

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2026.80016

基于酱香大曲酵母菌群强化麸曲的制备及其发酵特性研究

卫春会¹ 徐子恒¹ 应超¹ 赵欢² 任志强¹

(1. 四川轻化工大学酿酒科学与技术四川省重点实验室, 四川 宜宾 644000; 2. 四川省文君酒厂有限责任公司, 四川 邛崃 611500)

摘要: [目的] 解决酵母麸曲菌种单一、发酵功能薄弱及环境耐受性不强的问题。[方法] 以酱香大曲酵母菌群为菌种源、麸皮为原料, 制备功能强化的多酵母混合麸曲。通过单因素试验结合正交试验优化酵母麸曲制备工艺条件, 系统评估其耐酸、耐乙醇、耐高温性能, 采用 ITS rDNA 高通量测序分析菌群结构。[结果] 最优工艺参数为水分体积分数 45%、培养时间 48 h、菌液接种量 5%。该条件下制备的酵母麸曲酵母数达 7.98×10^9 CFU/g, 较传统酱香大曲的提升两个数量级, 差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。该麸曲在高酸、高乙醇及高温环境中可维持较好生长活性, 菌群纯度较高, 成功富集扣囊复膜酵母属 (*Saccharomycopsis*) 与酿酒酵母属 (*Saccharomyces*)。[结论] 利用酱香大曲酵母菌群可制备出酵母生物量高、发酵功能强、环境适应性好的多酵母混合麸曲。

关键词: 酱香大曲; 多酵母混合麸曲; 酵母; 耐受性

Preparation and fermentation characteristics of Fuqu fortified by yeast community based on Jiangxiang Daqu

WEI Chunhui¹ XU Ziheng¹ YING Chao¹ ZHAO Huan² REN Zhiqiang¹

(1. Brewing Science and Technology Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin, Sichuan 644000, China; 2. Wenjun Distillery Co., Ltd., Qionglai, Sichuan 611500, China)

Abstract: [Objective] To solve the problems of single strain, limited fermentation capability, and weak environmental tolerance of yeast Fuqu. [Methods] The yeast community of Jiangxiang Daqu is utilized as the strain source, and bran is used as the raw material to prepare a multi-yeast mixed Fuqu with fortified function. The preparation conditions of yeast Fuqu are optimized by single factor tests combined with orthogonal tests. Then, the acid, ethanol, and high-temperature resistance are systematically evaluated, while the microbial community structure is analyzed via internal transcribed spacer (ITS) rDNA high-throughput sequencing. [Results] The optimal process parameters are a moisture content of 45%, an incubation time of 48 h, and an inoculum size of 5%. Under these conditions, the yeast count in the fortified Fuqu reaches 7.98×10^9 CFU/g, which is two orders of magnitude higher than that of the traditional Jiangxiang Daqu ($P < 0.05$). Maintaining robust growth activity in high-acid, high-ethanol, and high-temperature environments, the Fuqu, with high microbial community purity, successfully enriches *Saccharomycopsis* and *Saccharomyces*. [Conclusion] The multi-yeast mixed Fuqu with high yeast biomass, strong fermentation function, and potent environmental adaptability can be prepared using the yeast community of Jiangxiang Daqu.

Keywords: Jiangxiang Daqu; multi-yeast mixed Fuqu; yeast; tolerance

基金项目: 四川省中央引导地方科技发展专项项目 (编号: 2024ZYD0252); 四川省科技创新创业苗子工程项目 (编号: 2023JDRC0116)
通信作者: 任志强 (1985—), 男, 四川轻化工大学副教授, 硕士研究生导师, 博士。E-mail: renzhiqiang@suse.edu.cn

收稿日期: 2026-01-07 改回日期: 2026-03-11

引用格式: 卫春会, 徐子恒, 应超, 等. 基于酱香大曲酵母菌群强化麸曲的制备及其发酵特性研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 42-49.

Citation: WEI Chunhui, XU Ziheng, YING Chao, et al. Preparation and fermentation characteristics of Fuqu fortified by yeast community based on Jiangxiang Daqu[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 42-49.

酱香白酒是中国传统蒸馏酒的代表性品类,不仅承载着深厚的酿酒文化,更凭借“古法自然、天人合一”的固态发酵工艺,形成了风味丰富、口感温和的独特品质,在国内酒类市场占据重要地位,年产量超 6×10^8 L,是中国酿酒工业的核心经济与文化产品^[1]。而制曲作为酱香白酒酿造的“动力核心”,其品质直接决定酒醅发酵的走向,酒曲中微生物群落的组成、活性,及其分泌的淀粉酶、糖化酶等代谢酶类,会通过长周期、多轮次的固态发酵,与原料成分相互作用,最终影响白酒的出酒率、风味复杂度与酒体稳定性^[2]。目前,酱香白酒生产中常用的酒曲主要分为大曲与麸曲两类,二者在制备工艺与应用效果上各有特点,却也分别存在待解决的问题。

传统酱香大曲虽然风味贡献突出,但生产周期长达数月,发酵技术门槛高,且因菌群结构复杂,对酿酒师经验依赖性强,难以满足规模化生产的效率需求^[3];相比之下,麸曲制作简单、周期短,逐渐成为替代选择^[4-5],但传统麸曲多采用单一菌种制备,导致发酵过程中生成的风味物质种类有限,同时白酒稳定性与可控性较差,制约酒体品质提升^[6-7]。

现有研究在麸曲优化方面有所探索,如张家辉等^[8]从浓香型大曲中分离扣囊复膜酵母制备具产乙醇、产酯、产酸和产淀粉酶能力的麸曲。黄治国等^[9]采用扣囊复膜酵母与根霉制备混菌麸曲,应用于清香型白酒酿造后,显著提升了酒酯酸度及乙酸乙酯、乳酸乙酯含量;杜鑫^[10]将纯种菌按比例混合制曲,所产白酒酱香突出、香气幽雅。但上述研究均以单一菌株或少数纯种菌为核心,尚未涉及从酱香大曲中富集天然酵母菌群并用于麸曲制备,难以充分适配酱香白酒发酵的复杂环境。

试验拟以酱香大曲中的酵母菌群为菌种来源,通过优化传代次数获取高效富集酵母菌液,结合单因素与正交试验确定酵母麸曲最佳制备工艺;系统开展耐酸、耐乙醇、耐高温试验,评估其环境适应性;并利用 ITS rDNA 高通量测序解析酵母菌群结构,旨在建立一套基于酱香大曲酵母菌群的强化麸曲制备方法,以期获得在酵母生物量、发酵活性和环境耐受性上均显著优于传统麸曲的强化接种剂,为麸曲工艺和酱香白酒生产的创新提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大曲样品:采集于贵州某酱香酒厂的制曲车间;

麸皮:市售;

麦芽浸粉、酵母浸粉、蛋白胨、无水葡萄糖:成都市科隆化学品有限公司;

硫酸、氢氧化钠、碘等:成都艾科达化学试剂有限公司;

多功能粉碎机:1000A型,永康市红太阳机电有限公司;

电子分析天平:CP214型,上海奥豪斯仪器有限公司;

高速离心机:5430R型,Hettich公司;

电热恒温干燥箱:DHG型,上海齐欣科学仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-1200型,上海美普达仪器有限公司;

恒温培养振荡器:D2403型,上海智城分析仪器制造有限公司;

电热恒温干燥箱:LS-0610型,上海一恒科仪器有限公司。

1.2 培养基

麦芽汁培养基:蛋白胨4 g,葡萄糖10 g,酵母浸粉3 g,麦芽浸粉10 g,溶于1 L去离子水中,混匀后于121 °C高压蒸汽灭菌20 min^[11]。

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集 酱香型大曲样品采集时,选择酵母含量高的黄曲,分别从3个曲房中随机挑选发酵完成的大曲块。每块大曲进行精确称重;且需经过单独粉碎和充分混合^[12]。

1.3.2 酵母富集液传代培养 称取大曲样品10.0 g,在无菌条件下加入到盛有90 mL灭菌后的麦芽汁培养基中,摇匀,置于摇床(30 °C,120 r/min)中振荡培养24 h,制成第一代酵母富集液^[13]。后续每一代均取上一代的菌液进行接种,控制总体积为100 mL,在相同条件下进行培养。由于大曲样品和菌液酵母含量不同,接种时需保持酵母菌数为 10^6 CFU/mL。

1.3.3 酵母麸曲制作工艺 酵母麸曲制作工艺流程如图1所示。

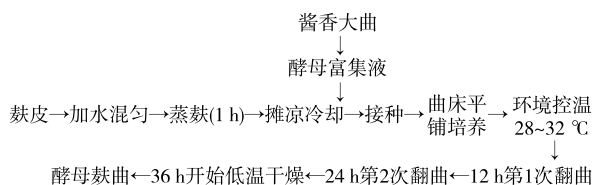


图1 酵母麸曲工艺流程图

Figure 1 Yeast Fuqu production process

操作要点:按照定量称取麸皮原料置于曲床中,根据工艺要求加入无菌水,充分搅拌使麸皮均匀吸水,随后采用蒸汽高温蒸麸1 h。待麸皮摊晾冷却后,接种酵母菌液并充分拌匀,之后开始培养,培养温度控制在28~32 °C。培养过程中,若温度升高需及时进行翻拌,以控制温度稳定。培养结束后,对麸曲进行低温干燥处理,直至麸曲水分体积分数达到6%~12%,烘干后粉碎并密封保存。

备用^[14]。

1.3.4 酵母活菌计数 参照 GB 4789.15—2016。

1.3.5 单因素试验 以酵母数作为评价指标,固定酵母麸曲培养温度 30℃,分别考察水分体积分数(35%,40%,45%,50%,55%,60%)、培养时间(12,24,36,48,60,72 h)以及酵母菌液接种量(1%,2%,3%,4%,5%,6%,7%)对麸曲酵母数的影响^[15]。

1.3.6 正交试验 在单因素试验基础上,以水分体积分数、培养时间和菌液接种量为因素,以麸曲酵母数为指标进行三因素三水平正交试验。

1.3.7 酵母麸曲理化特性测定

(1) 水分:采用烘干法。

(2) 发酵力:通过检测 CO₂ 失重量评估发酵力。

(3) 酯化力:采用皂化回流法。

1.3.8 酵母麸曲微生物发酵环境耐受性评价 基于酱酒酒醅的高酸度与高乙醇环境,结合酵母菌的生理特性,参照周平等^[16]的方法进行酸耐受(初始 pH 值 3.0~7.0)、乙醇耐受(乙醇体积分数 0%~8%)和温度耐受(30~50℃)试验。酵母麸曲经不同耐受条件培养 36 h 后,以紫外分光光度法测定 600 nm 处吸光度值(OD₆₀₀),以此评估不同条件对其微生物生长的影响。

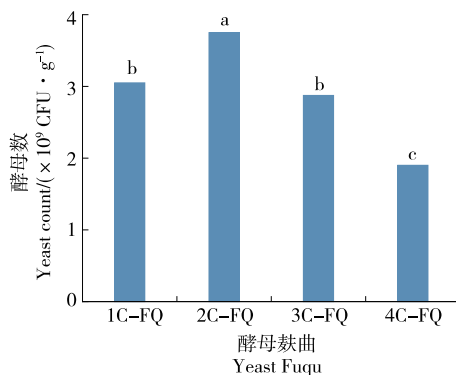
1.3.9 酵母麸曲微生物群落分析 采用改良后的 CTAB 法^[17]提取样品总 DNA,产物送至上海美吉生物技术有限公司进行 ITS rDNA 高通量测序分析。

1.3.10 数据处理 所有试验均平行 3 次,结果以“平均值±标准差”表示。借助 Origin 与 Excel 软件绘制图表,采用 SPSS 19.0 统计分析软件进行方差分析, $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 传代次数对酵母麸曲中酵母数的影响

分析不同传代次数酵母菌群的数量,可以更好地制备高生物量的酵母麸曲,以及后续如何通过调控酵母菌群来优化曲的特性^[18]。由图 2 可知,不同传代次数富集液制备的酵母麸曲的酵母数呈先升后降的趋势($P<0.05$),其中,第 2 次传代富集液制备的酵母麸曲 2C-FQ 酵母数最高,与其他组相比均存在显著差异($P<0.05$)。表明第 2 次传代富集液中酵母菌群已充分适应培养环境,生物活性高,增殖能力强,接种到麸皮基质后能高效利用麸皮中的营养物质快速繁殖;而传代次数进一步增加时,酵母数显著下降,富集液中酵母菌群出现代谢活力衰退,抑制性代谢物可能逐步积累,导致接种后在麸皮中增殖效率下降。丁华建等^[19]研究证明,酵母传代次数增加会逐渐衰老,进而降低发酵能力、影响最终产品质量。综上,确定第 2 代酵母富集液为接种源。



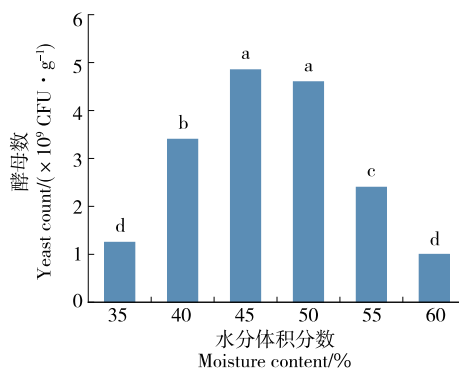
小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 2 不同传代次数对麸曲酵母数的影响

Figure 2 Effect of different passage numbers on yeast count of Fuqu

2.2 单因素试验

2.2.1 水分体积分数对麸曲酵母菌数的影响 由图 3 可知,麸皮水分体积分数变化使麸曲酵母数先显著上升至峰值后快速回落。当水分体积分数为 45% 时,酵母数达最大值,与除 50% 外的其他水分体积分数组均存在显著差异($P<0.05$)。可能是低水分环境造成麸皮营养物质溶解不足,抑制酵母代谢酶活性,减慢增殖速率;当水分体积分数 $>50\%$ 时,麸皮基质透气性变差,酵母增殖效率显著下降。王文洁等^[20]研究发现,酵母在酿酒发酵环境中生长时,水分过多会导致酵母数量减少。综上,正交试验的水分体积分数为 40%,45%,50%。



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 3 水分体积分数对麸曲酵母数的影响

Figure 3 Effect of moisture content on yeast count of Fuqu

2.2.2 培养时间对麸曲酵母数的影响 由图 4 可知,培养时间延长使麸曲酵母数先快速上升至峰值后缓慢回落。培养 24 h 时,酵母数快速增至 3.2×10^9 CFU/g,较 12 h 提升约 10 倍,提示酵母菌进入对数增殖旺盛期;36 h 时达到峰值 5.7×10^9 CFU/g。培养时间 >36 h 后,酵母数逐渐下降,可能因麸皮中可利用营养逐渐耗尽,且酵母菌代谢积

累的乙醇、有机酸等产物抑制自身生长。邱勇等^[21]研究发现,培养时间过长,微生物的转化率和成熟率并无明显提高,反而可能出现菌体老化,菌数下降的现象。综上,正交试验的培养时间为24,36,48 h。

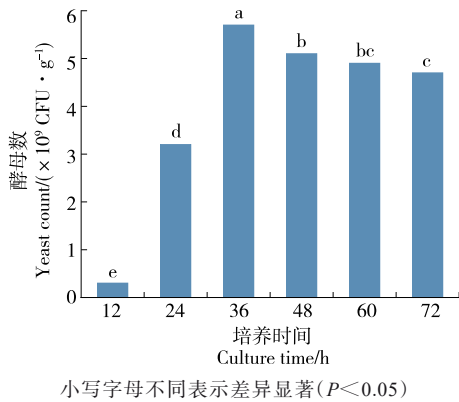


Figure 4 Effect of incubation time on yeast count of Fuqu

2.2.3 菌液接种量对麸曲酵母数的影响 由图5可知,随着酵母富集液接种量提升,麸曲酵母数整体先显著上升至峰值后缓慢回落,且所有接种量组酵母数均达 10^9 CFU/g,说明该接种量范围能满足酵母麸曲基础生物量要求。当菌液接种量为5%时,酵母数达最大值 5.50×10^9 CFU/g,与除4%外的其他菌液接种量组均存在显著差异($P < 0.05$)。当菌液接种量 $>5\%$ 时,酵母数逐步下降,可能因初始菌数过高,导致麸皮中有限碳源、氮源等营养物质快速消耗,且酵母菌代谢产生的乙醇、有机酸等物质局部积累,进而抑制酵母进一步增殖。余安玲等^[22]研究表明,接种量适中时,能促进菌株快速生长繁殖;接种量不足会使酵母增值缓慢,活菌数偏低;接种量过大则会让菌体前期过度生长、密度过高,营养匮乏进而造成活菌数偏低。综上,正交试验的菌液接种量为4%,5%,6%。

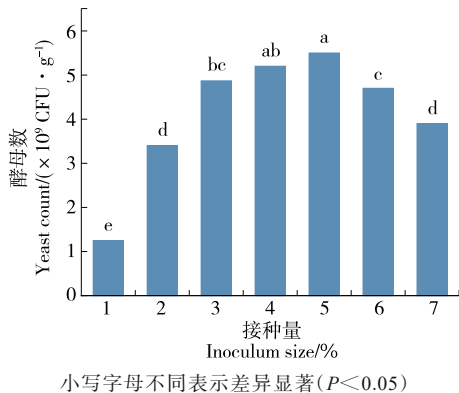


Figure 5 Effect of yeast liquid inoculum amount on yeast count of Fuqu

2.3 正交试验

根据单因素试验结果,以水分体积分数、培养时间、菌液接种量为因素,以酵母数为指标进行三因素三水平正交试验优化酵母麸曲制备工艺。正交试验因素水平见表1,试验设计及结果见表2,方差分析见表3。

Table 1 Factors and levels of orthogonal test			
水平	A 水分体积分数/%	B 培养时间/h	C 菌液接种量/%
1	40	24	4
2	45	36	5
3	50	48	6

Table 2 Design and results of orthogonal test				
试验号	A	B	C	酵母数/ ($\times 10^9$ CFU $\cdot$ g $^{-1}$)
1	1	1	1	5.68
2	1	2	2	6.62
3	1	3	3	6.79
4	2	1	3	7.07
5	2	2	1	7.45
6	2	3	2	7.86
7	3	1	2	6.29
8	3	2	3	6.75
9	3	3	1	6.35
k_1	6.36	6.35	6.49	
k_2	7.46	6.94	6.92	
k_3	6.46	7.00	6.87	
R	1.10	0.65	0.43	

Table 3 Analysis of variance						
来源	离差平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
A	2.206	2	1.103	55.120	0.018	*
B	0.782	2	0.391	19.551	0.049	*
C	0.330	2	0.165	8.236	0.108	
误差	0.040	2	0.020			

† *表示差异显著($P < 0.05$)。

由表2可知,影响麸曲酵母数的因素顺序为水分体积分数 $>$ 培养时间 $>$ 菌液接种量,最优工艺组合为水分体积分数45%、培养时间48 h、菌液接种量5%,此条件下麸曲酵母数为 7.86×10^9 CFU/g。

由表3可知,水分体积分数、培养时间对麸曲酵母数影

响显著($P<0.05$),菌液接种量对麸曲酵母数影响不显著。

2.4 酵母麸曲与酱香大曲理化特性对比

将优化后的酵母麸曲与传统酱香大曲进行关键理化指标对比,结果(表4)发现,酵母麸曲与传统酱香大曲的酯化力无显著差异,表明酵母麸曲在产香功能上与传统大曲保持了一致性。酵母麸曲的酵母数为 7.86×10^9 CFU/g,

发酵力为 $1.43\text{ g}/(0.5\text{ g}\cdot 72\text{ h})$;而酱香大曲的酵母数为 1.05×10^7 CFU/g,发酵力为 $0.5\text{ g}/(0.5\text{ g}\cdot 72\text{ h})$;两者之间呈显著性差异($P<0.05$),表明酵母麸曲在酵母生物量与发酵活性方面均具有显著优势,证明酵母麸曲具备更强的糖酵解与乙醇合成能力,可以作为传统酱香大曲的补充或高效强化剂,应用于酱香型白酒的酿造。

表 4 酵母麸曲与酱香大曲理化指标对比[†]

Table 4 Comparison of physicochemical indicators between yeast Fuqu and Jiangxiang Daqu

组别	水分含量/ $(10^{-2}\text{ g}\cdot\text{g}^{-1})$	酵母数/ $(\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1})$	发酵力/ $[\text{g}\cdot(0.5\text{ g}\cdot 72\text{ h})^{-1}]$	酯化力/ $[(\text{mg}\cdot(0.5\text{ g}\cdot 72\text{ h})^{-1})]$
酵母麸曲	9.90 ± 0.25	$(7.86\pm 0.47)\times 10^9^*$	$1.43\pm 0.07^*$	300.50 ± 2.26
酱香大曲	9.66 ± 0.29	$(1.05\pm 0.09)\times 10^7$	0.50 ± 0.07	308.54 ± 2.58

[†] *表示差异显著($P<0.05$)。

2.5 酵母麸曲环境耐受性评价

2.5.1 初始 pH 值对酵母麸曲中酵母数的影响 由图 6 可知,酵母麸曲中微生物对 pH 值的适应呈中间高两端低的趋势,在 pH 5.0 下生长活性最佳,表明此条件下酵母菌的代谢酶活性和营养吸收率均处于最优状态;在 pH 3.0 下,OD₆₀₀ 值虽降至 0.552,但仍能维持一定生长活性;在 pH 7.0 下,酵母麸曲的生长活性略微下降,OD₆₀₀ 值为 1.801,推测是由于偏离酵母菌适宜的偏酸性生长环境,导致其代谢速率减缓。郑自强等^[23]研究表明,酱香白酒酿造过程中,窖内酒醅因微生物代谢会形成持续的酸性环境,微生物的耐酸能力直接决定其能否在窖内长期保持活性、持续参与发酵。耐酸结果表明,酵母麸曲在偏酸至中性范围内均能保持良好的生长状态,尤其对酱香白酒酿造中的酸性环境具有良好适应性,有助于在发酵过程中维持代谢活性,为提高酒质提供微生物基础。

2.5.2 乙醇体积分数对酵母麸曲中酵母数的影响 由图 7 可知,酵母麸曲在不同乙醇体积分数下表现出一定的适应性与耐受能力。当乙醇体积分数为 2% 时,OD₆₀₀ 值

达到最高,表明该体积分数对酵母生长具有一定促进作用。当乙醇体积分数从 2% 增至 6% 时,微生物生长活性逐步下降,但仍维持较高水平;当乙醇体积分数为 4%~8% 时,OD₆₀₀ 值虽较峰值显著降低($P<0.05$),但也能维持一定生长活性,未出现生长完全停滞的情况。廖娟等^[24]研究表明,*Saccharomyces cerevisia* 能够在乙醇体积分数 3%~7% 时正常生长,在 8% 时生长能力显著降低。耐乙醇结果表明,酵母麸曲中的微生物具备适应高乙醇环境的能力,在酱香白酒发酵后期能保持一定的生理活性。

2.5.3 培养温度对酵母麸曲中酵母数的影响 由图 8 可知,酵母麸曲中微生物生长活性随培养温度的升高呈先维持高活性后显著下降的规律,且在中低温区表现出优异的适配性。当培养温度为 30℃ 时,微生物 OD₆₀₀ 值达到最高,表明该培养温度为最适生长条件,当培养温度为 35℃ 时,微生物生长活性略有下降,但仍维持较高水平;当培养温度>40℃ 时,微生物生长活性显著下降($P<0.05$),此时微生物代谢与增殖能力大幅减弱;当培养温度为 50℃ 时,OD₆₀₀ 值接近 0,表明该培养温度已超出酵母麸

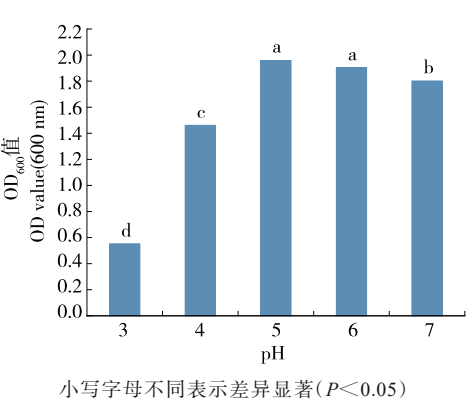


图 6 初始 pH 值对酵母麸曲微生物生长的影响
Figure 6 Effect of initial pH on microbial growth of yeast Fuqu

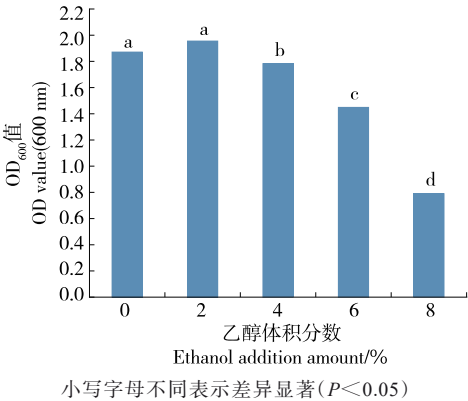
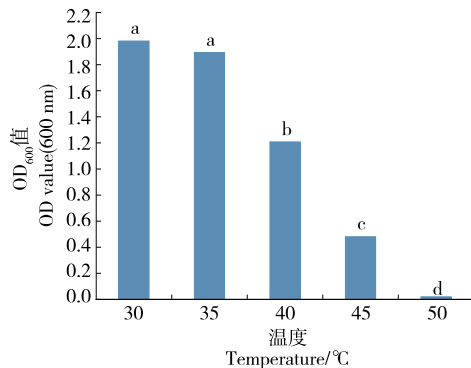


图 7 乙醇体积分数对酵母麸曲微生物生长的影响
Figure 7 Effect of ethanol concentration on microbial growth of yeast Fuqu

曲微生物的耐热阈值,微生物生长活性几乎完全停滞。费文斌等^[25]研究表明,酵母菌种 NR11 随着培养温度的升高,OD₆₀₀ 值逐渐降低,45℃以上酵母菌几乎没有生长。耐高温结果表明,酵母麸曲具备一定的高温耐受性,适配酱酒高温发酵的工艺特点。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图8 培养温度对酵母麸曲微生物生长的影响

Figure 8 Effect of inoculation temperature on microbial growth of yeast Fuqu

2.6 酵母富集液、酵母麸曲与酱香大曲的真菌群落结构对比分析

2.6.1 α -多样性分析 由表5可知,酱香大曲(JXDQ)的OTU数与 α -多样性指数均最高,且高于酵母麸曲,这与传统酱香大曲自然接种、菌群来源广且结构复杂的特性一致。酵母富集液(JMFJ)与酵母麸曲(JMFQ)的OTU数分别降至2和3,Shannon指数极低,表明通过选择性培养与工艺控制,成功地富集了目标酵母并排除了绝大多数杂菌,菌群纯度极高。相比之下,酵母富集液在麦芽汁培养基和恒温振荡培养条件下,实现了对酵母菌的富集,抑制了其他杂菌的生长,因而表现出较低的物种丰富度。

由图9可知,麸曲成功继承了富集液的核心菌群。从酵母富集到酵母麸曲制备的整个流程,由环境压力导致的菌群演替,能够筛选并保留酵母菌群,显著降低酱香大曲中非目标菌群的残留。尤其在由酵母富集液接种至酵母麸曲培养过程中,优势酵母菌群仍能维持其主导地位,验证了试验所构建的制曲工艺对酵母功能菌群具有良好的保持效果。

2.6.2 真菌群落组成 由图10可知,样品中主要的微生物属包括扣囊复膜酵母属(*Saccharomycopsis*)、曲霉属(*Aspergillus*)、嗜热菌属(*Thermomyces*)、酿酒酵母属(*Saccharomyces*)、未分类的双足目属(*unclassified_f_Dipodascaceae*)和热子囊菌属(*Thermoascus*)等。在酱香大曲中,菌群结构复杂,以*Aspergillus*为优势属,相对丰度为51.90%,嗜热菌属相对丰度为15.36%,未分类的双足目属相对丰度为10.37%,热子囊菌属相对丰度为

表5 酱香大曲及酵母麸曲菌群 α -多样性指数

Table 5 α -diversity index of microbial community in Jiangxiang Daqu and yeast Fuqu

样品	OTU	Coverage	丰度指数		多样性指数	
			ACE	Chao	Shannon	Simpson
JXDQ	69	1.00	69	69	2.07	0.25
JMFJ	2	1.00	2	2	0.00	1.00
JMFQ	3	1.00	3	3	0.01	1.00

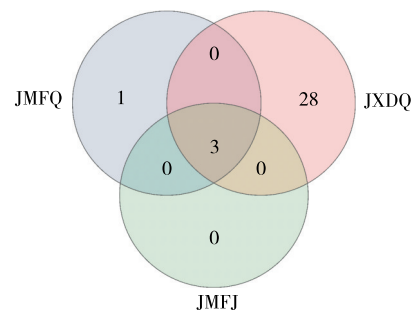


图9 基于属水平真菌群落的 Venn 图

Figure 9 Venn diagram based on fungal community at genus level

7.30%。酱香大曲样品的 Bar 图呈多色均匀分布,与酵母富集液及酵母麸曲形成明显分支,符合传统酱香大曲的特征,反映出传统大曲菌群来源广泛、结构复杂的典型特征^[26-27]。在酵母富集液中,以*Saccharomycopsis*相对丰度90.56%和*Saccharomyces*相对丰度9.40%为绝对优势属,两者合计占比>99%,表明富集过程中,麦芽汁培养基结合恒温振荡培养的选择性富集作用显著,有效实现了目标酵母菌的高效纯化。在酵母麸曲中,以*Saccharomycopsis*相对丰度89.12%和*Saccharomyces*相对丰度10.50%为优势属,说明从富集液接种至麸皮基质进行制曲过程中,目

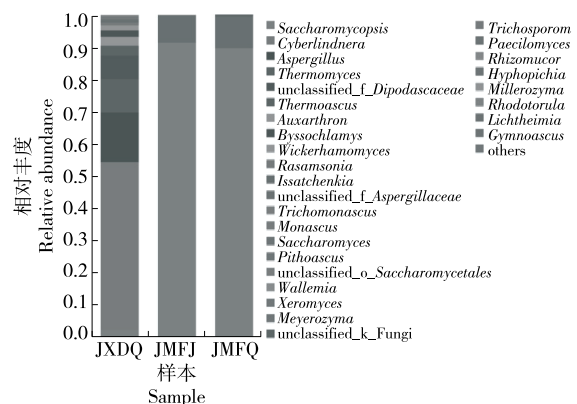


图10 基于属水平真菌群落的相对丰度

Figure 10 Relative abundance of fungal community based on genus level

标酵母菌群结构稳定,工艺未引入显著杂菌污染或导致菌群失衡,这两种菌群的富集对白酒发酵具有重要意义。Zheng 等^[28]研究表明,*Saccharomycopsis* 在白酒酿造中能显著提升酒体中的乙酸乙酯含量并降低高级醇含量,从而改善白酒的风味和品质。李晓欢等^[29]研究表明,*Saccharomyces* 能在高温和高酸环境下保持活性,并在优化的酵母曲制备工艺中,显著提高酵母曲中酵母菌含量,从而增强酵母曲的发酵能力。综上,通过选择性培养基的富集以及制曲工艺,成功将酱香大曲中处于相对丰度较低的 *Saccharomycopsis* 及 *Saccharomyces* 转化为酵母麸曲中的绝对优势菌属。

3 结论

以酱香大曲中酵母菌为菌种来源,成功制备出具有高酵母数和高适配性的强化酵母麸曲。在传代次数优化中,第2次传代的酵母富集液为最优接种源。以酵母数为核心指标,确定最优工艺条件为水分体积分数45%、培养时间48 h、菌液接种量5%,此条件下制备的酵母麸曲性能优异:酵母数 7.98×10^9 CFU/g,较传统酱香大曲提升2个数量级($P < 0.05$);发酵力为 $1.43 \text{ g}/(0.5 \text{ g} \cdot 72 \text{ h})$,较传统酱香大曲显著提高($P < 0.05$)。酵母麸曲保持了与传统大曲相当的酯化力,在酵母数和发酵力上均显著优于传统酱香大曲,表明其具备高效推动糖酵解与乙醇合成的能力。结合酱香白酒发酵环境特性开展的耐受性测试显示,该酵母麸曲在高酸度、高乙醇体积分数及高温条件下仍保持较好生长活性,展现出对酿造环境的良好适应潜力。进一步通过 ITS rDNA 高通量测序分析发现,酵母麸曲中 *Saccharomycopsis* 和 *Saccharomyces* 得到有效保留,菌群纯度较高,非目标菌群干扰较小。后续可进一步研究多酵母混合麸曲与细菌、霉菌麸曲的复配工艺以及对白酒风味物质的影响。

参考文献

- [1] JIN G Y, ZHU Y, XU Y. Mystery behind Chinese liquor fermentation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 63: 18-28.
- [2] SHEN S M, LIU J L, LUO R Q, et al. Analysis of the influence of microbial community structure on flavor composition of Jiang-flavor liquor in different batches of pre-pit fermented grains[J]. Fermentation, 2022, 8(12): 671.
- [3] ZHU Q, CHEN L Q, PENG Z, et al. Analysis of environmental driving factors on core functional community during Daqu fermentation[J]. Food Research International, 2022, 157: 111286.
- [4] YANG J G, DOU X, HAN P J, et al. Microbial diversity in Daqu during production of Luzhou flavored liquor[J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2017, 75(2): 136-144.
- [5] 李容, 卫春会, 黄治国, 等. 辣蓼草对浓香麸曲品质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(9): 186-191, 199.
- LI R, WEI C H, HUANG Z G, et al. Study on the effect of *Polygonum lapathifolium* on the quality of Luzhou-flavor Fuqu [J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 186-191, 199.
- [6] SHEN S M, HU B Y, ZHENG J, et al. Unraveling flavor formation in Jiuqu: source pathways, influencing factors, and regulatory strategies[J]. Food Chemistry: X, 2025, 31: 103009.
- [7] 李明珠, 李渊杰, 侯笑林, 等. 麸曲酱香型白酒酿造工艺研究及微量成分分析[J]. 食品与机械, 2023, 39(9): 183-189.
- LI M Z, LI Y J, HOU X L, et al. Research on brewing technology of bran sauce Baijiu and trace composition analysis [J]. Food & Machinery, 2023, 39(9): 183-189.
- [8] 张家辉, 李玲玲, 海超, 等. 伊力特浓香型大曲中优良酵母菌的分离筛选及麸曲制曲工艺优化[J]. 中国酿造, 2024, 43(7): 110-116.
- ZHANG J H, LI L L, HAI C, et al. Isolation and screening of superior yeasts from Yilite strong-flavor Daqu and optimization of Fuqu-making process[J]. China Brewing, 2024, 43(7): 110-116.
- [9] 黄治国, 刘钊宇, 李彦中, 等. 混菌麸曲制备工艺优化及其在清香型白酒酿造中的应用[J]. 中国酿造, 2025, 44(5): 195-202.
- HUANG Z G, LIU C Y, LI Y Z, et al. Optimization of preparation process of mixed-strain Fuqu and its application in light-flavor Baijiu production[J]. China Brewing, 2025, 44(5): 195-202.
- [10] 杜鑫. 贵州麸曲酱香型白酒采用菌种及制曲工艺特点[J]. 酿酒, 2019, 46(4): 45-47.
- DU X. The strains used in Guizhou bran koji Maotai-flavor liquor making and characters of the koji making process[J]. Liquor Making, 2019, 46(4): 45-47.
- [11] LI R R, XU M, ZHENG J, et al. Application potential of Baijiu non-saccharomyces yeast in winemaking through sequential fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 902597.
- [12] YANG L, CHEN J, LI Z J, et al. Effect of lactic acid bacteria on the structure and potential function of the microbial community of Nongxiangxing Daqu[J]. Biotechnology Letters, 2023, 45(9): 1183-1197.
- [13] 黄亮, 任志强, 邓杰, 等. “麸曲+酒母”模式对丢糟发酵产酒的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 73-79.
- HUANG L, REN Z Q, DENG J, et al. Influence of "koji+barm mash" mode in Baijiu fermentation with distiller's grains[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(11): 73-79.
- [14] 应超, 任志强, 张娟, 等. 酱香型酒醅细菌麸曲制作及工艺优化[J]. 食品科技, 2024, 49(4): 44-52.
- YING C, REN Z Q, ZHANG J, et al. Production and process optimization of Moutai-flavor fermented grains bacterial bran

- koji[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(4): 44-52.
- [15] 刘霄, 黄治国, 卫春会, 等. 扣囊复膜酵母麸曲制备及其在小曲白酒中的应用[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 56-63.
- LIU X, HUANG Z G, WEI C H, et al. Preparation of *Saccharomycopsis fibuligera* Fuqu and its application in the production of *Xiaoqu* Baijiu[J]. Food Science, 2025, 46(1): 56-63.
- [16] 周平, 罗惠波, 黄丹, 等. 中高温大曲中一株耐热力芽孢杆菌耐受性及产酶特性的初步研究[J]. 食品科技, 2016, 41(11): 14-20.
- ZHOU P, LUO H B, HUANG D, et al. Preliminary study of tolerance and enzyme production characteristics of thermotolerant *Bacillus licheniformis* strain in medium/high temperature Daqu[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(11): 14-20.
- [17] DAR G J, NAZIR R, WANI S A, et al. Optimizing a modified cetyltrimethylammonium bromide protocol for fungal DNA extraction: insights from multilocus gene amplification[J]. Open Life Sciences, 2025, 20(1): 20221006.
- [18] DE JESUS CASSIMIRO D M, BATISTA N N, FONSECA H C, et al. Wet fermentation of *Coffea canephora* by lactic acid bacteria and yeasts using the self-induced anaerobic fermentation (SIAF) method enhances the coffee quality[J]. Food Microbiology, 2023, 110: 104161.
- [19] 丁华建, 王金晶, 朱佳琪, 等. 酿酒酵母在传代过程中生理变化研究进展[J]. 生物工程学报, 2018, 34(3): 311-319.
- DING H J, WANG J J, ZHU J Q, et al. Physiological changes of *Saccharomyces cerevisiae* during serial re-pitching: a review [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2018, 34(3): 311-319.
- [20] 王文洁, 马春玲, 刘玉涛, 等. 芝麻香白酒堆积及发酵过程中酒醅理化指标变化的研究[J]. 酿酒科技, 2023(4): 17-21.
- WANG W J, MA C L, LIU Y T, et al. Changes of physicochemical indexes of fermented grains of Zhimaxiang Baijiu during fermentation[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2023(4): 17-21.
- [21] 邱勇, 王颖, 张煨, 等. 高产四甲基吡嗪的菌株筛选及其麸曲制作工艺优化[J]. 中国酿造, 2023, 42(4): 112-117.
- QIU Y, WANG Y, ZHANG W, et al. Strain screening of high-yield tetramethylpyrazine and optimization of its Fuqu process technology[J]. China Brewing, 2023, 42(4): 112-117.
- [22] 余安玲, 张小娜, 李红. 酵母麸曲培养条件优化及其固态发酵应用研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 47-54.
- YU A L, ZHANG X N, LI H. Optimization of yeast Fuqu culture conditions and application in solid-state fermentation [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(11): 47-54.
- [23] 郑自强, 卫春会, 张立伟, 等. 中高温大曲中霉菌的分离及其麸曲制备[J]. 现代食品科技, 2022, 38(1): 165-172.
- ZHENG Z Q, WEI C H, ZHANG L W, et al. Isolation of mold from medium high temperature daqu and preparation of Fuqu [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 165-172.
- [24] 廖娟, 李嘉宇, 黄杰惠, 等. 耐低温酵母的分离鉴定及对低温酿造米酒品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 159-166.
- LIAO J, LI J Y, HUANG J H, et al. Isolation and identification of cold adaptive yeast and its influence on the quality of low temperature brewing rice wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 159-166.
- [25] 费文斌, 雍晓雨, 徐俊, 等. 1株耐热产乙醇酵母的分离、鉴定与性能测试[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(3): 319-322.
- FEI W B, YONG X Y, XU J, et al. Isolation, identification and performance test of a heat-resistant ethanol-producing yeast[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(3): 319-322.
- [26] WEI Y H, WEN Z, YAO S J, et al. Tempo-spatial dynamics of physicochemical properties and microbial communities in high-temperature Daqu during the fermentation process[J]. Food Chemistry: X, 2025, 29: 102815.
- [27] GONG L J, QIN S, ZHENG X R, et al. Traceability between microbial community and environmental microbial community in Maotai-flavor Daqu[J]. Food Chemistry: X, 2025, 27: 102321.
- [28] ZHENG X W, YAN Z, ROBERT NOUT M J, et al. Microbiota dynamics related to environmental conditions during the fermentative production of Fen-Daqu, a Chinese industrial fermentation starter[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 182: 57-62.
- [29] 李晓欢, 何宏魁, 李冬冬, 等. 高耐受酿酒酵母的筛选及酵母曲制备工艺的优化[J]. 酿酒科技, 2020(2): 110-115, 120.
- LI X H, HE H K, LI D D, et al. Screening of *Saccharomyces cerevisiae* strain with high tolerance and optimization of yeast starter preparation process[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2020(2): 110-115, 120.