

董欣睿, 赵鑫磊, 杨崱茜, 等. 预处理方式对米糠酵素品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 150–155. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020040257

DONG Xinrui, ZHAO Xinlei, YANG Yuxi, et al. Effects of Pretreatment Methods on the Quality of Rice Bran Ferment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 150–155. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020040257

· 工艺技术 ·

预处理方式对米糠酵素品质的影响

董欣睿¹, 赵鑫磊^{1, +}, 杨崱茜¹, 江连州², 于殿宇², 包怡红^{1,3, *}

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040;

2. 东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030;

3. 黑龙江省森林食品资源利用重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 为研究经超声、微波、焙烤三种方法处理米糠对发酵后米糠酵素品质的影响, 本文以米糠为原料, 乳酸菌和酵母为发酵菌种, 首先考察了发酵时间、发酵温度、接种比例对米糠酵素中 γ -氨基丁酸 (GABA) 含量和 pH 的影响, 并通过正交实验确定米糠酵素的最优发酵条件; 采用超声、微波、焙烤不同工艺条件处理米糠原料, 比较不同预处理方式对米糠酵素品质的影响。结果表明: 经验证试验确定米糠酵素最优发酵工艺条件为: 发酵时间 24 h、发酵温度 30 ℃、乳酸菌与酵母接种比为 1:2 (接种量为 3%)。超声预处理方法可以显著提高米糠酵素中 GABA 含量 ($P < 0.05$), 微波对 GABA 含量影响不显著 ($P > 0.05$), 焙烤显著降低 GABA 含量 ($P < 0.05$); 米糠在超声功率 240 W 处理 24 h 后, 米糠酵素中 GABA 含量为 2.61 g/L, 是未处理的 1.85 倍。本文初步探讨了不同预处理方式对米糠酵素品质的影响以期后续制备米糠酵素提供一种新思路。

关键词: 米糠酵素, 超声, 微波, 焙烤, γ -氨基丁酸

中图分类号: TS201.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2021)07-0150-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020040257

Effects of Pretreatment Methods on the Quality of Rice Bran Ferment

DONG Xinrui¹, ZHAO Xinlei^{1, +}, YANG Yuxi¹, JIANG Lianzhou², YU Dianyu², BAO Yihong^{1,3, *}

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. Food College of Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

3. Key Laboratory of Forest Food Resources Utilization of Heilongjiang Province, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to study the effect of the treatment of ultrasound, microwave and baking on the quality of rice bran ferment after fermentation, rice bran was used as raw materials, *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus plantarum* were used as fermentation strains. Based on the effects of fermentation time, fermentation temperature, and inoculation amount on the content of γ -aminobutyric acid content and pH in rice bran ferment, orthogonal experiments were used to obtain optimal conditions for rice bran ferment. Then, the rice bran raw materials were processed under different process conditions of ultrasound, microwave and baking, and the effects of different pretreatment methods on the rice bran ferment were compared. The results showed that the optimal fermentation conditions for rice bran ferment were as follows: fermentation time 24 h, fermentation temperature 30 ℃, and the inoculation ratio of *L. plantarum* to *S. cerevisiae* was 1:2 (3% compound fermentation strain). Ultrasonic pretreatment method significantly increased the content of γ -aminobutyric acid in rice bran ferment ($P < 0.05$), microwave had no significant effect on the content of γ -aminobutyric acid ($P > 0.05$), baking significantly reduced the content of γ -aminobutyric acid ($P < 0.05$). Rice bran was treated with ultrasonic power 240 W for 24 h, the content of γ -aminobutyric acid in rice bran ferment was 2.61 g/L, which was 1.85 times than that of untreated rice. This article preliminarily discusses the effect of different pretreatment methods on the quality of rice bran enzyme in order to provide a new idea for the subsequent preparation of rice bran ferment.

收稿日期: 2020-04-22 +并列第一作者

基金项目: 国家重点研发项目 (2018YFD0401101)。

作者简介: 董欣睿 (1987-), 女, 博士研究生, 研究方向: 森林植物资源, E-mail: dongxr403@163.com。

赵鑫磊 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: aazhaoxinlei@163.com。

* 通信作者: 包怡红 (1970-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 植物活性成分生物转化和功能性食品开发, E-mail: baoyihong@163.com。

Key words: rice bran ferment; ultrasound; microwave; baking; *r*-aminobutyric acid

米糠是稻谷碾磨加工形成精米过程中留下的种皮和胚芽的混合物,是稻谷加工过程中的主要副产品之一,占稻谷总质量的 5%~8%^[1]。米糠含有多种营养物质及功能性化合物,其中粗蛋白质含量为 11%~13%,纤维含量约为 11%,油脂含量约为 20%,还含有多种矿物质,如铁、磷、镁等^[2-3]。有研究表明米糠油具有降低低密度脂蛋白和总血清胆固醇的功效^[4]。米糠多用于化肥、动物饲料生产以及化妆品行业。目前,很多学者将米糠作为发酵底物,通过微生物代谢活动产生更多对人体有益的化合物,例如酶、抗氧化剂、生物表面活性剂、有机酸、多不饱和脂肪酸(PUFA)等,进而提高营养物质总含量^[5-6]。

酵素一词起源于日本,本意指酶,随着酵素食品种类的增多,其含义延伸为植物通过接种乳酸菌或酵母菌进行发酵所获得的发酵食品。酵素包涵有机酸、蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶、超氧化物歧化酶等多种活性成分,具有抗氧化、抑菌、净化血液、消炎、促进细胞新生等作用^[7]。米糠中含有丰富的多糖及脂肪酸,但其无法直接食用,因此发酵制备米糠酵素成为利用米糠的新途径^[2]。

超声、微波、焙烤是常见的食品处理技术,三者分别通过空化作用、微波震荡生热、焙烤热效应对物质结构或组成产生影响。王振斌等^[8]利用超声波辅助多菌种发酵技术制备葛根酵素,提高酵素中蛋白酶与脂肪酶活力,而尚未见微波与焙烤对酵素品质影响的文献。目前,关于三种预处理方式对米糠酵素品质的影响鲜有报道。pH 可反映发酵液中微生物生长代谢情况,液态酵素的 pH 一般在 3~4 之间^[9],因此, pH 可作为判断发酵是否正常进行的参考指标。由于米糠酵素中蛋白酶的存在,可以水解米糠蛋白生成一定量的 L-谷氨酸, L-谷氨酸再经乳酸菌、酵母代谢产生的 L-谷氨酸脱羧酶催化转化为 GABA,而 GABA 因其多种生理功能成为植物酵素质量品质的主要标志物之一,并可作为衡量酵素成熟度的主要指标。因此,本文以米糠为原料,经预实验筛选确定的乳酸菌和酵母菌为发酵菌种, γ -氨基丁酸(GABA)含量和 pH 作为检测指标,首先通过正交试验获得制备米糠酵素最优条件;然后通过单因素实验分别优化不同预处理方式的工艺条件,最后各自在最优处理参数下,比较不同预处理方式对米糠酵素的影响,以期为米糠酵素的制备工艺及米糠资源的开发利用提供参考。

1 材料与方法

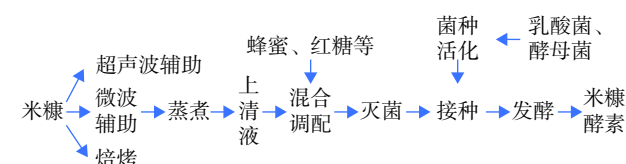
1.1 材料与仪器

米糠、 γ -氨基丁酸、蜂蜜、乳酸菌(植物乳杆菌 *Lactobacillus plantarum*) 东北林业大食品微生物实验室保存;酵母菌(酿酒酵母 *Saccharomyces cerevisiae*) 安琪酵母股份有限公司。

H/T20MM 型台式高速离心机 湖南赫西仪器装备有限公司; 722 型可见分光光度计 上海光谱仪器有限公司; DH6000A 型电热恒温培养箱 天津市泰斯特仪器有限公司; pH-3E 型 pH 计 上海仪电科学仪器股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 米糠酵素制备工艺流程



1.2.2 培养基配制

1.2.2.1 种子培养基 MRS(g/L): 蛋白胨 10 g, 牛肉浸粉 5.0 g, 酵母浸粉 4.0 g, 葡萄糖 20.0 g, 吐温 80 1.0 mL, 七水磷酸氢二钾 2.0 g, 三水醋酸钠 5.0 g, 柠檬酸三铵 2.0 g, 七水硫酸镁 0.2 g, 四水硫酸锰 0.05 g, 溶于 1000 mL 蒸馏水中, 调 pH 6.2±0.2, 121 °C 高压蒸汽灭菌 15 min。YPD(g/L): 10 g 酵母膏, 20 g 蛋白胨, 20 g 葡萄糖, 溶于 1000 mL 蒸馏水中, 121 °C 高压蒸汽灭菌 20 min。

1.2.2.2 发酵培养基 将米糠与蒸馏水按料水比 1:15(g/mL) 混匀, 煮沸 90 min, 5000 r/min 离心 10 min 后取上清液, 每 50 mL 发酵液中添加 2.5 g 红糖和 1.5 g 蜂蜜, 调 pH 至 6.0, 121 °C 灭菌 20 min, 得米糠发酵液备用。

1.2.3 米糠发酵工艺单因素实验

1.2.3.1 发酵时间对米糠酵素 GABA 含量及 pH 的影响 在发酵培养基中接入 3% 复合发酵菌种(植物乳杆菌与酿酒酵母体积比为 1:1; 植物乳杆菌约为 1.1×10^9 CFU/mL, 酿酒酵母约为 1.5×10^7 CFU/mL), 在 28 °C 的温度下分别静置培养 12、24、36、48、60 h, 测定 GABA 含量及 pH 的变化。

1.2.3.2 发酵温度对米糠酵素 GABA 含量及 pH 的影响 在发酵培养基中接入 3% 复合发酵菌种(植物乳杆菌与酿酒酵母体积比为 1:1; 植物乳杆菌约为 1.1×10^9 CFU/mL, 酿酒酵母约为 1.5×10^7 CFU/mL), 分别在 28、30、32、34、36 °C 条件下静置培养 24 h 后, 测定 GABA 含量及 pH 的变化。

1.2.3.3 植物乳杆菌与酿酒酵母接种体积比对米糠酵素 GABA 含量及 pH 的影响 配制米糠酵素培养基, 接种 3% 复合发酵菌种(植物乳杆菌约为 1.1×10^9 CFU/mL, 酿酒酵母约为 1.5×10^7 CFU/mL), 如表 1 所示, 分别向发酵液中接入不同比例的乳杆菌与酵母, 在温度为 28 °C 的条件下静置培养 24 h, 测定 GABA 含量及 pH 的变化。

表 1 植物乳杆菌与酿酒酵母接种体积比

Table 1 Inoculation volume ratio of *Lactobacillus plantarum* and *Saccharomyces cerevisiae*

组别	植物乳杆菌	酿酒酵母
1	1	0
2	0	1
3	3	1
4	2	1
5	1	1
6	1	2
7	1	3

1.2.4 正交试验 为得到制备米糠酵素的最优发酵工艺,在单因素实验基础上,选择发酵时间(h)、发酵温度(℃)、植物乳杆菌与酿酒酵母接种比例 3 个因素,以米糠酵素中 GABA 含量为评价指标,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验确定最佳发酵工艺条件,正交试验因素水平表如表 2。

表 2 发酵条件优化的正交试验因素水平表
Table 2 Factors and levels table of optimization for fermentation conditions

水平	A 发酵时间(h)	B 发酵温度(℃)	C 植物乳杆菌:酿酒酵母(v:v)
1	12	28	1:1
2	24	30	1:2
3	36	32	1:3

1.2.5 预处理米糠的方法

1.2.5.1 超声预处理米糠的条件 分别在超声功率为 180、210、240、270、300 W 条件下(此时超声时间为 20 min),超声时间为 5、10、15、20、25 min(超声功率为 240 W),超声处理后的米糠配制发酵培养基,将乳杆菌与酵母按照 1:2 比例接入发酵液,在 30 ℃ 下培养 24 h,测其 GABA 含量和 pH。

1.2.5.2 微波预处理米糠的条件 对米糠原料进行微波预处理,微波功率设为 300、400、500、600、700 W(此时微波时间为 60 s),微波时间 30、60、90、120、150 s(此时微波功率为 600 W),微波处理后的米糠配制发酵培养基,将乳杆菌与酵母按照 1:2 比例接入发酵液,在 30 ℃ 下培养 24 h,测其 GABA 含量和 pH。

1.2.5.3 焙烤预处理米糠的条件 对米糠原料进行焙烤预处理,焙烤温度设为 180、190、200、210、220 ℃(此时焙烤时间为 15 min),焙烤时间为 5、15、25、35、45 min(焙烤温度为 210 ℃),焙烤处理后的米糠配制发酵培养基,将乳杆菌与酵母按 1:2 比例接入发酵液,在 30 ℃ 下培养 24 h,测其 GABA 含量和 pH。

1.2.6 γ -氨基丁酸的检测 参考赵宏飞^[10]等检测 γ -氨基丁酸的方法。

1.2.7 谷胱甘肽检测 参考贾贞^[11]检测谷胱甘肽的方法。

1.2.8 pH 检测 采用 pH 计测定发酵液的 pH,按照

说明书操作。

1.2.9 蛋白酶检测 参考杨旭等^[12]等方法测定米糠酵素中蛋白酶活力。

1.2.10 乳酸菌菌落数的测定 参照 GB 4789.35-2016《食品微生物学检验乳酸菌检验》^[13]方法,用 10 倍稀释法,将体积分数分别为 10^{-2} ~ 10^{-8} 稀释菌液涂布于 MRS 培养基上,37 ℃ 培养 48 h 后计数。

1.2.11 酵母菌菌落数的测定 参照 GB 4789.15-2016《食品微生物学检验霉菌和酵母计数》^[14]方法,用 10 倍稀释法,将体积分数分别为 10^{-2} ~ 10^{-7} 稀释菌液涂布于 YPD 培养基上,28 ℃ 培养 48 h 后计数。

1.3 数据处理

所有试验平行测定 3 次,运用 SPSS18.0 与 Graphpad Prism 7.0 软件进行数据的统计分析以及相关图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 米糠发酵条件单因素实验结果

2.1.1 发酵时间对米糠发酵的影响 图 1 可知,不同发酵时间对应的发酵液 pH 均在 3.43~3.71 范围内,且在发酵时间 12~60 h 范围内,pH 呈现逐渐降低趋势。当发酵时间为 12 h 时,米糠酵素中 GABA 含量为 0.93 g/L;随着发酵时间延长,酶产物的增加,当发酵时间为 24 h 时,米糠酵素中 GABA 含量达到最大 0.95 g/L。随着发酵继续进行,相关酶的活性受到体系各因素的影响(如米糠培养基底物消耗)而降低^[15],导致米糠酵素中 GABA 含量降低。

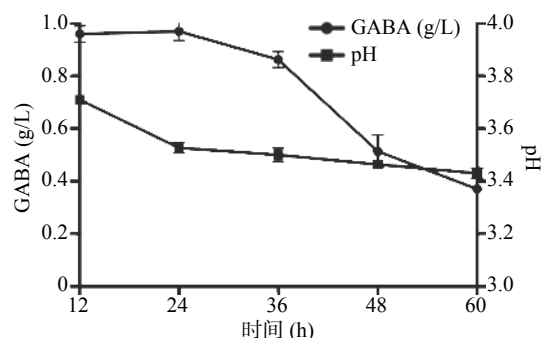


图 1 发酵时间对米糠酵素产 γ -氨基丁酸与 pH 的影响

Fig.1 Effect of fermentation time on GABA and pH of rice bran ferment

2.1.2 发酵温度对米糠发酵的影响 从图 2 可知,实验温度范围内,发酵 24 h,发酵液 pH 在 3.41~3.69 之间,发酵温度从 28 ℃ 升高到 30 ℃ 时,pH 下降较快,超过 30 ℃ 以后 pH 下降缓慢,当达到 34 ℃ 还略有上升。米糠酵素中 GABA 含量随温度升高,呈先上升后降低的趋势。当发酵温度升高至 30 ℃ 时,米糠酵素中 GABA 含量达到最大值为 0.88 g/L,随后 GABA 含量降低。胡超等^[16]用高产 GABA 的酵母发酵生产 GABA 的最适温度也是 30 ℃,温度偏低或者偏高对菌株的生长和代谢会有影响,从而影响 GABA 的产量及发酵液 pH。

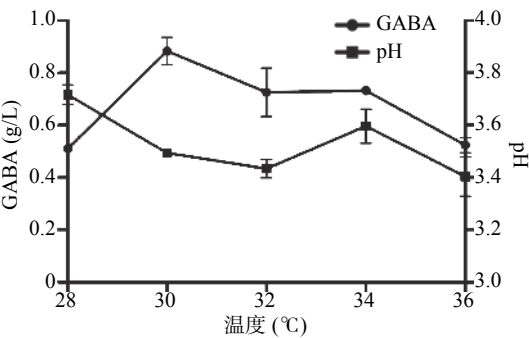


图 2 发酵温度对米糠酵素产 γ -氨基丁酸与 pH 的影响

Fig.2 Effect of fermentation temperature on GABA and pH of rice bran ferment

2.1.3 植物乳杆菌与酿酒酵母接种比例对米糠发酵的影响 如表 3 所示,当发酵培养基中只接种乳酸菌或者酵母菌时,米糠酵素中 GABA 含量均不如混菌发酵时产量高,且 pH 均在 3.5 左右,因此混菌发酵要好于单菌发酵。当乳酸菌与酵母菌接种比例为 1:2 时(6 号组),米糠酵素中 GABA 含量最高,为 1.17 g/L。张旭普等^[17]研究发现,植物乳杆菌与酿酒酵母混合发酵相比于单菌发酵在菌体代谢方面更有潜力,这可能是由于两种菌的代谢产物在一定生长阶段存在某种互生关系,同时也有相关酿酒酵母及乳酸协同发酵研究佐证^[18-19]。

表 3 不同接种比例米糠酵素中 GABA 含量及 pH 检测结果

Table 3 Detection results of GABA and pH in rice bran ferment with different inoculation ratios

组别	GABA 含量(g/L)	pH
1	0.82±0.03	3.49±0.03
2	0.93±0.02	3.58±0.11
3	1.02±0.03	3.35±0.05
4	0.97±0.02	3.39±0.07
5	1.11±0.05	3.53±0.10
6	1.17±0.05	3.38±0.07
7	1.03±0.04	3.39±0.04

注:数据为平均值±标准偏差; $n=3$ 。

2.2 米糠酵素发酵条件正交实验优化结果

在单因素实验基础上,选择发酵时间(A)、发酵温度(B)、乳酸菌与酵母接种体积比(C)三个因素,以发酵液中 GABA 含量为评价指标,确定制备米糠酵素的最优发酵工艺条件。

米糠酵素发酵工艺的正交试验结果见表 4,方差分析结果见表 5。由表 5 可知,三个因素对 GABA 产量影响的极差顺序大小为 $B>A>C$,方差分析表明,发酵温度对米糠酵素发酵具有显著影响($P<0.05$),发酵时间和乳酸菌与酵母菌接种比对发酵无显著影响($P>0.05$)。直观分析可知,最优发酵工艺条件为 $A_2B_2C_2$,即发酵温度为 30 °C,发酵时间为 24 h,乳酸菌与酵母菌接种比为 1:2,但此工艺条件不在正交表的 9 组实验中,需对正交试验优化结果

表 4 米糠酵素发酵工艺条件优化正交试验结果($n=3$)

Table 4 Result of orthogonal test for rice bran ferment fermentation conditions optimization ($n=3$)

试验号	A	B	C	GABA 含量(g/L)
1	1	1	1	0.74
2	1	2	2	1.03
3	1	3	3	0.72
4	2	1	2	1.05
5	2	2	3	1.21
6	2	3	1	0.92
7	3	1	3	0.86
8	3	2	1	1.17
9	3	3	2	0.76
k_1	0.83	0.88	0.94	
k_2	1.06	1.14	0.95	
k_3	0.93	0.80	0.93	
R	0.23	0.34	0.018	

表 5 以米糠酵素中 GABA 含量为评价指标的方差分析

Table 5 Analysis of variance using GABA content in rice bran ferment as an evaluation index

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A	0.0798	2	0.0399	9	0.1
B	0.1845	2	0.0922	20.8045	0.0459
C	0.0005	2	0.0002	0.0526	0.95
误差	0.0089	2	0.0044		
总和	0.2736				

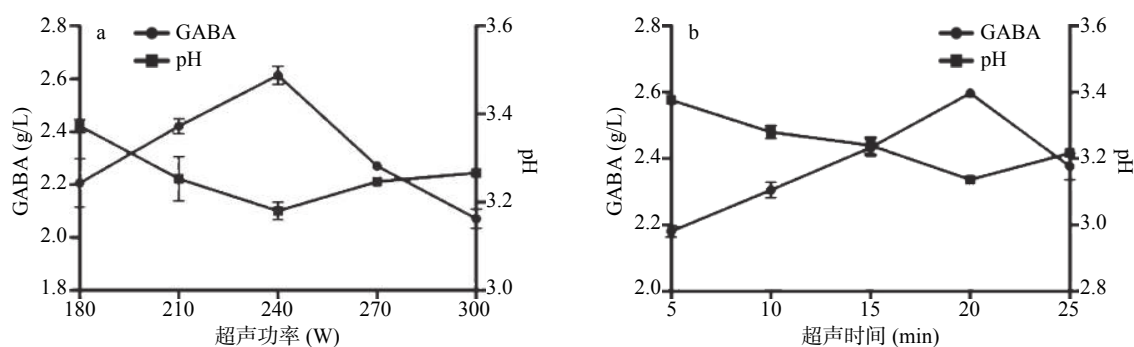
进行验证。

2.3 发酵工艺验证试验

为验证正交试验优化结果的准确性,以发酵温度 30 °C,发酵时间 24 h,乳酸菌与酵母菌接种比为 1:2 时,测得 GABA 含量为 1.41 g/L,此 GABA 产量高于正交表 9 组实验中的最优实验组(第 5 组 $A_2B_2C_3$ 结果为 1.21 g/L)。因此,米糠酵素最优发酵工艺为发酵温度为 30 °C,发酵时间为 24 h,乳酸菌与酵母菌接种比为 1:2。

2.4 米糠预处理工艺条件对酵素的影响

2.4.1 超声预处理条件对米糠酵素的影响 由图 3 可知,米糠酵素中 GABA 产量会随着超声功率的增大呈现先升高后降低的趋势,而 pH 呈现先降低后升高的趋势。在超声功率为 240 W 时,GABA 产量达到最大值为 2.61 g/L,此时 pH 为最低值 3.18(图 3a)。米糠酵素中 GABA 产量与 pH 随着超声时间延长所呈现趋势与超声功率增大的趋势相同,当超声时间为 20 min 时,GABA 产量达到最大值 2.59 g/L,此时发酵液 pH 为 3.14(图 3b)。因此,超声米糠的条件为超声功率 240 W,超声时间 20 min。超声处理后的米糠经发酵制得米糠酵素 GABA 含量(2.61 g/L)高于未处理的米糠(1.41 g/L),分析其原因可能是由于超声波的空化作用改变了米糠蛋白的四级结构,生成小分子的亚基和肽^[20],当发酵液中有蛋白酶产生时,促进米糠蛋白水解,从而影响米糠酵素中 pH 及

图3 超声预处理米糠对米糠酵素产 γ -氨基丁酸产量与pH的影响Fig.3 Effects of ultrasonic treatment of rice bran on *r*-aminobutyric acid production and pH of rice bran ferment

GABA 产量。

2.4.2 微波预处理条件对米糠酵素的影响 由图4可知,当微波功率为300 W时,米糠酵素中GABA产量为1.08 g/L, pH为3.56。当微波功率增大至600 W时, GABA产量达到最大值1.47 g/L, pH为3.36。随着微波功率继续增大, GABA产量有降低趋势, pH变化不明显(图4a)。GABA产量随着微波时间延长呈现先升高后降低的趋势,而pH呈现先降低后升高的变化趋势。当微波时间为60 s时, GABA产量达到最大值1.45 g/L,此时发酵液pH为3.32(图4b)。因此,微波处理米糠的条件为微波功率600 W,超声时间60 s。经微波米糠制得的米糠酵素GABA含量(1.47 g/L)大于未经处理的米糠酵素中GABA(1.41 g/L)含量,因为微波使米糠蛋白的空间结构受到破坏,蛋白二级结构螺旋和折叠发生变化,从而增加米糠蛋白溶解性,进而提高发酵液中

GABA的产量^[21]。然而,微波功率过大及微波时间过长,微波的热作用使蛋白质的球形结构变为棒状结构,疏水基团暴露,疏水残基相互作用形成网络,又会使蛋白的溶解性降低,不利于发酵菌种利用,因此pH会呈现先降低后升高的趋势^[22]。

2.4.3 焙烤预处理条件对米糠酵素的影响 由图5可知,随着焙烤温度的升高, GABA产量呈先升高后降低趋势, pH呈先降低后升高的趋势。当焙烤温度达到210℃时, GABA产量为最大值0.91 g/L, pH为3.37(图5a)。随着焙烤时间的延长, GABA产量同样呈先升高后降低的趋势, pH呈先降低后升高再略有降低的趋势。当处理米糠的焙烤时间为15 min时, GABA产量达到最大值0.91 g/L, pH为3.32(图5b)。因此,焙烤米糠的温度为210℃,焙烤时间为15 min,但经焙烤米糠发酵的米糠酵素GABA含量(0.91 g/L)小于未经处理的米糠制得米糠酵素中GABA含量

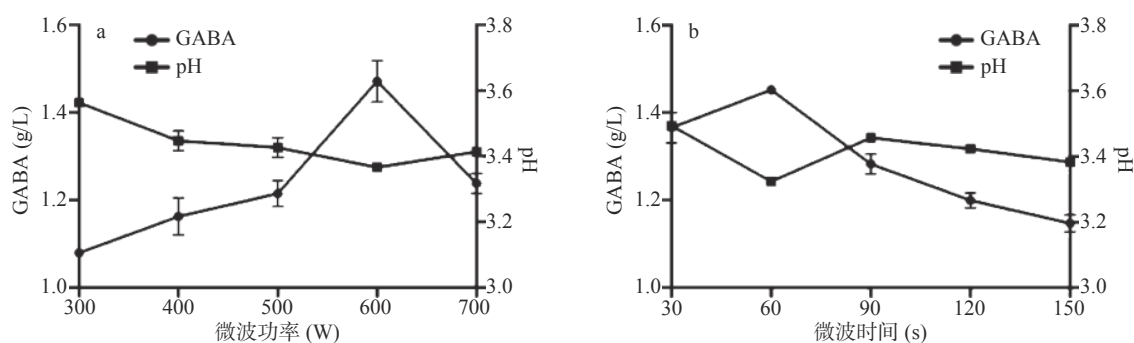
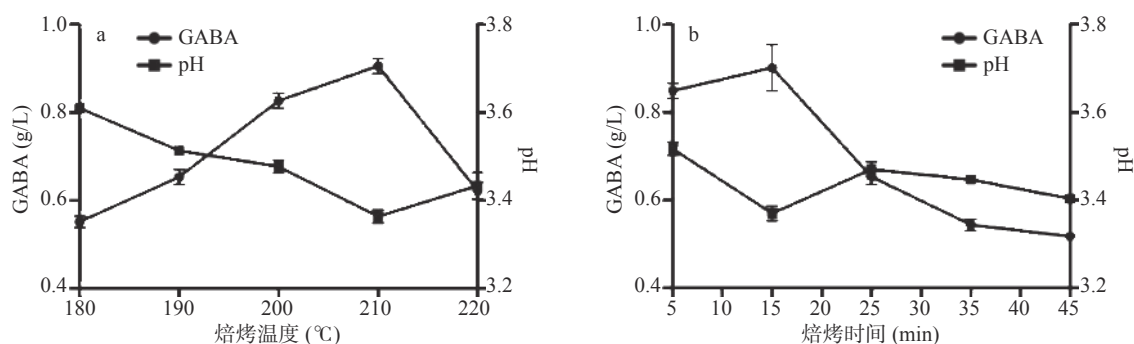
图4 微波预处理米糠对米糠酵素产 γ -氨基丁酸产量与pH的影响Fig.4 Effect of microwave treatment of rice bran on *r*-aminobutyric acid production and pH of rice bran ferment图5 烘烤预处理米糠对米糠酵素产 γ -氨基丁酸产量与pH的影响Fig.5 Effect of baking treatment of rice bran on *r*-aminobutyric acid production and pH of rice bran ferment

表 6 不同条件处理米糠对米糠酵素各指标的影响

Table 6 Effects of different conditions on rice bran treatment on various indexes of rice bran ferment

指标	未处理	超声	微波	焙烤
GABA 含量(g/L)	1.41±0.08 ^b	2.61±0.10 ^a	1.47±0.09 ^b	0.91±0.06 ^c
蛋白酶活力(U/mL)	22.99±0.12 ^a	21.46±0.09 ^a	10.66±0.17 ^b	9.96±0.09 ^b
谷胱甘肽含量(μmol/L)	103.43±0.79 ^b	109.54±0.54 ^b	105.73±0.32 ^b	126.28±0.73 ^a
pH	3.38±0.05 ^a	3.18±0.08 ^b	3.36±0.03 ^a	3.32±0.03 ^a
乳酸菌菌落数(×10 ⁸ CFU/mL)	2.08±0.03 ^b	3.17±0.05 ^a	2.27±0.07 ^b	1.59±0.05 ^c
酵母菌菌落数(×10 ⁶ CFU/mL)	3.11±0.05 ^a	2.97±0.03 ^a	2.57±0.03 ^b	2.39±0.07 ^b

注: 数据为平均值±标准偏差; $n=3$ 。同行不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

(1.41 g/L), 分析其原因可能为焙烤使米糠中蛋白质在高温加热时, 引起蛋白质化学结构发生改变, 氨基酸被氧化, 氧化后的氨基酸键可以阻止酶的水解反应, 从而影响了米糠酵素中 pH 及 GABA 产量。

2.5 不同预处理方式对米糠酵素品质的影响

将米糠分别在超声(240 W、20 min)、微波(600 W、60 s)及焙烤(210 °C、15 min)条件下预处理后, 进行发酵制备米糠酵素, 米糠酵素中 GABA、谷胱甘肽含量、蛋白酶活力、pH、乳酸菌及酵母菌菌落数等各指标检测结果如表 6 所示。

由表 6 可知, 预处理米糠对米糠酵素各指标的大小有影响。超声处理米糠组的 GABA 含量及乳酸菌菌落数均为最高, 且 pH 最低, 分别为 2.61 g/L、 3.17×10^8 CFU/mL 和 3.18。未处理米糠组的发酵液中蛋白酶活力高于其他各组, 但与超声处理米糠组的差异不显著($P>0.05$)。焙烤处理米糠组的发酵液中谷胱甘肽含量最高为 126.28 μmol/L, 但其它指标数据显著低于超声处理组($P<0.05$), 因此三种预处理方式中, 最优处理方式超声处理。

3 结论

以米糠为原料, 以乳酸菌和酵母菌为发酵菌株, 通过单因素及正交试验确定制备米糠酵素的最优发酵工艺条件为: 发酵温度 30 °C, 发酵时间 24 h, 乳酸菌与酵母菌接种比例为 1:2。经超声(240 W、20 min)、微波(600 W、60 s)及焙烤(210 °C、15 min)预处理米糠制备米糠酵素中 GABA、谷胱甘肽含量、蛋白酶活力、pH、乳酸菌及酵母菌菌落数等各指标之间存在差异, 其中经超声(240 W、24 h)预处理制备米糠酵素的 GABA 含量显著高于其他组($P<0.05$)。本文通过三种预处理方式制备米糠酵素, 发现制得的米糠酵素各指标之间存在差异, 希望为后续米糠酵素的制备提供一种新思路。

参考文献

- [1] 张艳, 陈文丹, 张传智, 等. 米糠发酵食品的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2017(18): 67.
- [2] Oliveira M D S, Feddern V, Kupski L, et al. Changes in lipid, fatty acids and phospholipids composition of whole rice bran after solid-state fungal fermentation[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(17): 8335–8338.
- [3] Silva M A, Sanches C, Amante E R. Prevention of hydrolytic

rancidity in rice bran[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 75(4): 487–491.

[4] Arab F, Alemzadeh I, Maghsoudi V. Determination of antioxidant component and activity of rice bran extract[J]. *Scientia Iranica*, 2011, 18(6): 1402–1406.

[5] Jang H D, Yang S S. Polyunsaturated fatty acids production with a solid-state column reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(14): 6181–6189.

[6] Silveira C M, Badiale-Furlong E. Characterization of nitrogenated compounds in solid state fermented bran[J]. *Ciência Tecnol Alim*, 2007, 27(4): 805–811.

[7] 毛建卫, 吴元锋, 方晟. 微生物酵素研究进展[J]. 发酵科技通讯, 2010, 39(3): 42–44.

[8] 王振斌, 刘加友, 严贤, 等. 超声辅助多菌种发酵制备葛根酵素的研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(13): 160–165.

[9] 商健. 食用酵素产品 pH 的测定[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2017(2): 190–191.

[10] 赵宏飞, 宋伟, 裴家伟, 等. 食品中三种 γ-氨基丁酸检测方法比较[J]. 中国乳品工业, 2008, 36(11): 51–55.

[11] 贾贞. 酿酒酵母发酵法制备还原型谷胱甘肽的初步研究[D]. 沈阳: 沈阳药科大学, 2009.

[12] 杨旭, 屈小玄, 郭庆贺, 等. 牛奶中蛋白酶活力测定的方法比较[J]. 中国乳品工业, 2014, 42(6): 48–51.

[13] GB 4789.35-2016, 食品安全国家标准, 食品微生物学检验乳酸菌检验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[14] GB 4789.15-2016, 食品安全国家标准, 食品微生物学检验霉菌和酵母计数[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[15] 李志江, 关琛, 翟爱华, 等. 糙米酵素发酵工艺对 γ-氨基丁酸和谷胱甘肽含量影响研究[J]. 农产品加工(学刊), 2014(1): 6–8, 11.

[16] 胡超, 左斌, 谢达平. 酵母产 γ-氨基丁酸发酵条件的研究[J]. 现代生物医学进展, 2011, 11(5): 861–863.

[17] 张旭普. 糙米酵素发酵工艺的初步研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.

[18] 束文举, 何林霞, 蒋双双, 等. 甜油滋味物质及滋味特征研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(11): 54–58.

[19] 金增辉. 生化法加工纯天然速食糙米粉[J]. 粮食与油脂, 1995, 8(2): 1–7.

[20] 马楠, 王霞, 鹿保鑫, 等. 超声处理提高米糠蛋白溶解性与乳化性工艺研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2018, 30(6): 41–50.

[21] 郝天舒, 王长远. 微波处理对米糠蛋白结构及功能性的影响[J]. 天然产物研究与开发, 2015, 27(5): 774–779, 784.

[22] 宋宏哲, 赵勇, 白志明. 醇法大豆浓缩蛋白的改性技术综述[J]. 粮油食品科技, 2008, 16(2): 30–32.