上面发酵高粱啤酒的工艺研究

朱凤娇，陈叶福，王希彬，宋露露，郭学武，肖冬光

（天津市工业微生物重点实验室，天津科技大学生物工程学院，天津 300457）

摘要：高粱啤酒作为一种营养丰富、口感独特的无麸质酒精饮料，具有广阔的发展前景。为研制品质优良的高粱啤酒，本研究以高粱芽为原料，分别对糖化工艺对高粱汁中总还原糖和 α-氨基氮量的影响；发酵工艺对高级醇含量的影响以及发酵后不同澄清剂对高粱啤酒的澄清效果和色度的影响进行了研究。结果表明：高粱汁制备的最佳糖化方法为倾出糖化法，糖化条件为：浸酶温度 35 ℃，浸酶时间 20 min，糊化温度 90 ℃，糊化时间 30 min，糖化温度 65 ℃，糖化时间 1 h，糖化后高粱芽汁的总还原糖含量为 83.23 g/L，α-氨基氮含量适中，为 180.8 mg/L。高粱啤酒的最佳发酵条件为：高粱芽汁浓度 12 °P、酵母菌接种量 2.0×10^7 个/mL、发酵温度 16 ℃，发酵后啤酒中的高级醇含量为 109.09 mg/L，该条件可有效降低高级醇含量。最佳的澄清剂为皂土，当添加比例为 0.9%时，透光率达到 90%，高粱啤酒的澄清效果最佳。在此工艺条件下，酿造出的上面发酵高粱啤酒澄清透明、色泽鲜亮、口感独特，高级醇含量适宜，是一种风味独特的新型酒精饮品。

关键词：高粱啤酒；上面发酵；糖化工艺；发酵工艺；澄清

文章篇号：1673-9078(2017)9-210-216 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.9.031

Study on the Brewing Process of Top-Fermented Sorghum Beer

ZHU Feng-jiao, CHEN Ye-fu, WANG Xi-bin, SONG Lu-lu, GUO Xue-wu, XIAO Dong-guang

(Tianjin Key Laboratory of Industrial Microbiology, College of Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Sorghum beer is a nutrient-rich and gluten-free alcoholic drink with unique taste, and has broad prospects for development. To develop good-quality sorghum beer, sorghum malt was used as a raw material to study the effects of the mashing process on the content of total reducing sugars and α-amino nitrogen in sorghum wort, the effects of fermentation conditions on the production of higher alcohols, and the effects of different clarifiers on the clarity and color of sorghum beer after fermentation. The results showed that the optimal mashing method was decantation, and the detailed process condition was as follows: lixiviation at 35°C for 20 min, pasting at 90°C for 30 min, and saccharification at 65°C for one hour. The content of total reducing sugar in sorghum wort produced by the above techniques was 83.23 g/L, while the content of α-amino nitrogen was moderate and the final content was 180.8 mg/L. The optimum fermentation conditions were determined as follows: sorghum wort concentration: 12 °P, the quantity of inoculated yeast: 2.0×10^7 cells/mL, fermentation temperature: 16°C. The content of higher alcohols was 109.09 mg/L in sorghum beer, and these fermentation conditions could effectively reduce the content of higher alcohols. In addition, the best clarifier was bentonite, and when the proportion of added clarifier was 0.9%, the light transmittance was 90% and the best clarification effect of sorghum beer was achieved. Under this brewing condition, the top-fermented sorghum beer obtained was clear, had a bright color, unique taste, and moderate content of higher alcohols, and was a new type of alcoholic beverage with a unique flavor.

Key words: sorghum beer; top fermentation; saccharification; fermentation process; clarification

高粱（*sorghum*）是一种无麸质谷物，含有蛋白质、铁、镁、硒和膳食纤维等营养成分[1]，还含有非淀粉多糖、植物固醇、原花青素和酚酸等多种功能性物质，在食品和饮料方面具有广泛应用。

在非洲，高粱种植广泛，每年有 20%[2]的高粱收成用于啤酒原料。过去，由于高粱发芽过程中形成的酶系活性较低和胚乳细胞壁难以降解等问题以及酿造技术不成熟等原因[3,4]，高粱一般用于酿造混浊性啤酒[5]。目前，国外诸多学者[6,7]经过长期的努力，通过对高粱品种的选育，高粱制芽条件和糖化方法进行研究，得到质量较好的高粱芽，从而使得高粱酿造 Lager 啤酒成为现实，并在非洲和欧洲等国家实现工业化生产。在我国，曾有学者对以高粱作为辅料酿造大麦啤酒进行过研究[10,11]，但以高粱芽为原料酿造啤酒鲜有报道。

收稿日期：2017-03-15

基因项目：国家自然科学基金项目（31671843）

作者简介：朱凤娇（1991-），女，硕士研究生，研究方向：现代酿造技术

通讯作者：陈叶福（1973-），男，博士研究生，教授，博士生导师，研究方向：现代酿造技术

随着生活水平的提高，啤酒消费需求呈现多样化的发展趋势，而国内的啤酒消费主要以下面发酵大麦啤酒为主，口感单一，同质化严重，难以满足消费者对个性化、特色化产品的追求。上面发酵具有发酵温度高、发酵周期较短、泡沫丰富、口味醇厚独特的优势[12]，在我国上面发酵精酿啤酒的发展方兴未艾，市场潜力巨大，且高粱成本低，具有优良的酿造特点，因此上面发酵高粱啤酒的发展前景广阔。此外，以高粱酿造的无麸质啤酒，也可供乳糜泻患者和麸质过敏等特殊消费群体饮用[13,14]。高级醇作为啤酒中主要的风味物质，含量过高会破坏酒体及风味协调，饮后会引起上头等身体不适。有关高粱啤酒的研究[9,15,16]报道，高粱啤酒中高级醇含量较高，而高粱汁中α-氨基氮的含量是影响高级醇生成的主要因素。另外，高粱中含有蛋白质和单宁等酚类物质形成的难溶络合物，导致高粱啤酒的酒体比较浑浊，色泽较深，从而影响高粱啤酒的感官品质。

本研究通过对糖化工艺、发酵工艺的优化以及对澄清剂的选择，达到了控制高粱汁中的α-氨基氮含量，降低高粱啤酒中的高级醇含量，提高澄清度的效果，酿造出口感新颖、风味独特的上面发酵高粱啤酒，为精酿高粱啤酒的生产提供了一定依据，为满足个性化和多元化的啤酒消费需求提供了新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

澳洲高粱，湖北劲酒有限公司提供；上面啤酒酵母（BYS-2）实验室保藏菌株，从 9 株常用上面酵母筛选所得；茚三酮、碘酸钾，天津市四通化工厂；氢氧化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾，天津市北方天医化学试剂厂；果糖，天津市化学试剂一厂；无水乙醇，天津市江天化工技术有限公司；明胶食品级，硅藻土（食品级），天津市天力化学试剂有限公司；皂土（食品级），上海试四赫维化工有限公司；壳聚糖（食品级），山东莱州市海力生物制品有限公司。

Agilent 7890B 气相色谱仪 Agilent HP-INNOWAX 色谱（30 m×320 μm×0.25 μm），美国安捷伦科技有限公司；高效液相色谱仪，美国安捷伦科技有限公司；恒温水浴锅，北京光明医疗仪器；UVmini-1240 紫外分光光度计，岛津仪器（苏州）有限公司；离心机 LD5-2A，北京医用离心机厂；生化培养箱，上海一恒科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 高粱啤酒的工艺流程

酒花　　接种

↓　　↓

高粱芽→粉碎→糖化→过滤→煮沸→冷却→发酵→过滤→澄清→杀菌→成品

1.2.2 高粱制芽工艺

（a）漂洗：在 25 ℃下，使用 0.2% NaOH 溶液浸泡高粱 8 h，使用流动的水清洗 5 次。

（b）浸泡：继续浸泡 8 h，空气休止 2 h，再浸泡 16 h，使得高粱籽粒充分吸收水分，水分达到 43%~47%。

（c）发芽：30 ℃发芽 5 d，每天翻麦两次，喷淋加水。

（d）干燥：50 ℃鼓风干燥 24 h，除去根芽。

1.2.3 高粱芽糖化工艺

（a）浸出糖化法：将干燥去芽的高粱芽在粉碎机中粉碎，粉碎后的高粱芽以料水比 1:4 的比例与水混合，65 ℃糖化 1 h，其间不断搅拌，过滤得高粱汁[9]。

（b）倾出糖化法：将粉碎后的高粱芽以料水比 1:4 的比例与水混合，在一定温度下水浴浸提 30 min，将含有高粱芽中各种酶的上清液倾出，剩余固形物加热至一定温度，糊化 30 min，然后降温至 65 ℃，将上清液倒回，在 65 ℃下糖化 1 h，过滤得高粱汁。

1.2.4 高粱啤酒发酵工艺

将一定浓度的高粱芽汁调成 pH 5.5 左右，按一定接种量接入上面啤酒酵母，于一定温度条件下发酵，失重基本不变后，结束发酵。

1.2.5 澄清剂的制备[17]

2%明胶溶液：称取 2.0000 g 明胶，加入 100 mL 容量瓶中，加入 10 mL 去离子水，浸泡 24 h 之后，再加入去离子水定容至 100 mL，40 ℃水浴加热溶解，取出冷却后，定容至刻度线；2%皂土悬浊液：称取 2.0000 g 皂土于烧杯中，用 10 倍去离子水浸泡 24 h 后，转移到容量瓶中定容至 100 mL；

2%壳聚糖溶液：称取 1.0000 g 柠檬酸至 200 mL 烧杯中，加入 98 mL 去离子水溶解，再加入 2 g 壳聚糖，加热煮沸至完全溶解，冷却后转移到容量瓶定容至 100 mL；

2%硅藻土溶液：称取 2 g 硅藻土，用 98 mL 水浸泡 24 h，充分吸水膨胀后，搅拌均匀备用。

1.2.6 高粱啤酒的澄清

取高粱啤酒 200 mL，分别按不用的添加比例向啤

酒中加入 2%壳聚糖溶液，2%硅藻土溶液，2%明胶溶液和 2%皂土悬浊液，摇匀后处理 24 h，离心，过滤后测定透光率和色度。

1.2.7 检测方法

1.2.7.1 理化指标

α-氨基氮的测定[18]；还原糖的测定[19]；酒精度、原麦汁浓度、双乙酰测定[20]；澄清度的测定，色度的测定[21]。

1.2.7.2 风味物质测定

气相色谱法，GC 的检测条件：Agilent HP-INNOWAX 色谱柱（30 m×320 μm×0.25 μm）；载气为高纯氮气（>99.999%）；柱流速为 0.8 mL/min；进样口温度 200 ℃；检测器温度 150 ℃；程序升温：起始温度 50 ℃，保持 8 min，以 5 ℃/min 升至 150 ℃，保持 15 min；进样体积为 1 μL；分流进样，分流比为 10:1。

1.2.8 数据统计分析

所有试验数据均进行 3 次平行测定，结果以平均值±标准偏差表示，采用 Excel 2016 软件对试验所得数据进行统计分析处理，并采用 origin 9.0 作图软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 高粱芽糖化工艺的确定

通过制芽工艺制得糖化力为 33 °L，无水浸出率为 70.2%，α-氨基氮含量为 252 mg/100 g 的高粱芽，进行后续实验。

2.1.1 糖化方式的确定

表 1 不同糖化方式对高粱芽汁的影响

Table 1 Effect of mashing method on sorghum wort

	浸出糖化法	倾出糖化法		
		80 ℃糊化	90 ℃糊化	100 ℃糊化
浸出率/%	54.10	67.40	71.80	74.50
还原糖/(g/L)	52.23±1.35	79.98±2.23	88.35±2.68	64.71±2.24
α-氨基氮/(mg/L)	173.60±4.46	242.83±10.35	238.54±12.32	193.47±6.43
色泽	浅红	红色	红色	深红

通过浸出糖化法和倾出糖化法（45 ℃浸酶 30 min，分别在 80 ℃，90 ℃和 100 ℃糊化 30 min，65 ℃糖化 1 h）制备高粱芽汁，对高粱芽汁中的 α-氨基氮含量、还原糖含量以及浸出率进行检测，结果如表 1。

由表 1 可得，采用糊化、糖化分离的倾出糖化法制备高粱芽汁比较合适，由于高粱淀粉的淀粉结构紧密，糊化温度高[22]，不宜采用糊化糖化一体的浸出糖化法。倾出糖化过程中，糊化温度越高，浸出率越高，色泽越深，同时还原糖和 α-氨基氮含量越低，可能是两种物质发生美拉德反应所致；糊化温度越低，浸出率和还原糖含量越低，由于淀粉未糊化完全。因此为保证高粱汁中还原糖和氨基氮的含量满足发酵需求，发酵后啤酒色度达到啤酒指标，选择还原糖含量最高，浸出率也较高的 90 ℃糊化的倾出糖化法作为制备高粱汁的糖化方法。

2.1.2 浸酶条件对高粱芽汁中 α-氨基氮含量的影响

倾出糖化法过程中的浸酶阶段，也是蛋白质分解阶段，采用不同温度和时间浸酶，于 90 ℃糊化 30 min，65 ℃糖化 1 h 制备高粱汁，对高粱芽汁的各项指标进行检测，结果如表 2。

表 2 浸酶温度和时间对高粱芽汁中 α-氨基氮含量的影响

Table 2 Effect of extraction temperature on the content of α-amino nitrogen

	35 ℃			40 ℃		
	20 min	30 min	40 min	20 min	30 min	40 min
α-氨基氮/(mg/L)	180.82±6.12	195.03±5.83	202.27±5.13	186.94±5.24	205.36±6.27	210.48±6.84
还原糖/(g/L)	83.23±1.23	84.82±2.35	86.23±1.52	84.00±2.10	86.37±1.20	87.23±2.68
浸出率/%	67	68	69	67	69	69

	45 ℃		
	20 min	30 min	40 min
α-氨基氮/(mg/L)	225.36±7.35	240.45±9.45	241.55±8.93
还原糖/(g/L)	88.23±1.90	88.93±2.83	89.22±1.98
浸出率/%	71	72	72

由表 2 可以看出，在相同的浸酶时间下，浸酶温度越高，α-氨基氮含量越高，这是由于 45 ℃为蛋白酶的最适温度，有利于蛋白质的分解，蛋白酶和淀粉酶的浸出率最高[22]。在相同的浸酶温度下，随着浸酶时间的延长，α-氨基氮含量不同程度的增加。浸酶条件对高粱芽汁的还原糖和浸出率的影响不大，均可达到发酵要求。根据文献[23]报道 α-氨基氮含量应控制在 170~185 mg/L 的范围内，过高或过低，都会使得啤酒中高级醇的含量增加，因此选择浸酶温度为 35 ℃，浸酶时间为 20 min，制得的高粱汁 α-氨基氮含量适中，为 180.8 mg/L。

2.2 高粱啤酒发酵工艺的确定

2.2.1 不同高粱芽汁浓度对啤酒发酵的影响

在 6 °P（低浓）、12 °P（中浓）和 18 °P（高浓）的高粱芽汁中按 1.5×10^7 个/mL 的接种量接入酵母，于 16 ℃发酵。表 3 显示在不同高粱汁浓度的发酵条件下，发酵结束后的各基本发酵参数。由表 3 可以看出，随着高粱芽汁浓度的增加，CO_2 累计失重增加，相应的酒精度也随之提高。18 °P 的高粱芽汁具有较高的营养因子，酵母的生成量有所增加，所以酒精高，而发酵度却较低，这是由于高粱芽汁浓度过高，酒精度产生到一定量时，酵母对酒精度的耐受性降低，从而导致高粱芽汁发酵的不太完全。6 °P 高粱汁发酵后酒精度相对较低。

不同高粱汁浓度的高粱啤酒发酵后，检测高级醇的含量，结果如图 1。

啤酒发酵过程中 75%的高级醇产生来自糖代谢[24]，由图 1 可知，高粱芽汁浓度越高，高级醇的产量越高，这是高浓度的高粱芽汁中酵母增殖级数的增加所致。结合基本发酵指标分析，6 °P 的高粱芽汁发酵较完全，高级醇含量较低，但其他风味物质不够丰富；12 °P 和 18 °P 的高粱芽汁酒精度相当，18 °P 中高级醇含量过高，是 12 °P 的 1.21 倍，导致啤酒品质不佳。综上，控制 12 °P 的高粱芽汁浓度更适合于啤酒酵母的代谢作用，更适合于高粱啤酒发酵。

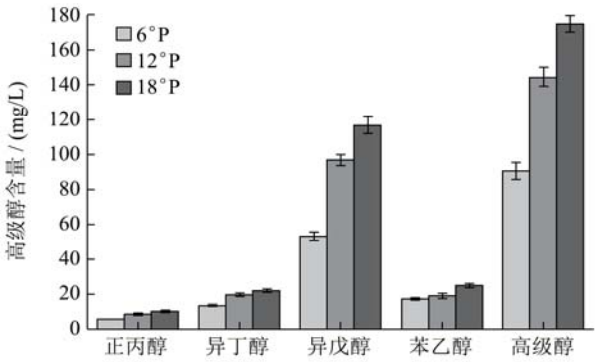


图 1 不同高粱芽汁浓度对高级醇含量的影响

Fig.1 Effects of sorghum wort concentration on the content of higher alcohols

2.2.2 不同酵母接种量对高粱啤酒中高级醇含量的影响

按 0.5×10^7 个/mL、1.0×10^7 个/mL、1.5×10^7 个/mL、2.0×10^7 个/mL 和 3.0×10^7 个/mL 的接种量接入酵母，于 16 ℃发酵。表 4 显示不同酵母接种量的发酵条件下，发酵结束后的各基本发酵参数。表 4 可以看出，当接种量增加到 1.0×10^7 个/mL 时，酒精度由 5.76%（*V*/*V*）增加到 6.13%（*V*/*V*），增幅相对较大，继续增加接种量，酒精度和发酵度等差别不大。由此可以看出，接种量对酵母的基本发酵指标影响不大。

表 3 不同高粱芽汁条件下高粱啤酒的基本发酵指标

Table 3 Basic fermentation parameters of sorghum beer by different sorghum worts

高粱芽汁浓度/°P	CO_2 累积失重/g	酒精度/(%，*V*/*V*)	残还原糖/(g/L)	真正发酵度/%
6	3.70±0.16	3.35±0.20	7.70±0.41	63.29
12	6.60±0.35	5.97±0.32	6.20±0.28	69.93
18	7.95±0.37	6.55±0.33	32.65±1.2	60.10

表 4 不同酵母接种量条件下高粱啤酒的基本发酵指标

Table 4 Basic fermentation parameters of sorghum beer by different inoculation quantities

接种量/(个/mL)	CO_2 累积失重/g	酒精度/(%，*V*/*V*)	残糖/(g/L)	真正发酵度/%
0.5×10^7	6.21±0.12	5.76±0.02	6.80±0.09	68.25
1.0×10^7	6.56±0.15	6.13±0.12	5.70±0.13	70.39
1.5×10^7	6.53±0.30	6.11±0.09	5.85±0.10	70.21
2.0×10^7	6.55±0.25	6.19±0.17	5.55±0.21	70.42
3.0×10^7	6.68±0.14	6.24±0.27	5.35±0.16	70.62

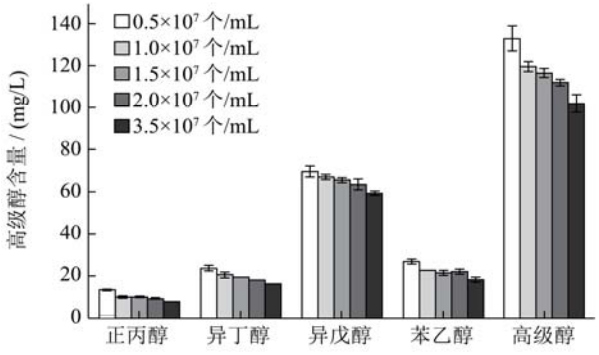


图 2 不同接种量对高级醇含量的影响

Fig.2 Effect of inoculation quantity on the content of higher alcohols

不同酵母接种量的高粱啤酒发酵后，检测高级醇的含量，结果如图 2。有研究表明[25]高级醇是酵母合成细胞蛋白质的副产物，发酵过程中酵母的增殖倍数越大，高级醇的生成量越高。由图 2 可以看出，在一定范围内，随着酵母接种量的增加，啤酒中高级醇的含量逐渐减少，这是由于加大酵母接种量，相应地减少新生酵母的数量，则高级醇产量越低。但酵母接种量也不宜过大，要控制发酵的旺盛时期酵母的细胞数小于 6×10^7 个/mL，这样可较好的保证高级醇的含量适量且保证啤酒风味[19]。综上，控制酵母接种量为 2.0×10^7 个/mL，有利于啤酒发酵，高级醇的产量适中。

2.2.3 不同发酵温度对高粱啤酒中高级醇含量的影响

表 5 不同发酵温度条件下高粱啤酒的基本发酵指标

Table 5 Basic fermentation parameters of sorghum beer by different fermentation temperatures

温度/℃	CO_2 累积失重/g	酒精度/(%，*V/V*)	残糖/(g/L)	真正发酵度/%
16	6.6±0.06	6.10±0.12	5.85±0.32	71.33
18	6.4±0.15	6.02±0.20	6.15±0.24	71.39
20	6.5±0.12	6.15±0.14	5.60±0.15	72.34
22	6.8±0.21	6.31±0.32	5.15±0.25	73.21
24	7.0±0.19	6.42±0.17	5.00±0.16	73.42

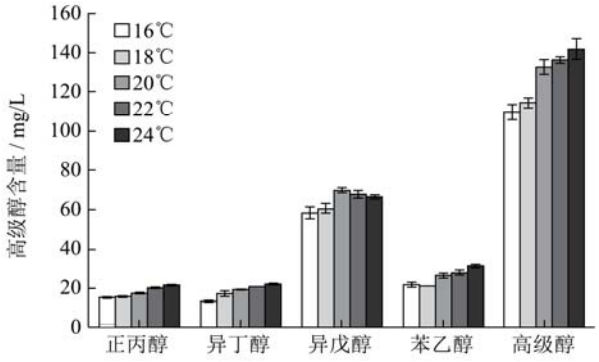
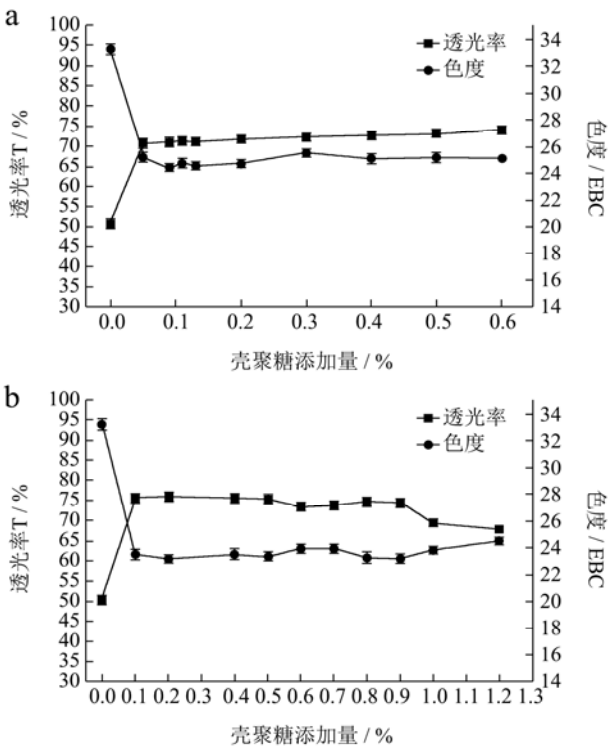


图 3 不同发酵温度对高级醇含量的影响

Fig.3 Effect of fermentation temperature on the content of higher alcohols

在 12 °P 的高粱芽汁中按 2.0×10^7 个/mL 的接种量接入酵母，分别于 16 ℃、18 ℃、20 ℃、22 ℃和 24 ℃的温度发酵。由表 5 可以看出，各温度条件下发酵后的酒精含量和真正发酵度差别不大，分别均在 6%左右和 73%左右，说明发酵温度对酵母基本发酵指标的影响较小。不同发酵温度的高粱啤酒发酵后，检测高级醇的含量，结果如图 3。由图 3 可以看出，随着温度的升高，高级醇产生量逐渐增多，发酵温度由 16 ℃升高到 18 ℃时，高级醇的产生量由 109.09 提高到 141.18 mg/L。这是由于啤酒中 80%的高级醇主要产生在发酵的酵母繁殖阶段，即主酵的前 3 d[26]，主发酵温度越高，酵母繁殖越旺盛，高级醇的生成量越高。可见发酵温度对高级醇的生成具有重要的影响综上，结合上面酵母的发酵温度为 15 ℃~25 ℃，在酒精含量相当的情况下，选择 16 ℃为高粱啤酒的发酵温度，高级醇的生成量相对较低，为 109.09 mg/L。

2.3 不同澄清剂对高粱啤酒澄清效果的影响



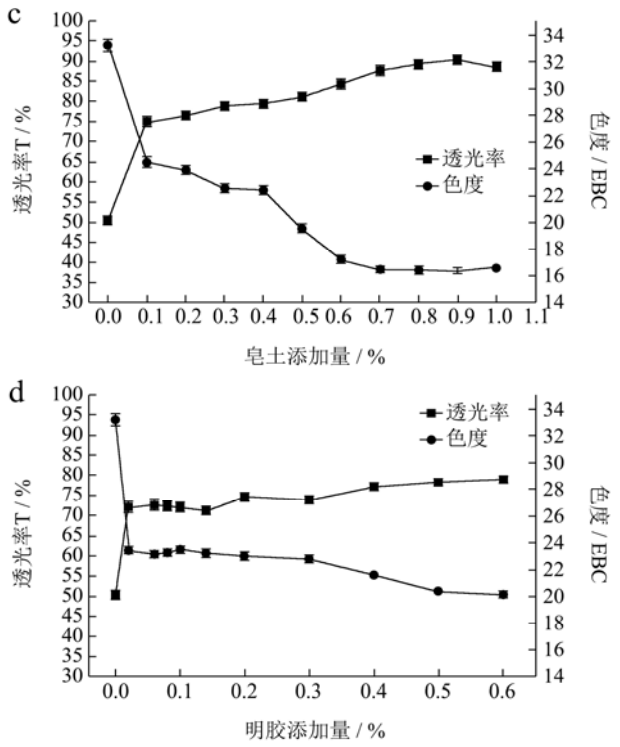


图 4 不同澄清剂添加量对高粱啤酒透光率和色度的影响

Fig.4 Effect of different amounts of added clarifiers on the clarity and color of sorghum beer

注：a 表示壳聚糖；b 表示硅藻土；c 表示皂土；d 表示明胶。

按不同的添加比例，分别向高粱啤酒中加入壳聚糖溶液，硅藻土溶液，明胶溶液和皂土悬浊液，摇匀后处理 24 h，离心，过滤后测定透光率和色度。结果如图 4。由图 4 可以看出，皂土添加比例为 0.9%时的透光率最高，由 50%提高到 90%，色度最低，由 33EBC 降至 16EBC，澄清效果最为理想，其他三种澄清剂的透光率相对较低。皂土经吸水膨胀后形成带负电荷的胶体悬浮液，与酒中蛋白质等带正电荷的混浊物形成絮状沉淀。与其他澄清剂对比，皂土对酒中的色素物质和混浊细小颗粒的吸附作用较大[27]。所以选择皂土作为高粱啤酒的澄清剂，添加比例为 0.9%。

2.4 质量指标

2.4.1 感官指标

制得高粱啤酒呈橘黄色，色泽均匀一致，滤后清亮透明，无明显悬浮物或沉淀物。泡沫洁白、细腻，泡沫较持久，酸、苦适中，杀口力较强，具有水果香味，无异杂味。

2.4.2 理化指标

对高粱啤酒的理化指标进行检测，结果见表 6。由表 6 可以看出，高粱啤酒和大麦啤酒相比，色度较深，其他各项理化指标基本相同。

表 6 高粱啤酒的理化指标

Table 6 Physicochemical index of sorghum beer

高级醇/(mg/L)	双乙酰/(mg/L)	酒精度/(%，*V/V*)	原麦浓度/°P	真正发酵度/%	总酯/(mg/L)	总酸/(mL/100 mL)
109.09	0.11	6.20	12	79.21	15.6	2.1

3 结论

本文采用上面发酵酵母制备上面发酵高粱啤酒，对制备高粱汁的倾出糖化工艺中的糊化温度、蛋白质休止温度和蛋白质休止时间进行优化，确定最佳糖化工艺为浸酶温度 35 ℃，浸酶时间 20 min，糊化温度 90 ℃，糊化时间 30 min，糖化温度 65 ℃，糖化时间 1 h，使得糖化后高粱汁的 α-氨基氮含量由最初的 240 mg/L 降至 180.8 mg/L，总还原糖含量为 83.23 g/L；对高粱啤酒的发酵条件进行优化，确定最佳发酵条件为高粱芽汁浓度 12 °P、酵母菌接种量 2.0×10^7 个/mL、发酵温度 16 ℃，发酵结束后，高级醇含量由 150 mg/L 降至 109.09 mg/L；4 种澄清剂中，皂土的澄清效果最好，以 0.9%的添加比例最佳，透光率可达到 90%，色度降为 16EBC。酿造的高粱啤酒风味优质，杀口力强，口感独特。

参考文献

[1] 杨月欣,王光亚.中国食物成分表[M].北京:北京大学医学出版社,2002

YANG Yue-xin, WANG Guang-ya. Chinese food ingredients [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2002

[2] Nout M J R, Davies B J. Malting characteristics of finger millet, sorghum and barley [J]. Journal of the Institute of Brewing, 1982, 88(3): 157-163

[3] Glennie C W. Endosperm cell wall modification in sorghum grain during germination [J]. Cereal Chemistry, 1984, 61(4): 285-289

[4] Agu R C, Palmer G H. α-Glucosidase activity of sorghum and barley malts [J]. Journal of the Institute of Brewing, 1997, 103(1): 25-29

[5] Aisien A O, Muts G C J. Micro-scale malting and brewing studies of some sorghum varieties [J]. Journal of the Institute of Brewing, 1987, 93(4): 328-331

[6] Agu R C, Palmer G H. The effect of temperature on the modification of sorghum and barley during malting [J]. Process Biochemistry, 1997, 32(6): 501-507

[7] Dewar J, Taylor J R N, Berjak P. Determination of improved

steeping conditions for sorghum malting [J]. Journal of Cereal Science, 1997, 26: 129-136

[8] Ogbonna A C. Current developments in malting and brewing trials with sorghum in Nigeria: a review [J]. Journal of the Institute of Brewing, 2011, 117(3): 394-400

[9] Igyor M A, Ogbonna A C, Palmer G H. Effect of malting temperature and mashing methods on sorghum wort composition and beer flavor [J]. Process Biochemistry, 2001, 36(11): 1039-044

[10] 刘林,徐宝权.以米为辅料生产淡色啤酒的研究[J].辽宁食品与发酵,1996,2:21-26
LIU Lin, XU Bao-quan. Study on production of light beer with sorghum rice as adjunct [J]. Liaoning Food and Fermentation, 1996, 2: 21-26

[11] 宋延忱,于洪俊,沈宪锋,等.高粱米辅料外加酶法酿制啤酒技术的研究[J].辽宁食品与发酵,1996,4:40-43
SONG Yan-chen, YU Hong-jun, SHEN Xian-feng, et al. Study on the brewing technology of rice flour by adding enzyme to sorghum rice [J]. Liaoning Food and Fermentation, 1996, 4: 40-43

[12] 单连菊,许瑶,林艳.酯酶对上面发酵啤酒乙酸酯类的影响[J].酿酒科技,2000, 99(3):63-64
SHAN Lian-ju, XU Yao, LIN Yan. Effect of esterase on acetic acid esters of top-fermented beer [J]. Liquor-Making Science and Technology, 2000, 99(3): 63-64

[13] Fera T, Cascio B, Angelini G, et al. Affective disorders and quality of life in adult coeliac disease patients on a gluten-free diet [J]. European Journal of Gastroenterology & Hepatology, 2003, 15(12): 1287-1292

[14] Hager A S, Taylor J P, Waters D M, et al. Gluten free beer-a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 36(1): 44-54

[15] Chiba Y, Bryce J H, Goodfellow V, et al. Effect of germination temperatures on proteolysis of the gluten-free grains sorghum and millet during malting and mashing [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(40): 10147-54

[16] Roger D D, Venassius L, Justin E N J, et al. Processing of Amgba: A sorghum-maize based beer, brewed in Cameroon [J]. Journal of Brewing and Distilling, 2013, 4(1): 11-18

[17] 范艳丽,陈彦霖.不同澄清剂对枸杞酒的澄清效果及非生物稳定性的影响[J].中国酿造,2008,18:27-29
FAN Yan-li, CHEN Yan-lin. Study on the clarification effects of different clarifiers and the influence to the non-biological stability of medlar wine [J]. China Brewing, 2008, 18: 27-29

[18] 严加伟.啤酒分析手册[M].北京:北京轻工业出版社,1996
YAN Jia-wei. Beer analysis handbook [M]. Beijing: Beijing Light Industry Press, 1996

[19] 李雪梅,杨俊慧,张利群,等.还原糖测定方法的比较[J].山东科学,2008,21(2):18-20
LI Xue-mei, YANG Jun-hui, ZHANG Li-qun, et al. Comparisons of determination approaches of reducing sugar [J]. Shangdong Science, 2008, 21(2): 18-20

[20] GB/T4928-2001,啤酒分析方法[S]
GB/T4928-2001, Method for analysis of beer [S]

[21] 罗安伟,刘兴华,寇莉苹,等.澄清剂在猕猴桃干酒中的应用[J].食品与发酵工业,2003,29(10):105-108
LUO An-wei, LIU Xing-hua, KOU Li-ping, et al. Application of clarifiers in kiwi dry wine [J]. Food and Fermentation Industries, 2003, 29(10): 105-108

[22] 周广田.现代啤酒工艺技术[M].北京:化学工业出版社,2007
ZHOU Guang-tian. Modern beer technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007

[23] 马桂亮,梁会仙,李美.浅谈冷却麦汁中 α-氨基氮的最适含量[J].食品与发酵工业,2000,26(5):86-87
MA Gui-liang, LIANG Hui-xian, LI Mei. Discussion on the optimum content of α-amino ammonia in cooling wort [J]. Food and Fermentation Industries, 2000, 26(5): 86-87

[24] 张克旭,陈宁.代谢控制发酵[M].北京:中国轻工业出版社,1998
ZHANG Ke-xu, CHEN Ning. Metabolic control fermentation [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998

[25] 崔云前,周静.啤酒中高级醇的影响因素及降低其含量的措施[J].酿酒科技,2006,2006(1):76-79
CUI Yun-qian, ZHOU Jing. The influencing factors of higher alcohols in beer and the solution to reduce higher alcohols content [J]. Liquor-Making Science and Technology, 2006, 2006(1): 76-79

[26] Eden A, Nedervelde L V, Drukker M, et al. Involvement of branched-chain amino acid amino transferases in the production of fusel alcohols during fermentation in yeast [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, 55(3): 296-300

[27] 李艳敏,赵树欣.不同酒类澄清剂的澄清机理与应用[J].中国酿造,2008,27(1):1-5
LI Yan-min, ZHAO Shu-xin. Mechanism and application of various clarifiers in alcoholic drink [J]. China Brewing, 2008, 27(1): 1-5