identification of key off-flavor compounds during storage of fried pepper（*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.）oils by sensory-directed flavor analysis and partial least squares regression（PLSR）[J]. Journal of Food Composition and Analysis，2024，131：106268.

[25] LIU S，YANG L，ZHOU Y，et al. Effect of mixed moulds starters on volatile flavor compounds in rice wine[J]. LWT - Food Science and Technology，2019，112：108215.

（责任编辑：李春丽）