

## 不同类型酵母对精酿啤酒化学和感官特性的影响

姚孟琦<sup>1</sup>, 郭泽峰<sup>2</sup>, 郭世鑫<sup>3</sup>, 张小娜<sup>3</sup>, 薛洁<sup>1</sup>, 李红<sup>1\*</sup>

(1. 中国食品发酵工业研究院有限公司, 北京 100015; 2. 杭州千岛湖啤酒有限公司, 浙江 杭州 311700;  
3. 天津科技大学 生物工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 为研究不同类型的酵母对精酿啤酒的化学和感官特性的影响, 选取5株酿酒酵母(4株上面发酵酵母、1株下面发酵酵母)进行酿造发酵实验, 采用顶空固相微萃取(HS-SPME)法以及离子色谱(IC)法提取并鉴定分析啤酒中的香气成分和有机酸成分, 采用偏最小二乘法-判别分析(PLS-DA)进行挥发性化合物的定量与鉴别, 并用电子舌对成品酒进行滋味评价。结果表明, 4株上面啤酒酵母(A1-A4)与下面啤酒酵母L5相比, 上面啤酒酵母的起发速度更快, 发酵度更高, 发酵液风味物质含量较高, 酯香醇厚。综合发酵性能指标可以看出, 菌株A2的发酵速度较快, 最早达到发酵峰值, 发酵液感官风味协调, 是一株发酵性能优良的精酿啤酒酵母; 菌株A3具有较高的发酵度为80.87%, 乙酸乙酯的产量高达45.64 mg/L, 是一株具有高发酵度的啤酒酵母。

**关键词:** 上面发酵; 精酿啤酒; 挥发性化合物; 感官分析; 偏最小二乘判别分析

中图分类号: TS262.7

文章编号: 0254-5071(2022)01-0133-05

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2022.01.023

引文格式: 姚孟琦, 郭泽峰, 郭世鑫, 等. 不同类型酵母对精酿啤酒化学和感官特性的影响[J]. 中国酿造, 2022, 41(1): 133-137.

## Effect of different yeasts on the chemical and sensory characteristics of craft beer

YAO Mengqi<sup>1</sup>, GUO Zefeng<sup>2</sup>, GUO Shixin<sup>3</sup>, ZHANG Xiaona<sup>3</sup>, XUE Jie<sup>1</sup>, LI Hong<sup>1\*</sup>

(1. China National Research Institute of Food and Fermentation Industries Co., Ltd., Beijing 100015, China; 2. Hangzhou Qiandao Lake Beer Co., Ltd., Hangzhou 311700, China; 3. College of Bioengineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** In order to study the effect of different yeasts on the chemical and sensory characteristics of craft beer, 5 strains of *Saccharomyces cerevisiae* (4 strains of top-fermentation yeast, 1 strain of bottom-fermentation yeast) were selected for brewing fermentation, and the volatile compounds and organic acids were extracted and identified by headspace solid phase microextraction (HS-SPME) and ion chromatography (IC), the volatile compounds were quantified by partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA), and the taste of the finished beer was evaluated with electronic tongue. The results showed that compared with bottom-fermentation yeast L5, top-fermentation yeast (A1-A4) had faster rise speed, higher fermentation degree, higher fermented liquid flavor substance content, and mellow ester aroma. In terms of comprehensive fermentation performance indicators, it could be seen that the fermentation speed of strain A2 was faster, it reached the fermentation peak at the earliest, and the sensory flavor of the fermentation broth was coordinated, which was a superior craft beer yeast with excellent fermentation performance. The strain A3 had a high fermentability of 80.87%, and the yield of ethyl acetate was 45.64 mg/L, which was a beer yeast with high fermentability.

**Key words:** top-fermentation; craft beer; volatile compounds; sensory analysis; PLS-DA

啤酒是世界上消费最广泛的酒精饮料之一, 在传入我国之后, 以工业啤酒为主的啤酒消费市场得到了飞速的发展, 并在2002年超越了美国, 成为世界第一大啤酒市场。工业啤酒是以大麦芽、水、啤酒花作为主要原料、选用下面发酵啤酒酵母并采用传统拉格工艺生产的啤酒, 多为低温12℃发酵的淡色啤酒, 口感单一, 因此导致了近年来中国啤酒产品间同质化、低质化严重, 并且消费者对啤酒产品的多样化需求导致近年来工业啤酒消费市场日渐低迷<sup>[1]</sup>。与此同时, 源于西欧国家的精酿啤酒以其风味独特、运输成本低、与当代餐饮休闲文化的契合度较高等优势在国内大受追捧<sup>[2-4]</sup>。精酿啤酒是由小型啤酒厂或是小型工坊以大(小)

麦芽、水、啤酒花及为了风味和口感添加的新型酿造原料为原材料, 选用上面发酵啤酒酵母、利用传统的酿造工艺生产的具有独特风味啤酒。国内各大啤酒厂纷纷布局中国精酿啤酒市场, 啤酒酵母是啤酒酿造过程中的核心与灵魂。

根据啤酒发酵方式的不同, 啤酒酵母可以分为上面发酵(Ale)和下面发酵(Lager)啤酒酵母<sup>[5]</sup>。目前, 国内研究致力于优选酯香醇厚、发酵度较高、果香、花香等典型风格较为突出的上面发酵酵母, 用于开发不同风格的精酿啤酒, 从而赋予精酿啤酒发酵周期短、啤酒香味独特的风格特点<sup>[6-9]</sup>。随着精酿啤酒市场的扩大, 应用于精酿啤酒生产的酵母数量种类繁多, 研究不同类型酵母对精酿啤酒的风味

收稿日期: 2021-07-21

修回日期: 2021-09-12

基金项目: 西藏自治区科技项目(XZ201901NA04)

作者简介: 姚孟琦(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为啤酒酵母性能研究。

\*通讯作者: 李红(1978-), 男, 教授级高级工程师, 博士, 研究方向为酿酒工程。

和感官特性的影响,明确采用两种不同的发酵方式生产的啤酒类型的差异性,对于开发精酿啤酒新产品、提高啤酒质量具有重要的意义<sup>[10-11]</sup>。

针对这一背景,对实验室保藏的4株上面啤酒酵母和1株下面啤酒酵母分别进行了模拟发酵试验。对5株酵母发酵过程中的外观糖度、双乙酰的还原及高级醇和酯类物质、有机酸成分进行检测,研究旨在通过采用顶空固相微萃取(headspace solid phase micro extraction, HS-SPME)、离子色谱(ion chromatography, IC)提取并鉴定分析不同类型酵

母发酵的啤酒样品中的香气成分和有机酸成分,通过偏小二乘法-判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)进行监督多变量统计性主成分分析,达到特定的标记化,优选出具有高发酵度、酯香突出、风味协调的啤酒酵母菌株。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

菌株A1、A2:市售活性干酵母;菌株A3、A4、L5:中国食品发酵工业研究院保藏,菌株相关信息见表1。

表1 实验菌株信息  
Table 1 Information of experimental strains

编号	菌种名称	菌株拉丁文	菌株种类	菌株来源	菌种编号
A1	酿酒酵母	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Ale	市售活性干酵母	Bry-97
A2	酿酒酵母	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Ale	市售活性干酵母	Abbaye
A3	酿酒酵母	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Ale	中国食品发酵工业研究院	ICAB-01
A4	酿酒酵母	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Ale	中国食品发酵工业研究院	ICAB-02
L5	酿酒酵母	<i>Saccharomyces pastorianu</i>	Lager	中国食品发酵工业研究院	ICAB-03

琼脂(生化试剂):北京博奥拓科技有限公司;盐酸溶液(分析纯)、邻苯二胺:天津市恒移化工原料有限公司。

麦芽汁培养基:国产大麦芽粉碎,利用协定糖化法制备12 °P麦汁,115 °C灭菌20 min备用。

### 1.2 仪器与设备

LRH-250生化培养箱:上海一恒科技有限公司;QXT-1糖化仪:中国原子能科学研究院;PHS-3C pH计:上海仪电科学仪器股份公司;larus 600型GC-MS联用仪:美国PerkinElmer公司;ICS-3000型离子色谱仪,配有EluGen Cartridge淋洗液自动发生器、电导检测器和Chromleon 6.80色谱工作站:美国Dionex公司;TS-5000Z Handling Tutorial型电子舌:日本Insent公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 实验室啤酒模拟发酵体系

以实验室制备的400 mL麦汁培养基作为原料,按10%的接种比例,5株酿酒酵母的接种量均为 $7 \times 10^7$ 个/mL,14 °C进行接种,摇匀后扣上发酵栓,上面发酵啤酒酵母的主发酵温度为20 °C,下面发酵啤酒酵母的主发酵温度为12 °C,在1 L三角瓶中进行发酵,每天摇瓶测定CO<sub>2</sub>质量损失<sup>[11-12]</sup>。

#### 1.3.2 啤酒理化指标检测

发酵结束时取样检测,根据国标GB/T 4928—2008《啤酒分析方法》<sup>[13]</sup>进行酒精度、双乙酰、原麦汁浓度、真正发酵度、表观发酵度等啤酒理化指标的测定。pH值测定:采用pH酸度计直接测定;悬浮酵母细胞数:采用血球计数板法测定;外观浓度测定:采用糖度计直接测定。

滋味测定:取样品50 mL于电子舌样品杯内,每种样

品两杯,待测。每个样品循环测定4次,舍弃第一组数据,选取其余3组数据用于结果分析,测定的味觉包括酸味(sourness)、苦味(bitterness)、咸味(saltiness)、鲜味(umami)、涩味(astringency)、鲜回味(丰富度)(richness)等。

#### 1.3.3 HS-SPME以及离子色谱分析条件

顶空固相微萃取条件:在250 °C的气相色谱进样口对SPME纤维进行1 h的预处理。进样口温度:240 °C;检测器温度:250 °C;DB-WAX型色谱柱(0.53 mm×30 m×1 μm);柱温箱升温程序:初始温度35 °C,保温3 min,以10 °C/min升温到60 °C,20 °C/min升温到120 °C,40 °C/min升温到220 °C;载气为高纯氮气(N<sub>2</sub>),流速为8 mL/min。

离子色谱(IC)鉴定/分析条件:淋洗液流速1.0 mL/min;电导检测器检测;进样量:25 μL。通过与已知纯化合物的保留时间和标准曲线(相关系数R<sup>2</sup>>0.99)进行鉴别和定量。

#### 1.3.4 数据处理

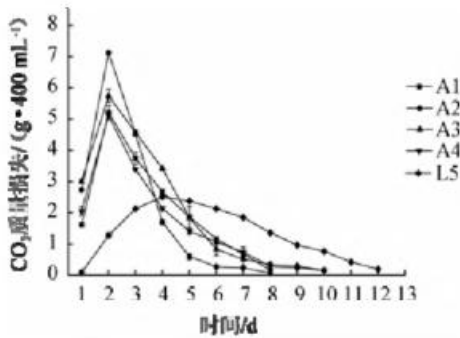
实验数据采用SIMCA 14、Origin 9.5和Microsoft Excel 2019进行数据处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同酵母发酵性能差异对比

#### 2.1.1 降糖能力

麦汁中的主要固形物是糖,麦汁浓度和相对密度随着发酵过程不断下降,可以根据发酵液的每天CO<sub>2</sub>质量损失,判断酵母的降糖能力,通过计算获得降糖量和发酵度的理论值<sup>[14]</sup>。选取4株上面发酵啤酒酵母和1株下面发酵啤酒酵母在12 °P麦汁中发酵,每天定时测定不同酵母发酵液的CO<sub>2</sub>质量损失,绘制酵母的CO<sub>2</sub>质量损失曲线和发酵度变化曲线,结果见图1和图2。

图1 不同酵母啤酒发酵过程中的CO<sub>2</sub>质量损失变化Fig. 1 Changes of CO<sub>2</sub> mass loss during beer fermentation with different yeasts

由图1可知,4株上面啤酒酵母菌株(A1~A4)与下面啤酒酵母菌株L5比较,菌株A1~A4发酵初期产生大量CO<sub>2</sub>,起始发酵速度更快,产生CO<sub>2</sub>量更多,降糖速度也更快,是菌株L5的2倍以上,其中菌株A2的起始发酵速度最快。A1~A4的CO<sub>2</sub>质量损失的峰值均出现在发酵第2天,菌株A1、A2发酵速度较快,CO<sub>2</sub>每日质量损失分别为2.14 g/400 mL、2.16 g/400 mL,菌株A3、A4相较于菌株A1、A2发酵时间更长,菌株A3的CO<sub>2</sub>质量损失总量达20.68 g/400 mL。随着酵母CO<sub>2</sub>质量损失增加,不同的酵母利用糖的机制也不同,随着麦汁中葡萄糖的浓度升高,会抑制酵母细胞分泌麦芽糖渗透酶,酵母无法利用麦芽二糖和麦芽三糖,发酵速度变慢,即“葡萄糖阻遏效应”<sup>[23-26]</sup>。

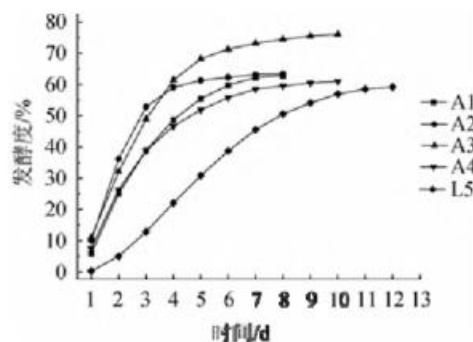


图2 不同酵母啤酒发酵过程中发酵度变化

Fig. 2 Changes of fermentation degree during beer fermentation with different yeasts

由图2可知,发酵结束时,菌株A3的发酵液发酵度最高,代谢糖的能力最强,最高发酵度达80.87%,是一株具有高发酵力的啤酒酵母。与上面发酵相比,L5的起始发酵时间最晚,发酵度最低。随着可发酵性糖的量减少,发酵度越来越高,酒精浓度越来越高,逐渐抑制酵母的生长代谢,当发酵液的外观浓度接近3 °P时,大部分的酵母代谢糖的能力基本达到了极限值,发酵度变化曲线基本趋于平缓。

## 2.1.2 发酵液理化指标

发酵液发酵结束后,对其理化指标进行检测,结果见表2。由表2可知,菌株L5发酵液的发酵度最低,真正浓度最高,下面发酵的发酵程度弱于上面发酵,发酵液的pH值高于上面发酵,双乙酰含量较低,这与下面发酵的发酵温度较低、发酵时间较长有关。在上面发酵的4株酵母中,A3酵母的发酵时间较长,真正发酵度、酒精度都较高,发酵度高达80.87%,对酒精的耐受度高,适用于发酵原麦汁浓度较高的啤酒。而菌株A1、A2、A4的发酵液的理化指标接近,酒精度在5.32%vol~5.39%vol,真实发酵度在67%左右,双乙酰含量在0.07~0.08 mg/L,均在啤酒的风味阈值(0.1 mg/L)之内。不同的酵母菌种具有不同的 $\alpha$ -乙酰羟基合成酶活力,通过选育出适合的酵母菌株,可以降低双乙酰合成的前体物质的生成,从而降低成品啤酒中的双乙酰的含量。

表2 不同酵母发酵液的理化指标

Table 2 Physical and chemical indexes of fermentation broth with different yeasts

理化指标	A1	A2	A3	A4	L5
酒精度/%vol	5.32	5.39	6.96	5.33	5.32
pH值	4.08	3.98	3.96	4.12	4.37
双乙酰/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.085 2	0.070 2	0.103 2	0.076 8	0.032 4
真正浓度/%	4.080	4.295	2.550	4.190	4.480
真实发酵度/%	67.88	67.00	80.87	67.32	65.79
表观发酵度/%	82.27	81.11	98.64	81.53	79.58

## 2.2 不同酵母的发酵液挥发性物质及其差异性分析

在啤酒发酵过程中酵母除了产生酒精、二氧化碳以外,还会生成大量的副产物,这些副产物多为风味物质,如有机酸、高级醇、酯、醛等,这些风味物质构成了啤酒的风味主体<sup>[27]</sup>。其中,高级醇和酯类物质是啤酒丰满口感和丰富香味的主要物质,能够使酒体更加醇厚。酯类物质在啤酒中约有30余种,最重要的仅有几种,以己酸乙酯、乙酸乙酯、乙酸异戊酯为主,高级醇类物质以正丙醇、异丁醇、异戊醇等为主。但是风味物质的含量如果过高,也会破坏酒体的协调性,使得啤酒带有异香或者异味,甚至引发饮酒者的头痛等现象<sup>[28]</sup>。酵母发酵结束后,对发酵液的挥发性风味物质进行检测,结果见表3。

由表3可知,菌株A1~A4的发酵液的总酯含量均>35 mg/L,其中菌株A3的发酵液中的乙酸乙酯、乙酸异戊酯的含量较高,总酯含量高达47.61 mg/L,而下面发酵菌株A5的总酯含量为28 mg/L。啤酒中大部分的风味酯都是在酵母的发酵过程中以乙酰辅酶A和高级醇作为底物并且通过酰基转移酶来合成的,上面发酵的温度更高,生成更多的高级醇转化为酯类物质,符合上面发酵啤酒独特的酯

香醇厚的风格特征<sup>[17,23-25]</sup>。菌株A3、A4发酵液的高级醇含量较高,可能与菌株类型、起始发酵温度较高、麦汁中的氨基酸含量较高等因素有关。其中菌株A3的乙酸乙酯含量高达45.64 mg/L,发酵液的总酯含量高达47.61 mg/L,高级醇含量也最高为178.40 mg/L,这与该菌株的高发酵度有关;菌株A1、A2的发酵液的高级醇、挥发酯的含量均在风味阈值内,该发酵液风味较为协调;菌株A4的发酵液的乙酸乙酯含量较高为34.55 mg/L,给啤酒样品带来独特的水果香气;菌株L5为下面发酵酵母,整体风味物质的含量都较低,符合下面发酵风味单调、清爽的特征。

表3 不同酵母发酵液挥发性风味物质的含量

Table 3 Contents of volatile flavor substances in different yeast fermentation broth

风味物质含量	含量/(mg·L <sup>-1</sup> )				
	A1	A2	A3	A4	L5
乙醛	4.43	3.70	4.61	4.18	7.91
己酸乙酯	0.10	0.12	0.12	0.42	0.11
乙酸乙酯	35.85	36.71	45.64	34.55	26.51
乙酸异戊酯	1.51	1.69	1.85	1.51	1.38
正丙醇	23.01	21.52	38.14	30.93	17.08
异丁醇	24.53	11.58	25.26	41.08	17.17
异戊醇	100.42	109.91	115.00	99.43	68.43
总醇	147.96	143.01	178.40	171.44	102.68
总酯	37.46	38.52	47.61	36.48	28.00
醇酯比	3.95	3.71	3.75	4.70	3.67

把这5种酵母的发酵液挥发性物质的检测值,通过PLS-DA进行监督多变量统计主成分分析,以达到特定的标记化,结果见图3。

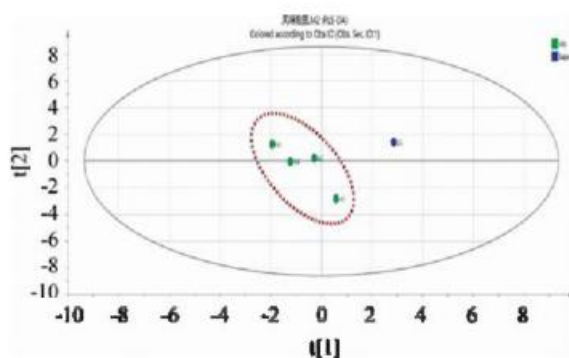


图3 不同酵母发酵液中挥发性风味物质的PLS-DA图

Fig. 3 PLS-DA diagrams of volatile flavor compounds in different yeast fermentation broth

由图3可知,不同菌株类型的啤酒发酵液样品在偏最小二乘得分图上被明显区分开,上面发酵酵母发酵液的菌株A1、A2、A3、A4的样品位置相近,集中在中间区域,而下面发酵的L5样品则距离其他四个样品较远,可以看出上

面发酵与下面发酵的样品在挥发性风味物质上具有很大的差异性。

### 2.3 不同菌株发酵液的有机酸含量分析

啤酒中含有多种酸,约在100种以上,大部分有机酸都具有酸味,酸味与其他的风味成分协调配合,构成了啤酒的风味特征<sup>[26]</sup>。通过离子色谱定性、定量分析发酵液样品的主要有机酸,测定结果见表4。

表4 不同酵母发酵液部分有机酸含量

Table 4 Content of some organic acids in different yeast fermentation broth

有机酸含量	含量/(mg·L <sup>-1</sup> )				
	A1	A2	A3	A4	L5
乳酸	32.51	36.88	39.46	31.64	30.00
乙酸	30.16	33.70	69.28	34.94	29.98
正丁酸	3.28	2.54	1.63	2.38	2.26
丙酮酸	24.56	13.55	12.31	11.38	11.71
苹果酸	56.46	52.10	56.75	44.49	41.29
柠檬酸	20.33	23.22	21.25	21.02	25.48
总酸	167.30	161.99	200.68	145.85	140.72

由表4可知,菌株A1、A2、A3的发酵液中有有机酸总量最高,均>150 mg/L,菌株A4、A5的发酵液中有有机酸含量较低,均在140 mg/L左右,上面发酵法中的有机酸含量一般比下面发酵法的高,并且成品啤酒中的总酸含量也偏高,这与前面分析得到的上面发酵法的pH更低一些的变化趋势是一致的。在5株酵母的发酵液中,菌株A3的乙酸含量最高,有机酸含量最高,这与该菌株在高温发酵时,有着较高的发酵度有着密切关系,随着发酵时间的延长,发酵液中的有机酸类物质不断地积累。菌株A1发酵液的丙酮酸含量偏高,其余3株酵母的发酵液的有机酸含量均在风味阈值内,适当比例的有机酸含量,能为啤酒找到平衡的口味体系。

### 2.4 不同菌株发酵液的发酵风味品评对比

啤酒风味评价通常采用感官品评和风味物质检测相结合的分析方法,感官品评可以直观地反映啤酒的整体风味特征,但是对啤酒品评师的要求较高、品评重复性较差、主观性较强<sup>[27]</sup>。针对这一问题,电子舌目前在啤酒行业针对不同产地、不同风格的啤酒进行定性的分析已经得到了很好的应用。利用电子舌对不同酵母发酵液样品进行酒体滋味分析,包括酸味、苦味、涩味、咸味、后苦味、后涩味、鲜味、丰富度,利用电子舌放大差异,更加敏感地识别样品间的差异。根据不同滋味信号传感器的呈现的响应值,绘制滋味雷达图见图4。

由图4可知,菌株L5发酵液的涩味比较强,但是整体滋味的丰富度不如其他几株菌株发酵液,这也符合上面发

醇法比下面发酵法风味更加丰富的特征,上面发酵的样品中,菌株A3的发酵液酸味、后涩味最强,酒体整体的丰富度也最高;菌株A2的发酵液咸味、苦味、鲜味均较高,口感也较为丰富;菌株A1、A4的发酵液风味较为平均,风味较协调。

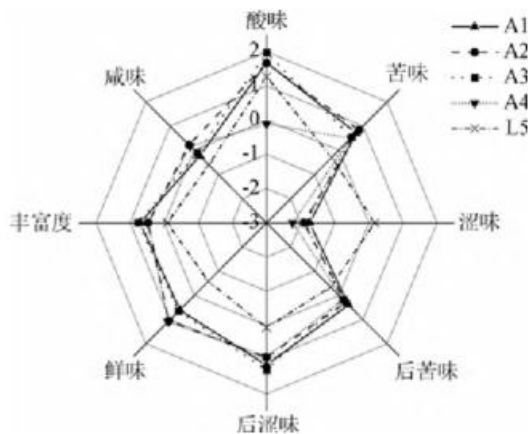


图4 不同酵母发酵液风味品评结果雷达图

Fig. 4 Radar chart of flavour evaluation results of different yeast fermentation broth

### 3 结论

本研究通过在实验室啤酒模拟发酵体系下,对4株上面啤酒酵母菌株和1株下面发酵酵母所酿啤酒的酒精度、pH值、双乙酰、真正浓度、真实发酵度、表观发酵度等理化指标检测,同时采用HS-SPME和IC对不同酵母菌株的发酵液香气成分和有机酸含量进行表征,电子舌对发酵液作滋味评价。结果表明上面发酵啤酒酵母与下面发酵啤酒酵母对啤酒的化学和感官特性具有显著性影响。4株不同的上面发酵啤酒类型酵母可以赋予精酿啤酒不同的风味特征,菌株A1发酵速度快、醇酯比协调;菌株A2发酵时间较短、降糖能力较强,风味协调,口味丰富独特;菌株A3发酵度高达80.87%、高产乙酸乙酯和乙酸异戊酯的上面发酵啤酒酵母,可作为高浓发酵的优势菌株,具有开发新型风味独特的精酿啤酒的潜力;菌株A4发酵能力弱于其他三株酵母,高级醇含量偏高。

### 参考文献:

[1] 杨晋. 浅析我国啤酒企业发展现状及对策[J]. 现代经济信息, 2018(5): 351-352.  
[2] 王蕾, 薛一鸣, 王杰, 等. 中国精酿啤酒现状及发展[J]. 现代食品, 2020(14): 18-20.  
[3] 梁爱家, 史杰, 田启播, 等. 特色精酿啤酒在中国的研究发展现状[J]. 酒·饮料技术装备, 2021, 120(1): 78-79.  
[4] 姜素英. 影响我国精酿啤酒产业发展的因素及策略研究[J]. 食品安全导刊, 2021(6): 77-78.

[5] 张妍. 差异化啤酒酵母的选育和比较[J]. 中外酒业·啤酒科技, 2017, 55(21): 26-32.  
[6] 曹小红, 崔云前, 张林军, 等. 上面酵母酿造特性的研究[J]. 中国酿造, 2010, 29(6): 23-27.  
[7] YU Z M, ZHAO M M, LI H P, et al. A Comparative study on physiological activities of lager and ale brewing yeasts under different gravity conditions[J]. Biotechnol Bioproc Eng, 2012, 17(4): 818-826.  
[8] GRANATO D, BRANCO G F, FARIA J A F, et al. Characterization of Brazilian lager and brown ale beers based on color, phenolic compounds, and antioxidant activity using chemometrics[J]. J Sci Food Agr, 2011, 91(3): 563-571.  
[9] 刘建龙, 刘玲. 上面发酵啤酒的生产[J]. 啤酒科技, 2001(3): 14-15.  
[10] 赵巍. 啤酒酵母的使用控制[J]. 啤酒科技, 2012(8): 51.  
[11] 郭立蓉, 向杰, 郑英健, 等. 一株酿造比利时啤酒酵母菌株的鉴定与性能评价[J]. 中外酒业·啤酒科技, 2019, 101(19): 15-20.  
[12] 魏丽培. 上面发酵活性干酵母发酵特性的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2016.  
[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4928—2008 啤酒分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
[14] 袁静. 酵母管理——发酵效率与啤酒质量的平衡[J]. 啤酒科技, 2002(6): 63-66.  
[15] PERMYAKOVA L V, KISELEVA T F, SERGEEVA I Y. Influence of the yeast aeration method on the quality characteristics of beer[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 640(2): 022034.  
[16] WACHSZKO O, SZPOT P, ZAWADZKI M. The application of headspace gas chromatographic method for the determination of ethyl alcohol in craft beers, wines and soft drinks[J]. Food Chem, 2021, 346: 128924.  
[17] 朱宝生, 刘功良, 白卫东, 等. 耐高糖酵母筛选及其高糖胁迫机制的研究进展[J]. 中国酿造, 2016, 35(6): 11-14.  
[18] 项爱建. 啤酒酵母性能的鉴定试验[J]. 啤酒科技, 2013(10): 22-23.  
[19] 朱怡, 叶美莉, 叶燕锐, 等. 酿酒酵母获得耐性及相关基因转录水平的研究[J]. 现代食品科技, 2009, 25(8): 864-868.  
[20] 冯鹏鹏, 孙丽静, 肖冬光, 等. 啤酒酵母高级醇的代谢与调控研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(8): 153-159.  
[21] 郑虹, 杜可, 韩艳丽, 等. 高产酒精酵母的分离筛选及耐受性的研究[J]. 啤酒科技, 2019, 300(6): 44-48.  
[22] 李莹, 陈延儒, 吴晓江, 等. 适应性进化技术选育优良乙醇耐受性菌株 *Milleromyces farinosus* [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(19): 1-6.  
[23] 崔云前, 叶国超, 魏丽培, 等. 降低上面发酵小麦啤酒头痛感的酿造条件优化[J]. 中国酿造, 2016, 35(5): 134-138.  
[24] 邢宝立, 林智平, 贾凤超, 等. 啤酒有机酸含量的影响因素研究[J]. 中外酒业·啤酒科技, 2016, 21(11): 32-39.  
[25] 张颖婷. 基于电子鼻/舌的啤酒检测研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016.  
[26] 刘佳, 黄淑霞, 余俊红, 等. 基于电子舌技术的啤酒口感评价及其滋味信息与化学成分的相关性研究[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(2): 196-201.  
[27] 张翠, 宋君, 胡淑敏, 等. 啤酒酒体口感研究进展[J]. 中外酒业·啤酒科技, 2019, 97(15): 38-41.