

# 黑木耳多糖啤酒的加工工艺、理化性质及香气成分分析

王晓雨, 徐恒, 张恒, 刘曼丽, 刘伟, 裴龙英\*

(新疆理工学院食品科学与工程学院, 新疆黑木耳工程技术研究中心,  
新疆理工学院食品安全与营养实验教学示范中心, 新疆阿克苏 843100)

**摘要:** 为开发啤酒新产品, 在传统啤酒酿造工艺的基础上添加黑木耳多糖辅助酿造啤酒, 可延伸食用菌多糖的深加工产业链。通过对黑木耳多糖啤酒的发酵工艺进行响应面优化试验, 并对优化后的黑木耳多糖啤酒进行各理化指标和挥发性成分测定。结果表明: 在麦芽添加量为 0.20 kg/L, 酒花添加量 17 g/L, 多糖添加量 20 g/L 时, 其感官评分为 92.65 分, 双乙酰含量为 0.048 mg/L, 较好的保留了啤酒的风味和口感。对其理化性质测定后得到啤酒的色度值为 15.5 EBC, 酒精度为 4.3%vol, 泡持性为 319 s, 原麦汁浓度为 11.23 °P, 真实发酵度为 48.6%, 总酸含量为 2.34%, 均符合国家标准。将其与市售啤酒进行风味物质对比及层次聚类热图分析得到: 在 7 种不同啤酒酒样中共检测出 73 种香气成分, 且多糖啤酒具有较多特征香气组分。综合各项评判依据, 黑木耳多糖啤酒口感较佳、安全性高、并能保留较多香气成分。研究可为功能性成分在酿酒的应用中提供理论依据。

**关键词:** 啤酒; 黑木耳多糖; 加工工艺; 理化性质; 香气成分

**文章编号:** 1673-9078(2024)11-313-324

**DOI:** 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.11.1235

## Analysis of the Processing Technology, Physicochemical Properties, and Aroma Components of Black Fungus Polysaccharide Beer

WANG Xiaoyu, XU Heng, ZHANG Heng, LIU Manli, LIU Wei, PEI Longying\*

(College of Food Science and Engineering, Xinjiang Institute of Technology, Xinjiang Black Fungus Engineering Technology Research Center, Food Safety and Nutrition Experimental Teaching Demonstration Center, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843100, China)

**Abstract:** With the aim of developing new beer products, the addition of black fungus polysaccharides to facilitate beer brewing was assessed on the basis of traditional brewing technology, the findings of which could contribute to extending the deep processing industrial chain of edible fungus polysaccharides. Response surface optimization analysis was performed for the black fungus polysaccharide fermentation process, and the optimized black fungus polysaccharide beer was assessed based on the determination of different physicochemical indices and volatile components. The results revealed that the addition of 0.20 kg/L of malt, 17 g/L of hops, and 20 g/L of polysaccharide resulted in a sensory score of 92.65 and diacetyl

引文格式:

王晓雨,徐恒,张恒,等.黑木耳多糖啤酒的加工工艺、理化性质及香气成分分析[J].现代食品科技,2024,40(11):313-324.

WANG Xiaoyu, XU Heng, ZHANG Heng, et al. Analysis of the processing technology, physicochemical properties, and aroma components of black fungus polysaccharide beer [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 313-324.

收稿日期: 2023-10-16

基金项目: 国家级大学生创新训练项目 (202113558006); 新疆特色发酵食品研究 (ZT202101)

作者简介: 王晓雨 (1995-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 1721632996@qq.com

通讯作者: 裴龙英 (1990-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工与保鲜, E-mail: peilongy@163.com

content of 0.048 mg/L in the resulting beer, enhancing its overall flavor and taste. Measurements of the physical and chemical properties of the beer indicated a chromaticity value of 15.5 EBC, an alcoholic strength of 4.3%vol, a foam retention of 319 s, a raw wort concentration of 11.23 °P, a true fermentation degree of 48.6%, and a total acid content of 2.34%, which are all in accordance with national standards. Furthermore, a comparison of flavor components with those of commercially available beers and hierarchical clustering heat map analysis indicated the detection of 73 aroma components in seven different beer samples, with polysaccharide beers displaying a higher number of characteristic aroma components. On the basis of a range of different evaluation criteria, our findings indicated that black fungus polysaccharide beer outperformed other beers in terms of taste, safety, and number of aroma components. These findings could provide a theoretical basis for the application of functional constituents in brewing.

**Key words:** beer; black fungus polysaccharide; processing process; physicochemical property; aroma component

啤酒(Beer)是一种以麦芽、酒花和水为主要原料,经酵母发酵作用酿制而成的富含二氧化碳的低酒精度饮料,是世界上仅次于水和茶的第三大饮料<sup>[1]</sup>。啤酒含有微量的矿物质,作为谷物发酵的产物,啤酒还含有B族维生素,其风味突出,泡沫独特,多年来深受消费者的青睐<sup>[2,3]</sup>。食用菌多糖是一种特殊的生物活性物质,可作为生物反应增强剂和调节剂,能增强体液免疫和细胞免疫功能。黑木耳(*Auricularia auricula*)多糖作为食用菌多糖,具有免疫调节、抗肿瘤、降血压等多种生物活性<sup>[4]</sup>。将黑木耳多糖添加进啤酒的酿造过程中,可提高啤酒的保健功能<sup>[4]</sup>,增加啤酒种类,对啤酒企业开发富含食用菌多糖的新产品具有重要意义。

啤酒的理化特性对于监控啤酒发酵工艺具有重要作用。不同的啤酒种类源于啤酒在生产过程中其不同成分与酿造技术的相结合<sup>[5,6]</sup>。淀粉是啤酒麦汁中碳水化合物的主要来源,被淀粉酶水解转化为可发酵的糖,从而体现出啤酒产品的酒精含量<sup>[7]</sup>。蛋白酶将部分蛋白质转化为氨基酸,而剩余的蛋白质则对啤酒泡沫特性产生影响<sup>[8]</sup>。其次,啤酒在整个发酵过程中,会产生不良化合物乙醛、双乙酰和含硫化合物等,其中双乙酰是啤酒发酵过程中的重要副产物,在有限制的情况下会带给啤酒一种牛油或奶油似的风味物质,但在啤酒成熟中易因氧化而呈现出一种老化陈腐的味道。当其含量过高时,啤酒会呈现出馊饭味,严重损害啤酒的风味特征,并影响啤酒的感官质量<sup>[9]</sup>。此外,风味是啤酒产品质量的重要组成部分,化学成分是风味形成的物质基础,同时决定了啤酒的质量和风格特色<sup>[10]</sup>。啤酒花中含有较多化学物质,对啤酒的口感和风味起到促进作用,是啤酒产生特

征香气的主要来源。目前,关于黑木耳多糖对啤酒理化特性和香气成分的影响研究鲜有报道。

因此,本试验在传统啤酒酿造工艺的基础上添加黑木耳多糖,通过对黑木耳多糖啤酒的发酵工艺进行优化,并对各理化指标和挥发性风味物质进行测定,评价黑木耳多糖啤酒的酿造特性及其对啤酒香气成分的影响,对啤酒酿造过程的监控和产业发展具有一定的参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

30%黑木耳多糖,西安瑞迪生物有限公司;麦芽,超级麦芽(北京)贸易有限公司;德式小麦酿酒酵母,法国LALLEMAND公司;哈拉道酒花、空知王牌酒花,美国雅基玛酒花公司;萨兹酒花,巴特哈斯贸易有限公司;Campden片剂,Carlson公司;氢氧化钠、硼酸、正丁醇等均为国产分析纯。市售啤酒:红乌苏,绿乌苏,小麦白啤酒,新疆乌苏啤酒有限责任公司;蓝带啤酒,广东肇庆蓝带啤酒卢堡公司;乐堡啤酒,重庆嘉士伯乐堡啤酒公司;青岛啤酒,青岛啤酒股份有限公司。

ROBO BREW型啤酒一体机(10 L),BrewZilla公司;HH-6S型数显恒温水浴锅,上海捷呈实验仪器有限公司;EL3002型分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;泡持杯,密度瓶(50 mL,附温度计),成都典锐实验仪器有限公司;手动粉碎机,淄博塔斯曼酿酒原料有限公司;Agilent5977C型气相色谱-质谱仪(GC-MS),DB-5型色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),安捷伦科技(中国)有限公司;DVB/CAR/PDMS型萃取头,美国Supelco公司。

1.2 实验方法

1.2.1 酿造工艺

水处理：将酿造用水和洗槽用水静置沉淀，再将 Campden 片碾碎投入水中。

酿造流程：将麦芽（200 g）于去离子水（1 000 mL）中浸润粉碎后进行糖化，糖化温度为 68 ℃，时间 60 min，期间需不停搅拌防止结块；糖化后将其煮沸 60 min，再加入黑木耳多糖（以 20 g/L 麦芽汁计）和酒花（以 15 g/L 麦芽汁计），冷却并充氧 10 min，再将活化后的酵母（以 10 g/L 麦芽汁计）投入其中进行发酵，于 19 ℃ 环境避光发酵 7 d。发酵结束后需进行二次发酵和熟化过程，于 19 ℃ 环境避光发酵 14 d；二次发酵后需对啤酒进行过滤，除去酵母及其他杂质，再经灌装后转入 4 ℃ 冰箱中储藏备用。

1.2.2 单因素试验

啤酒花的选择：固定麦芽添加量和黑木耳多糖添加量。探究不同的啤酒花种类（哈拉道、萨兹、空知王牌）对啤酒感官评分和双乙酰含量的影响。

采用控制变量法，考察麦芽添加量（0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 kg/L）、酒花添加量（5、10、15、20、25 g/L）、多糖添加量（10、15、20、25、30 g/L）对啤酒感官评分和双乙酰含量的影响。考察某一因素时，其他因素条件固定为：麦芽添加量 0.20 kg/L，酒花添加量 15 g/L，多糖添加量 20 g/L。

1.2.3 响应面优化试验

以麦芽添加量、酒花添加量和多糖添加量为研究因素，以啤酒的感官评分和双乙酰含量为响应值，进行 3 因素 3 水平的响应面优化试验，因素水平设计见表 1。

表 1 因素水平表

Table 1 Factor level table

水平	因素		
	麦芽添加量 /(kg/L)	酒花添加量 /(g/L)	多糖添加量 /(g/L)
-1	0.15	10	15
0	0.20	15	20
1	0.25	20	25

1.2.4 指标测定

样品预处理：将啤酒超声 10 min 进行除气处理，并在 4 ℃ 的条件下过滤备用。

啤酒的双乙酰、色度、酒精度、泡持性、原麦

汁浓度、真实发酵度和总酸均参考 GB/T4928-2008《啤酒分析方法》进行测定。

1.2.5 感官评价

参考黄琳等<sup>[1]</sup>的方法，并稍作修改。由 16 名接受专业培训的人员进行感官评定。以透明度、色泽、起泡性、酒香和酒体口感 5 个指标作为评价因素。感官评分标准见表 2。

表 2 感官评分标准表

Table 2 Sensory score standard table

指标	标准	分数
透明度 (10 分)	清澈透明	9~10
	光泽略差	7~8
	轻微失光	4~6
	有悬浮物和沉淀	1~3
	严重混浊	0
色泽 (10 分)	淡黄色或淡绿色	6~10
	色泽较差	1~5
	色泽很差	0
起泡性 (20 分)	泡沫细腻洁白	0~8
	起泡明显	0~5
	持久性强	0~5
	挂壁现象	0~2
酒香 (30 分)	香味纯正无异味	0~15
	酒花香味	0~10
	无老化味	0~5
	酸味、酵母味、焦糊味、异脂味， 铁腥味、涩味等	0
	口感醇厚有风味特征	0~10
酒体口感 (30 分)	酒体柔和协调，纯正无杂味，杂质少	0~10
	苦味爽口、持续时间较长	0~5
	有 CO <sub>2</sub> 刺激、杀口力较强	0~5

1.2.6 多糖啤酒与市售啤酒香气成分的测定

样品处理：量取 5.00 mL 啤酒及 1 g NaCl 置于 15.00 mL 顶空瓶中，每个样品加入 10.00 μL 体积浓度为 2.00 μL/mL 的环己酮内标液，加盖密封。

GC-MS 条件及操作过程：使用毛细管色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）；载气为氦气；流量 1 mL/min；进样口温度 250 ℃ 维持 5 min，不分流；升温程序：初温 40 ℃，然后 5 ℃ /min 升至 250 ℃ 维持 5 min。电离方式为电子轰击离子源（EI）；电子能量 70 e；离子源温度 230 ℃；四极杆温度 150 ℃；气质接口温度 250 ℃；灯丝电流 35 μA；



质荷比扫描范围 29~600  $m/z$ 。

将萃取头活化 30 min, 活化温度为 250 °C, 活化后, 插入放有啤酒的顶空瓶中, 置于啤酒液面上方 20 mm 处, 在 60 °C 下搅拌萃取 30 min, 再将萃取头插入样口解吸 3 min; 检测到的化合物经计算机检索, 与数据库 (NISTII) 相匹配, 选取相似指数 (SI) 较高的化合物。根据内标法计算各组分的相对含量。

### 1.3 数据处理

每个试验重复 3 次; 采用 SPSS 26 进行显著性分析; 采用 Origin 2019b 制图; 采用 Design Expert 12 软件进行响应面设计; 试验数据以平均值  $\pm$  标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同酒花对啤酒感官和双乙酰含量的影响

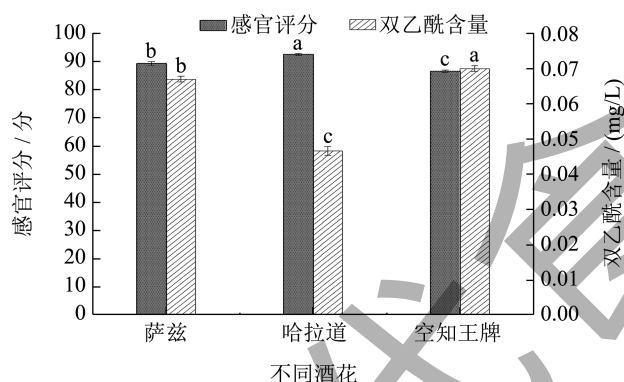


图 1 不同酒花对啤酒感官和双乙酰含量的影响

Fig.1 Effects of different hops on sensory and diacetyl content of beer

注: 图中小写字母表示不同酒花下啤酒感官评分或双乙酰含量差异显著 ( $P < 0.05$ )。

如图 1 所示, 感官评分和双乙酰含量可以直观的反映不同酒花酿造啤酒的质量。其中哈拉道酒花的感官评分最高, 为 92.53 分, 优于其他两种酒花, 并显著高于空知王牌酒花 ( $P < 0.05$ )。双乙酰是判断啤酒是否成熟的重要标志之一, 具有不愉快的馊饭味, 其中哈拉道酒花的双乙酰含量最低, 为 0.047 mg/L, 相对于其他酒花气味更好。萨兹酒花和空知王牌酒花的双乙酰含量较高, 为 0.067 和 0.070 mg/L, 显著高于哈拉道酒花 ( $P < 0.05$ ), 但 3 种酒花所酿造的啤酒双乙酰含量均低于 0.1 mg/L, 符合国家标准。

游见明等<sup>[12]</sup>研制茶叶多糖啤酒时得到的双乙酰含量高于 0.1 mg/L, 与本试验结果不同, 说明不同的酿造条件以及不同的酵母菌株产生双乙酰的量也有所差异。综合感官评分和双乙酰含量, 使用哈拉道酒花酿造啤酒的质量更好, 因此, 本实验选择哈拉道酒花酿造多糖啤酒进行后续实验。

### 2.2 单因素试验结果

#### 2.2.1 麦芽添加量对啤酒感官评分和双乙酰含量的影响

麦芽是一种能够决定啤酒最终色泽的原材料, 可形成赋予啤酒色、香、味的物质, 并在很大程度上决定了啤酒的气味和口感。如图 2 所示, 随着麦芽添加量的增高, 多糖啤酒的感官评分呈现出先上升后下降的变化趋势, 周亚丽等<sup>[13]</sup>研究藜麦啤酒发现, 麦汁中的蛋白质含量及氨基酸构成对啤酒的气味有较大影响。而双乙酰含量则随着麦芽添加量的增加呈现先下降后上升的趋势。当麦芽添加量增至 0.20 kg/L 时, 其感官评分最高, 为 90.67 分, 随后继续下降。而此时双乙酰含量最低, 为 0.050 mg/L, 随后显著上升 ( $P < 0.05$ )。综合感官评分和双乙酰含量, 选择麦芽添加量为 0.20 kg/L 作为多糖啤酒响应面试验的中心点。

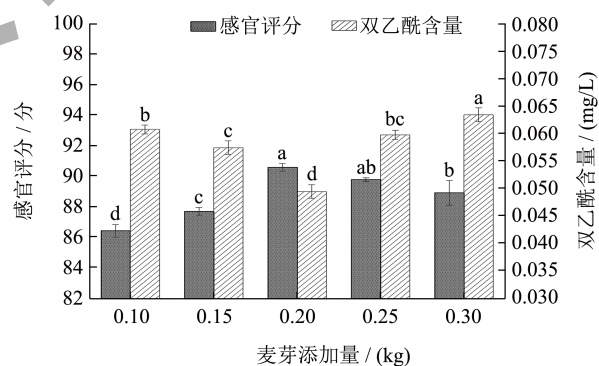


图 2 麦芽添加量对啤酒感官评分和双乙酰含量的影响

Fig.2 Effects of malt supplementation on sensory score and diacetyl content of beer

注: 图中小写字母表示不同添加量间感官评分或双乙酰含量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

#### 2.2.2 酒花添加量对啤酒感官评分和双乙酰含量的影响

在啤酒的酿造中, 啤酒花可使啤酒具有清爽的芳香气、苦味和防腐作用, 并出现丰富的泡沫<sup>[14]</sup>。如图 3 所示, 随着酒花添加量的增大, 啤酒的感官评分呈先上升后下降的变化趋势, 而不同添加量的



啤酒双乙酰含量呈先下降后上升的趋势。当酒花添加量为 15 g/L 时,此时的感官评分为 91.6 分,双乙酰含量为 0.065 mg/L。适量的添加酒花,可以赋予啤酒特殊的香气,若添加过量,啤酒涩味和苦味增加,从而导致其感官评分降低。其次,双乙酰含量继续增大,会导致啤酒出现不愉快的气味,与感官评分结果相符。因此,综合二者的变化,选择酒花添加量为 15 g/L 作为多糖啤酒响应面试验的中心点。

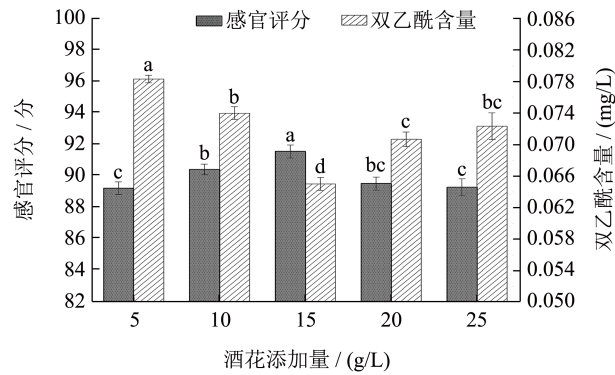


图3 酒花添加量对啤酒感官评分和双乙酰含量的影响  
Fig.3 Effects of hop addition amount on sensory score and

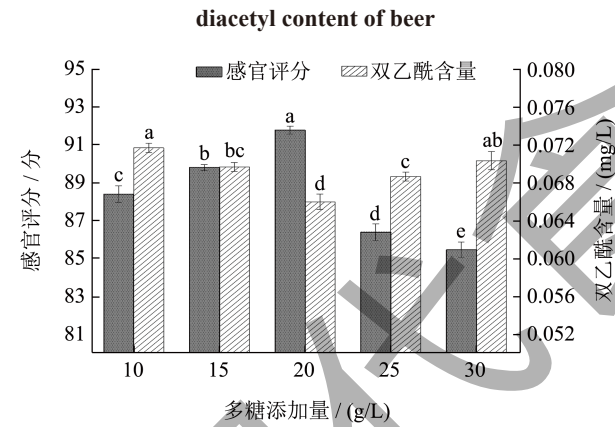


图4 多糖添加量对啤酒感官评分和双乙酰含量的影响  
Fig.4 Effects of polysaccharide on sensory score and diacetyl content in beer

2.2.3 多糖添加量对啤酒感官评分和双乙酰含量的影响

黑木耳多糖作为“生物应答效应物”,具有多种生理活性。将黑木耳多糖加入到啤酒的酿造中,可提高啤酒的生理功能,对人体细胞机能起到增效作用<sup>[4]</sup>。如图4所示,随着黑木耳多糖添加量的增大,啤酒的感官评分呈先上升后下降的变化趋势,而双乙酰含量则先下降后上升,当多糖添加量为 20 g/L 时,啤酒的感官评分最高,为 91.8 分,双乙酰含量最低,为 0.066 mg/L。若继续增大多糖添加量,二者则继续变化 ( $P<0.05$ )。当黑木耳多糖添加量过

高时,会导致黑木耳气味覆盖啤酒中麦芽和酒花的香味,李建勋等<sup>[15]</sup>研究发现口蘑多糖啤酒中,多糖添加过多导致产品口感单薄,啤酒的特殊气味不明显。因此,综合二者变化,选择多糖添加量为 20 g/L 作为多糖啤酒响应面试验的中心点。

2.3 响应面试验结果

根据单因素试验结果,以啤酒的感官评分和双乙酰含量为响应值,以麦芽添加量 ( $A$ )、酒花添加量 ( $B$ ) 和多糖添加量 ( $C$ ) 为自变量,进行 3 因素 3 水平的响应面优化试验。实验方案及结果见表 3。

表 3 响应面实验设计方案及结果  
Table 3 Response surface experimental design plan and results

编号	麦芽添加量 $A$ / (kg/L)	酒花添加量 $B$ / (g/L)	多糖添加量 $C$ / (g/L)	感官评分 $Y_1$ / 分	双乙酰含量 $Y_2$ / (mg/L)
1	0.20	10	25	89.9	0.057
2	0.15	10	20	90.7	0.062
3	0.15	15	25	89.2	0.071
4	0.25	15	25	88.5	0.057
5	0.20	20	15	89.9	0.06
6	0.25	15	15	86.7	0.072
7	0.20	15	20	90.9	0.058
8	0.25	10	20	87.5	0.068
9	0.20	15	20	92.2	0.053
10	0.15	20	20	90.8	0.069
11	0.15	15	15	89.5	0.065
12	0.20	15	20	91.9	0.052
13	0.25	20	20	89.3	0.05
14	0.20	20	25	89.6	0.063
15	0.20	10	15	87.8	0.069
16	0.20	15	20	92.1	0.054
17	0.20	15	20	91.8	0.055

2.3.1 回归方程拟合及方差分析

通过 Design Expert 12 软件对表 3 中的试验结果进行响应面回归拟合分析,可得到回归模型方程。

回归模型方程  $Y_1$ : 感官评分 =  $91.78 - 1.02 * A + 0.46 * B + 0.41 * C + 0.42 * AB + 0.52 * AC - 0.60 * BC - 1.52 * A^2 - 0.69 * B^2 - 1.79 * C^2$

回归模型方程  $Y_2$ : 双乙酰含量 =  $0.054 -$

$$0.0025A-0.0018B-0.0023C-0.0063AB-0.0053AC+0.0038BC+0.0059A^2+0.0019B^2+0.0059C^2$$

由表4可知,  $Y_1$  的回归模型  $P$  值为 0.000 1, 表明该模型合理。失拟项  $P$  值为  $0.8645 > 0.05$ , 表明失拟项不显著, 无失拟因素存在。该回归模型的决定系数  $R^2$  为 97.11%, 拟合度较好, 可用该回归方程对试验结果进行分析和预测<sup>[16]</sup>。在该模型中,  $A$ 、 $A^2$  和  $C^2$  对啤酒感官评分影响极显著 ( $P < 0.01$ );  $B$ 、 $C$ 、 $AC$ 、 $BC$  和  $B^2$  对感官评分影响显著 ( $P < 0.05$ ); 其余对感官评分影响不显著 ( $P > 0.05$ )。结果显示, 各因素对响应值  $Y_1$  的显著性排序为  $A > B > C$ 。

表 4 ( $Y_1$ ) 的回归模型方差分析和系数显著性检验

Table 4 ( $Y_1$ ) regression model analysis of variance and coefficient significance test

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值	显著性
$Y_1$ 模型	42.40	9	4.71	26.16	0.000 1	**
$A$	8.40	1	8.40	46.68	0.000 2	**
$B$	1.71	1	1.71	9.50	0.017 7	*
$C$	1.36	1	1.36	7.56	0.028 5	*
$AB$	0.72	1	0.72	4.01	0.085 2	
$AC$	1.10	1	1.10	6.12	0.042 6	*
$BC$	1.44	1	1.44	8.00	0.025 5	*
$A^2$	9.66	1	9.66	53.67	0.000 2	**
$B^2$	2.00	1	2.00	11.13	0.012 5	*
$C^2$	13.49	1	13.49	74.92	<0.000 1	**
残差	1.26	7	0.18			
失拟项	0.19	3	0.064	0.24	0.864 5	不显著
纯误差	1.07	4	0.27			
总误差	43.66	16				

注:  $R^2=0.9711$ ,  $R^2_{Adj}=0.9340$ , \* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ ); \*\* 表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

由表5可知,  $Y_2$  (双乙酰含量) 的回归模型极显著 ( $P=0.0005 < 0.01$ ), 失拟项不显著 ( $P=0.5609 > 0.05$ ), 该模型与实际实验误差较小<sup>[17]</sup>。回归模型的决定系数  $R^2=95.85\%$ ,  $R^2_{Adj}=90.51\%$ , 拟合度较高, 实验方法可靠。此外, 该模型中的  $AB$ 、 $AC$ 、 $A^2$  和  $C^2$  对双乙酰含量影响极显著 ( $P < 0.01$ ),  $A$ 、 $C$  和  $BC$  对双乙酰含量影响显著 ( $P < 0.05$ ); 各因素对响应值  $Y_2$  的显著性排序为  $A > C > B$ 。

表 5 ( $Y_2$ ) 的回归模型方差分析和系数显著性检验

Table 5 ( $Y_2$ ) regression model analysis of variance and coefficient significance test

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值	显著性
$Y_2$ 模型	0.000 78	9	0.000 086	17.96	0.000 5	**
$A$	0.000 05	1	0.000 050	10.39	0.014 6	*
$B$	0.000 02	1	0.000 025	5.09	0.058 7	
$C$	0.000 04	1	0.000 041	8.41	0.023 0	*
$AB$	0.000 16	1	0.000 156	32.46	0.000 7	**
$AC$	0.000 11	1	0.000 110	22.90	0.002 0	**
$BC$	0.000 06	1	0.000 056	11.68	0.011 2	*
$A^2$	0.000 15	1	0.000 148	30.70	0.000 9	**
$B^2$	0.000 02	1	0.000 016	3.24	0.114 8	
$C^2$	0.000 15	1	0.000 148	30.70	0.000 9	**
残差	0.000 03	7	0.000 005			
失拟项	0.000 01	3	0.000 004	0.79	0.560 9	不显著
纯误差	0.000 02	4	0.000 005			
总误差	0.000 81	16				

注:  $R^2=0.9585$ ,  $R^2_{Adj}=0.9051$ , \* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ ); \*\* 表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

2.3.2 响应面结果分析

根据各响应值与两个自变量间的等高线和响应面形状, 可以反映各因素对多糖啤酒感官评分的影响及各因素间交互作用的强弱<sup>[18]</sup>。由图5所示, 酒花添加量 ( $B$ ) 和多糖添加量 ( $C$ ) 的响应面图坡度较为陡峭, 等高线图趋于椭圆, 说明  $BC$  间的交互作用显著, 与表4中的方差分析结果一致。

图6所示为各因素的交互作用对双乙酰含量的影响。各因素的响应面图陡峭程度明显, 其等高线图均呈现椭圆形, 说明麦芽添加量 ( $A$ )、酒花添加量 ( $B$ ) 和多糖添加量 ( $C$ ) 之间的交互作用显著, 对双乙酰含量的影响达到显著水平, 与表5中的方差分析结果一致; 啤酒的双乙酰含量随着各因素添加量的升高而呈现不同的变化趋势, 适当调整三个因素的添加量, 可降低啤酒的双乙酰含量, 避免不良气味产生。

2.3.3 验证试验

通过 Design Expert 12 软件进行模型分析, 得到多糖啤酒的最佳酿造工艺: 麦芽添加量 0.21 kg/L, 酒花添加量 17.18 g/L, 多糖添加量 20.41 g/L, 其理论感官评分最高, 为 91.74 分, 双乙酰含量最低, 为 0.053 mg/L, 此条件下多糖啤酒的感官品质最佳。考虑到试验的可操作性, 将酿造工艺调整为: 麦芽添加量 0.20 kg/L, 酒花添加量为 17 g/L, 多糖添加量

20 g/L, 在该条件下得到啤酒的感官评分为 92.65 分, 双乙酰含量为 0.048 mg/L, 与理论预测值接近, 试验方法可靠。

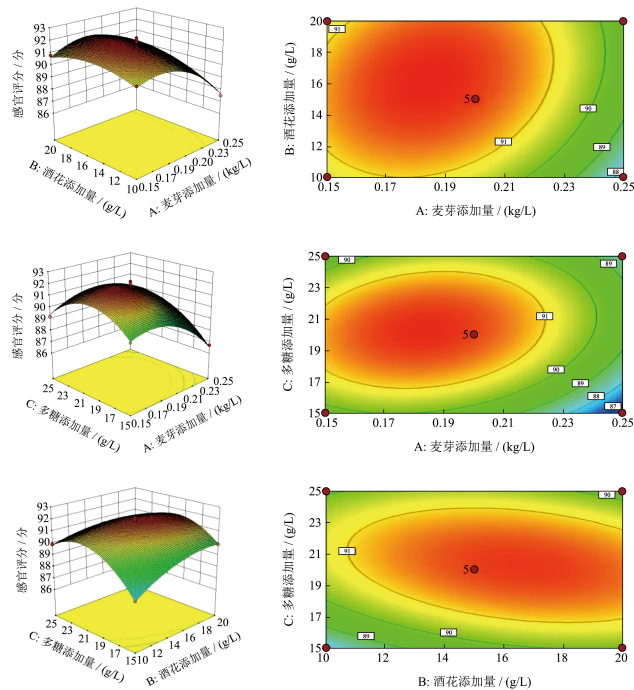


图 5 各因素对感官评分的作用图及等高线图

Fig.5 Effect diagram and contour diagram of each factor on sensory score

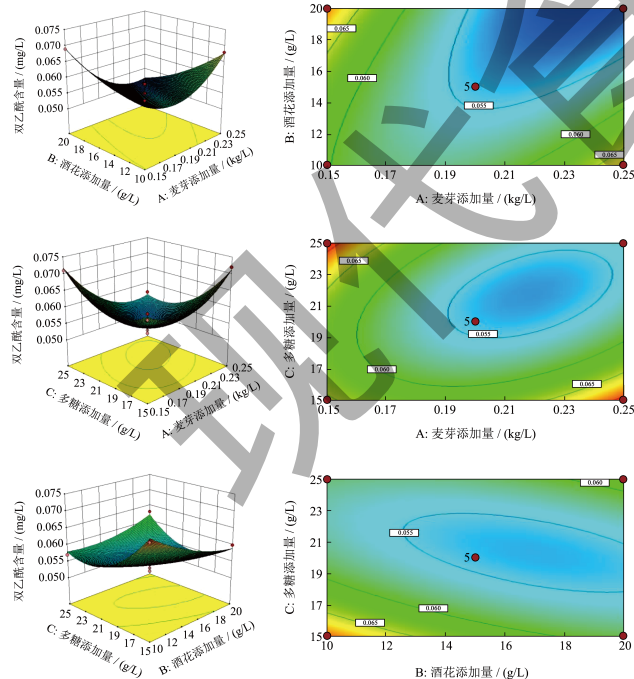


图 6 各因素对双乙酰含量的作用图及等高线图

Fig.6 Action diagram and contour diagram of each factor on diacetyl content

### 2.3.4 最佳工艺下黑木耳多糖啤酒的理化性质

在啤酒酿造过程中, 色度是评价啤酒的重要指标, 根据 GB4927-2008《啤酒》所示, 色度在 2.0~14.0 EBC 的称为淡色啤酒, 在 15.0~40.0 EBC 称为浓色啤酒, 色度 $\geq 41.0$  EBC 的称为黑色啤酒。由表 6 可知, 本试验研制的黑木耳多糖啤酒色度为 15.5EBC, 视觉上为棕黄色。黑木耳多糖啤酒的酒精精度为 4.3%vol, 原麦汁浓度为 11.23 °P。酒精精度取决于麦汁中糖的浓度, 麦芽汁浓度越高, 酒精精度也越高。多糖啤酒的真实发酵度为 48.6%, 真实发酵度又称“啤酒真正发酵度”, 是啤酒质量评价指标之一。

此外, 啤酒泡沫也会对啤酒的口感产生影响, 因为泡沫会对饮酒者的上唇产生触觉效应<sup>[19]</sup>。黑木耳多糖啤酒的泡持性为 319 s, 表现出极佳的起泡性<sup>[20]</sup>。啤酒中的总酸主要来自麦芽和麦汁中的酸以及发酵过程中产生的有机酸, 适量的有机酸可使啤酒口感丰富。国家标准规定 11 °P 和 12 °P 的优级淡色啤酒的总酸含量应低于 2.6%, 黑木耳多糖啤酒的总酸为 2.34%, 符合国家标准 (GB4927-2008)。双乙酰是影响啤酒风味的重要物质, 同时也是啤酒成熟的限制性指标。其具有挥发性和强烈的刺激性, 含量过高时, 啤酒会呈现出馊饭味, 影响啤酒的感官质量<sup>[9]</sup>。黑木耳多糖啤酒的双乙酰含量为 0.048 mg/L, 远低于限制含量, 且感官评分为 92.65 分, 风味较好。

### 2.3.5 多糖啤酒与市售啤酒风味物质对比

啤酒原料中的化学物质在酿造过程中会发生一系列变化, 从而影响啤酒的香气、口感及营养价值。为得到黑木耳多糖啤酒与市面上常见的 6 种啤酒香气成分的差异, 对 7 种啤酒的挥发性风味物质进行对比分析。由表 7 可知, 在 7 种不同啤酒酒样中共检测出 73 种挥发性香气成分。其中黑木耳多糖啤酒 33 种, HWS 啤酒 18 种, LWS 啤酒 31 种, LD 啤酒 28 种, LB 啤酒 26 种, XMB 啤酒 37 种, QD 啤酒 24 种, 不同种类的啤酒原料和酿造工艺不同, 检测到的香气成分也有所差异。7 种啤酒的酯类和醇类成分较多, 而香气成分又各不相同, 说明酯类和醇类成分是啤酒香气成分的主要贡献物。



表 6 黑木耳多糖啤酒的理化性质

Table 6 Physicochemical properties of black fungus polysaccharide beer

指标	色度/(EBC)	酒精度/(%vol)	泡持性均值/s	原麦汁浓度/°P	真实发酵度/%	总酸/%	双乙酰/(mg/L)	感官评分/分
多糖啤酒	15.50 ± 0.31	4.30 ± 0.11	319 ± 0.90	11.23 ± 0.15	48.6 ± 0.65	2.34 ± 0.13	0.048 ± 0.004	92.65 ± 1.06
国家标准	—	≥4.1	≥180	—	—	≤2.6	≤0.1	—

表 7 多糖啤酒与市售啤酒风味物质含量对比(μg/L)

Table 7 Comparison of flavor substances between polysaccharide beer and commercial beer

序号	组分	保留时间/min	多糖啤酒	HWS 啤酒	LWS 啤酒	LD 啤酒	LB 啤酒	XMB 啤酒	QD 啤酒
1	乙酸苯乙酯	46.63	19.20 ± 0.13	54.40 ± 5.82	50.12 ± 1.46	30.91 ± 1.39	40.83 ± 1.75	54.29 ± 1.12	24.95 ± 2.86
2	丁酸苯乙酯	50.29	—	—	—	—	—	—	0.76 ± 0.09
3	2- 甲基丁酸 -2- 苯乙酯	50.79	—	—	—	—	—	18.61 ± 1.33	—
4	乙酸异戊酯	14.09	0.32 ± 0.04	—	—	2.59 ± 0.26	3.69 ± 0.50	16.15 ± 1.22	2.45 ± 0.22
5	乙酸乙酯	5.73	6.11 ± 0.17	—	3.49 ± 0.28	1.19 ± 0.10	2.12 ± 0.52	0.31 ± 0.05	1.05 ± 0.17
6	丁酸异戊酯	21.96	—	—	—	—	—	31.13 ± 1.51	—
7	丁二酸二乙酯	43.10	—	—	—	—	—	29.17 ± 1.30	—
8	棕榈酸乙酯	54.64	5.67 ± 0.12	—	0.25 ± 0.09	0.10 ± 0.01	—	—	—
9	抗坏血酸二棕榈酸酯	57.36	—	—	—	—	1.14 ± 0.48	—	—
10	己酸 -2- 苯乙酯	53.63	—	4.72 ± 1.28	5.34 ± 1.04	—	4.59 ± 0.63	2.32 ± 0.31	—
11	己酸乙酯	19.63	—	—	—	3.70 ± 0.49	2.63 ± 0.62	5.69 ± 0.31	0.82 ± 0.47
12	丁酸戊酯	47.34	—	—	0.31 ± 0.11	—	—	—	—
13	癸酸乙酯	41.70	1.86 ± 0.30	—	7.33 ± 0.65	5.41 ± 0.97	0.56 ± 0.10	0.40 ± 0.06	3.69 ± 0.42
14	辛酸乙酯	32.81	1.30 ± 0.18	—	11.66 ± 2.27	6.53 ± 0.55	6.72 ± 0.93	6.19 ± 0.19	4.28 ± 0.53
15	乙酸苄酯	44.57	—	—	—	—	—	0.57 ± 0.09	—
16	苯甲酸乙酯	42.43	1.24 ± 0.16	—	—	—	0.16 ± 0.09	—	0.21 ± 0.01
17	α- 戊基 -γ- 丁内酯	51.57	0.93 ± 0.02	—	—	1.26 ± 0.21	—	0.93 ± 0.62	—
18	反式肉桂酸乙酯	53.13	—	0.19 ± 0.06	0.50 ± 0.19	0.16 ± 0.04	0.05 ± 0.03	0.12 ± 0.04	0.13 ± 0.02
19	月桂酸乙酯	47.60	0.79 ± 0.13	—	0.68 ± 0.04	0.77 ± 0.07	—	0.83 ± 0.03	0.41 ± 0.09
20	月桂酸异戊酯	48.01	—	—	—	—	—	0.73 ± 0.02	—
21	亚油酸乙酯	59.57	0.62 ± 0.05	—	—	—	—	—	—
22	苯基乙基戊酸酯	56.25	—	—	0.62 ± 0.07	0.21 ± 0.02	—	4.73 ± 0.43	—
23	异丁酸苯乙酯	50.28	—	—	3.76 ± 0.91	—	0.39 ± 0.42	3.40 ± 0.14	—
24	苯乙酸乙酯	45.82	0.34 ± 0.11	—	1.11 ± 0.45	—	—	—	0.15 ± 0.02
25	R-γ- 癸内酯	53.36	—	—	—	—	—	1.71 ± 0.69	—
26	十四酸乙酯	51.78	0.36 ± 0.06	—	—	—	—	—	—
27	9- 癸烯酸乙酯	55.52	—	0.20 ± 0.05	—	0.26 ± 0.02	0.20 ± 0.13	0.11 ± 0.01	0.23 ± 0.02
28	9- 十六碳烯酸乙酯	54.96	0.45 ± 0.08	0.22 ± 0.07	—	—	—	—	—
29	硬脂酸乙酯	57.10	0.27 ± 0.10	0.12 ± 0.04	—	—	—	—	—
30	油酸乙酯	57.38	0.29 ± 0.17	—	—	—	—	—	—
31	邻苯二甲酸丁基酯 2- 乙基己基酯	58.30	0.24 ± 0.06	—	0.99 ± 0.11	—	—	—	—
32	3- 羟基十三烷酸乙酯	53.32	—	0.41 ± 0.11	0.47 ± 0.30	0.17 ± 0.01	0.18 ± 0.07	—	0.07 ± 0.01
33	甲基丙酸乙酯	48.56	0.17 ± 0.08	—	—	—	—	—	—

续表 7

序号	组分	保留时间/min	多糖啤酒	HWS 啤酒	LWS 啤酒	LD 啤酒	LB 啤酒	XMB 啤酒	QD 啤酒
34	3- 苯丙酸乙酯	48.57	—	—	—	0.18 ± 0.03	0.57 ± 0.19	0.55 ± 0.11	0.34 ± 0.06
35	正辛酸异戊酯	42.34	—	—	—	—	—	1.84 ± 0.27	—
36	异戊基琥珀酸乙酯	52.16	—	—	—	—	—	1.19 ± 0.12	—
37	2- 辛基环丙烷十二烷酸甲酯	51.23	—	—	0.19 ± 0.05	—	—	—	—
38	苯乙醇	52.37	43.31 ± 0.75	62.84 ± 4.27	60.34 ± 3.13	25.91 ± 2.02	36.42 ± 1.59	49.12 ± 0.89	33.32 ± 1.57
39	异戊醇	21.15	23.59 ± 1.39	21.05 ± 1.49	17.84 ± 2.10	0.95 ± 0.14	12.28 ± 1.92	23.35 ± 1.16	9.11 ± 1.57
40	紫杉醇	53.23	0.13 ± 0.03	—	—	—	—	—	—
41	愈创醇	53.76	—	0.19 ± 0.07	—	—	—	—	—
42	α- 桉叶醇	54.35	—	0.30 ± 0.03	0.18 ± 0.11	0.13 ± 0.03	—	—	—
43	芳樟醇	38.62	—	—	—	—	—	1.72 ± 0.37	—
44	(S)-1,2- 丙二醇	7.66	—	—	—	—	—	—	0.20 ± 0.01
45	α- 松油醇	43.72	—	0.22 ± 0.06	—	0.10 ± 0.02	—	4.98 ± 0.49	—
46	正二十二醇	45.49	—	—	0.10 ± 0.02	—	—	—	—
47	α- 毕澄茄醇	54.11	—	—	—	0.15 ± 0.01	—	—	—
48	4- 乙基愈创木酚	51.45	—	—	—	—	—	4.13 ± 0.22	—
49	2,5- 二叔丁基酚	55.17	2.25 ± 0.15	8.10 ± 0.72	8.39 ± 0.97	6.54 ± 1.27	6.18 ± 1.05	1.90 ± 0.33	—
50	2,4,6- 三叔丁基苯酚	48.70	—	—	—	—	—	1.82 ± 0.24	—
51	二甲醚	7.45	62.39 ± 2.07	71.84 ± 3.08	35.60 ± 1.95	39.23 ± 2.11	31.86 ± 4.08	1.71 ± 0.37	45.47 ± 2.60
52	异丁酸	48.45	0.80 ± 0.14	—	—	—	—	—	—
53	辛酸	51.86	3.54 ± 0.22	17.40 ± 0.58	24.90 ± 2.48	21.75 ± 1.37	10.75 ± 1.61	14.69 ± 0.66	10.32 ± 0.79
54	正癸酸	54.80	1.13 ± 0.09	12.27 ± 0.92	20.14 ± 2.76	13.60 ± 1.44	7.72 ± 0.88	13.39 ± 0.82	—
55	正己酸	47.57	—	—	—	1.15 ± 0.29	0.77 ± 0.05	—	—
56	2- 甲基己酸	51.67	0.87 ± 0.05	—	—	—	—	—	—
57	月桂酸	57.34	—	—	1.31 ± 0.21	—	—	—	—
58	9- 癸烯酸	55.52	—	—	—	0.68 ± 0.14	0.20 ± 0.06	—	—
59	油酸	55.54	—	—	—	—	—	0.18 ± 0.06	—
60	3- 甲基丁酸	49.34	0.18 ± 0.06	—	0.93 ± 0.15	0.28 ± 0.04	—	—	—
61	2- 羟基 -5- 甲基苯乙酮	53.94	—	4.77 ± 0.75	1.92 ± 0.30	—	2.28 ± 0.34	—	—
62	环己酮	24.06	4 ± 0	4 ± 0	4 ± 0	4 ± 0	4 ± 0	4 ± 0	4 ± 0
63	大马士酮	53.91	—	—	—	—	—	0.14 ± 0.04	0.26 ± 0.01
64	2- 溴十八烷醛	40.23	—	—	0.18 ± 0.05	—	0.18 ± 0.04	—	0.08 ± 0.03
65	苯甲醛	37.40	0.38 ± 0.09	—	—	—	—	—	—
66	3- 糠醛	34.93	—	3.82 ± 1.14	—	2.54 ± 0.08	2.12 ± 0.43	2.24 ± 0.18	2.67 ± 0.37
67	柠檬醛	51.55	0.15 ± 0.02	—	—	—	—	—	—
68	β- 蒎烯	15.52	—	—	—	—	—	0.22 ± 0.04	—
69	苯乙烯	53.02	1.37 ± 0.05	—	—	—	—	—	—
70	3- 羟基 -4- 甲氧基 苯乙烯	53.94	3.30 ± 0.16	—	5.82 ± 1.08	—	—	—	—
71	乙酸铵	35.20	0.85 ± 0.14	—	—	—	—	—	—
72	1,4,8- 三甲基吡唑	56.25	—	—	0.39 ± 0.10	—	—	—	0.17 ± 0.01
73	2- 乙基 -5- 甲基噻吩	57.13	—	—	0.36 ± 0.22	—	—	—	—

注：图中“—”表示啤酒中无此香气成分。

为更直观地对比黑木耳多糖啤酒的关键香气分布规律与市面常见啤酒的差异，采用层序聚类分析对各香气组分进行分析。如图 7 所示，黑木耳多糖啤酒与市面常见啤酒的香气组分差异显著且具有较多特征香气组分。其余酒样的香气组分也有较大差异，其中 XMB 啤酒与其他啤酒的香气组分差异性较大且香气含量较高；相较于 HWS 啤酒，LWS 含更多特征香气组分。

如下图所示，QD 啤酒中大马士酮、丁酸苯乙酯和 (S)-1,2- 丙二醇含量较高；LD 啤酒中正己酸、9- 癸烯酸和  $\alpha$ - 毕橙茄醇含量较高；XMB 啤酒中  $\alpha$ - 戊基- $\gamma$ - 丁内酯、月桂酸乙酯、乙酸、乙酸苄酯、正辛酸异戊酯、苯基乙基戊酸酯、2- 甲基丁酸-2- 苯乙酯、异戊基琥珀酸乙酯、月桂酸异戊酯、丁酸异戊酯、丁二酸二乙酯、油酸、 $\beta$ - 蒎烯、芳樟醇、*R*- $\gamma$ - 癸内酯、乙酸异戊酯、4- 乙基愈创木酚、 $\alpha$ - 松油

醇、2,4,6- 三叔丁基苯酚、己酸乙酯和异丁酸苯乙酯含量较高；HWS 的特征香气组分相对 LWS 较少；LWS 中辛酸乙酯、异丁酸苯乙酯、3- 羟基-4- 甲氧基苯乙烯、邻苯二甲酸丁基酯、1,4,8- 三甲基呋唑、丁酸戊酯、月桂酸、3- 甲基丁酸、正二十二醇、癸酸乙酯、反式肉桂酸乙酯、苯乙酸乙酯和 2- 乙基-5- 甲基噻吩含量较高；而黑木耳多糖啤酒中 3,7- 二甲基-6- 烯丙基-4- 甲基戊酸酯、甲基丙酸乙酯、乙酸乙酯、乙酸铵、苯甲醛、苯甲酸乙酯、棕榈酸乙酯、苯乙烯、2- 甲基己酸、亚油酸乙酯、十四酸乙酯、1 $\alpha$ , 3 $\beta$ - 二苯基环丁烷、异丁酸、紫杉醇、二甲醚、9- 十六碳烯酸乙酯和硬脂酸乙酯含量较高，与市面常见啤酒的香气组分及含量差异显著，产品风味也不同，相同组分在不同浓度下表现的香气有所差异，所有香气组分的相互协调作用共同构成黑木耳多糖啤酒独特的香气类型。

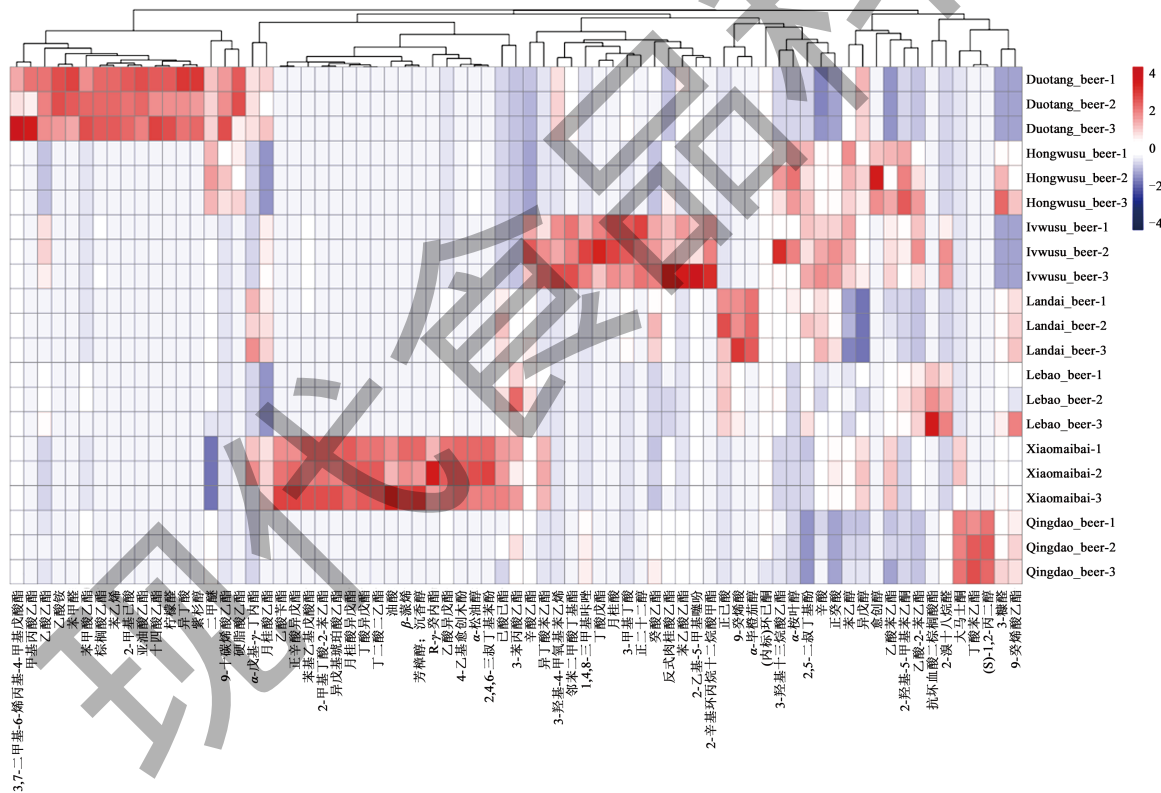


图 7 不同啤酒香气成分层次聚类图

Fig.7 Hierarchical clustering diagram of different beer aroma components

3 讨论

本文将具有多种生物活性的黑木耳多糖作为功能因子辅助酿造啤酒，并对最佳酿造工艺下黑木耳多糖啤酒的理化性质和香气成分进行测定，评价该

啤酒的酿造特性及其对啤酒香气成分的影响。

黑木耳多糖啤酒色度为 15.5EBC，视觉上为棕黄色，啤酒的颜色主要是由焦糖或类黑精和多酚物质在麦芽的浸泡和麦汁煮沸过程中发生的氧化和聚合反应引起<sup>[21]</sup>。啤酒的酒精度一般是 3%~5% 左右，



酒精度的大小与麦汁浓度有关,麦汁提取物含有90%~92%的碳水化合物,其中70%~80%为可发酵糖,可发酵糖和不可发酵糖的浓度会受麦到芽汁浓度、成分和酿造方法的影响<sup>[22]</sup>。此外,精酿啤酒按发酵程度可分为3种类型:真发酵程度在50%左右称为“淡啤酒”,是一种低发酵型啤酒,在60%左右的啤酒称为中发酵啤酒,超过65%的啤酒称为高发酵啤酒,黑木耳多糖啤酒的真实发酵度为48.6%,为低发酵型啤酒。啤酒泡沫主要是由二氧化碳、起泡蛋白与糖类物质组成的复合体,这些复杂组分的协同作用可使啤酒泡沫保持稳定<sup>[23]</sup>。黑木耳多糖啤酒的泡持性为319 s,表现出极佳的起泡性。啤酒里的表面活性物质能够降低表面张力,使泡沫不易破裂,泡持性会更长,其中的糖蛋白是最主要的表面活性物质。相关研究表明,蛋白质含量与啤酒泡沫的稳定性具有较大的相关性<sup>[24]</sup>。

风味是啤酒质量的重要组成部分,决定了啤酒的质量和风格特色。在麦芽汁的酒精发酵过程中,除了乙醇和二氧化碳等主要产物外,酿酒酵母还会分泌大量的风味化合物,包括高级醇、酯类、羰基、含硫化合物和脂肪酸等,均对啤酒、葡萄酒和其他酒精饮料的风味具有重要作用<sup>[25]</sup>。啤酒的风味较为复杂,主要的风味特征是苦味,主要来自啤酒花。酮类化合物和酚类化合物也可能引起啤酒产生苦味,但大多是由于 $\alpha$ -酸引起<sup>[26]</sup>。次要风味包括果味和酒精味,由高级醇和各种含硫成分赋予,如异戊醇提供水果味和甜味,2-苯基乙醇提供玫瑰味和花香<sup>[27,28]</sup>。麦芽对啤酒香气的影响也较大,浅色麦芽会产生类似饼干的甜香,深色麦芽可能有巧克力或坚果香,焦糖麦芽赋予啤酒一种甜的焦糖味<sup>[27]</sup>。啤酒的香气取决于酵母菌株、发酵副产物、啤酒花品种和硫化物,其中酯类成分在啤酒的香气成分中贡献较大,可赋予啤酒果香和花香<sup>[29]</sup>。醇类是酵母在酒精发酵过程中利用氨基酸或糖代谢产生的次级产物,也是构成酒类香气的主要成分。此外,添加酒花能使啤酒产生较多香气成分,其中芳樟醇作为贡献酒花香气重要的物质,在啤酒酒样中检出较少,但其转化产物 $\alpha$ -松油醇在啤酒中被检出,可能是啤酒发酵过程中产生的酸和酶使酒花原有的挥发性成分发生了相应的化学转化<sup>[30]</sup>。

#### 4 结论

在传统啤酒酿造工艺的基础上添加黑木耳多糖

辅助酿造啤酒,研制出一款口感佳、风味独特的新型啤酒,可延伸食用菌多糖的深加工产业链。试验通过单因素结合响应面优化试验,得到黑木耳多糖啤酒的最佳酿造工艺:即麦芽添加量0.20 kg/L,酒花添加量为17 g/L,多糖添加量为20 g/L,在此条件下,多糖啤酒的感官评分为92.65分,双乙酰含量为0.048 mg/L,较好的保留了啤酒的风味和口感。其次,对该条件下的啤酒进行各理化性质测定,得到啤酒的色度值为15.5 EBC,酒精度为4.3%vol,泡持性为319 s,原麦汁浓度为11.23 °P,真实发酵度为48.6%,总酸含量为2.34%,各项指标均符合国家标准。

此外,将多糖啤酒与市售啤酒进行风味物质对比及层次聚类热图分析得到:在7种不同啤酒酒样中共检测出73种挥发性风味物质,且黑木耳多糖啤酒具有较多特征香气成分,与市面常见啤酒的香气组分及含量差异显著。不同种类的啤酒原料和酿造工艺不同,检测到的香气成分也有所差异,所有香气组分的相互协调作用共同构成黑木耳多糖啤酒独特的香气类型。7种啤酒的酯类和醇类成分较多,说明二者是啤酒香气成分的主要贡献物,但最终呈现的香气特性还需要结合相关阈值进一步分析。

#### 参考文献

- [1] LI J, DU J. Molecular characterization of arabinoxylan from wheat beer, beer foam and defoamed beer [J]. *Molecules*, 2019, 24(7): 1230.
- [2] HE G, DU J, ZHANG K, et al. Antioxidant capability and potableness of fresh cloudy wheat beer stored at different temperatures [J]. *Journal of the Institute of Brewing*, 2012, 118(4): 386-392.
- [3] 韩东,李红,景建洲.不同酵母对苹果啤酒发酵及风味的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(15): 179-183.
- [4] 郭国丽.黑木耳根多糖提取及黑木耳多糖啤酒的研制[D].大连:大连海洋大学,2016.
- [5] PFERDMENGES L E, SCHRÖTER A, LOHMAYER R, et al. Characterization of the nutrient composition of german beer styles for the german nutrient database [J]. *Food Compos Anal*, 2022, 105: 104181.
- [6] GIOVANNI D G, SIMONA C, CASTELNUOVO D, et al. Effects of moderate beer consumption on health and disease: a consensus document [J]. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*, 2016, 26(6): 443-467.
- [7] SCHEPPER C F D, BUVÉ C, LOEY A M V, et al. A Kinetic study on the thermal inactivation of barley malt  $\alpha$ -amylase and  $\beta$ -amylase during the mashing process [J]. *Food Research*

- International, 2022, 157: 111201.
- [8] HUNG N T, THUY N T, HA N C. Evaluation of using the rice in mekong delta for beer making: nutritional, heat-resistant, protease-resistant, and inhibitor properties of proteins [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(12): e17222.
- [9] PEREIRA R. The role of emergent processing technologies in beer production [J]. Beverages, 2023, 9: 1-3.
- [10] 胡淑敏,黄淑霞,余俊红,等.啤酒口感特性与风味化学成分的关系[J].食品与发酵工业,2019,45(1):70-76.
- [11] 黄琳,许忠平,闫菲,等.蜂蜜艾尔精酿啤酒酿造工艺研究[J].中国酿造,2019,38(3):134-138.
- [12] 游见明,吕开斌.茶叶多糖啤酒研制[J].四川食品与发酵, 2008,1:16-18.
- [13] 周亚丽,游新勇,崔利华,等.藜麦啤酒工艺优化及其理化品质与抗氧化活性分析[J].食品研究与开发,2022, 43(24):159-165.
- [14] 李哲,负建民.不同储藏条件对颗粒酒花苦味物质的影响[J].食品与发酵工业,2009,35(8):74-77.
- [15] 李建勋,李小林,李鑫,等.口蘑多糖啤酒发酵工艺优化[J].食品研究与开发,2023,44(3):131-137.
- [16] 贾福晨,张晓蒙,于佳俊,等.基于响应面法西藏传统青稞酒的酿造工艺[J].食品与发酵工业,2019,45(22):171-178.
- [17] 王晓雨,任贵平,程竹林,等.响应面法优化枸杞无硫促干护色工艺及其对品质的影响[J].食品工业科技,2022, 43(19):246-255.
- [18] 冯赛赛,柳利平,李焕洋,等.响应面法优化胡麻可溶性膳食纤维-壳聚糖复合膜的机械性能[J].现代食品科技,2024, 40(7):145-154.
- [19] NEUGRODDA C, GASTL M, BECKER T. Comparison of foam analysis methods and the impact of beer components on foam stability [J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2015, 73(2): 170-178.
- [20] 岳宗翠,周广田.岩藻多糖啤酒生产工艺的研究[J].中国酿造,2010,1:148-150.
- [21] 程浩.啤酒色泽定量方法的建立及其应用[D].大连:大连工业大学,2016.
- [22] MUDURA E, PAUCEAN A, MUDURA V, et al. The influence of row materials on beer fermentability [J]. Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Agriculture, 2010, 67(2): 1-5.
- [23] 曹荣锟.啤酒辅料对啤酒泡沫的影响[D].无锡:江南大学,2018.
- [24] 曹荣锟,李佳泰,王金晶,等.大米辅料啤酒中蛋白质疏水性与蛋白质泡沫稳定性的分析[J].食品与发酵工业, 2018,44(9):66-70.
- [25] STERCZYNSKA M, STACHNIK M, POREDAA, et al. Ionic composition of beer worts produced with selected unmalted grains [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137(1): 10348.
- [26] KLIMCZAK K, CIOCHSKONECZNY M. Changes in beer bitterness level during the beer production process [J]. European Food Research and Technology, 2023, 249: 13-22.
- [27] MICHIU D, TOFANA M, MUDURA E, et al. Preliminary research concerning the determination of beer wort flavor compounds during primary fermentation [J]. Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary, 2010, 67(2): 1-3.
- [28] 钟思彦,徐玉娟,余元善,等.酶解对香蕉果酒发酵前后风味的影响[J].食品工业科技,2024,45(3):98-106.
- [29] PHIRARIS B P, MAUCH A, SCHEHL B D, et al. Processing of a top fermented beer brewed from 100% buckwheat malt with sensory and analytical characterisation [J]. Journal of the Institute of Brewing, 2010, 116(3): 265-274.
- [30] 段丽丽,耿得蓉,周凌洁,等.不同酒花葡萄酒香气主成分分析及聚类分析[J].食品与机械,2019,35(9):9-14.