

复合菌种发酵对糙米饭口感和营养特性的影响

马铃铃^{1,2}, 蔺泽雪^{1,2}, 李江南², 赵思明², 牛猛², 张宾佳^{1*}

(¹西南大学食品科学学院 重庆 400715

²华中农业大学食品科学技术学院 武汉 430070)

摘要 采用复合菌种(植物乳杆菌和卡斯特新酒香酵母菌)对糙米进行发酵处理,研究发酵时间、接种量、菌种比对糙米饭口感和营养特性的影响。结果表明:糙米最佳发酵条件是:发酵时间 6 h,接种量 1.0%,植物乳杆菌和卡斯特新酒香酵母菌配比 2:1。与未发酵糙米相比,此条件下糙米回生值显著降低,体积膨胀率和吸水率分别由 131.67%和 194.27%提至 186.10%和 253.17%,制得的糙米饭亮度较高(L^* 为 64.23),硬度由 1 388.05 g 降至 407.28 g,感官评分由 71.88 分提至 78.88 分,并且糙米饭中的还原糖、 γ -氨基丁酸(GABA)和可溶性蛋白含量均显著增加。以上结果表明复合菌种发酵对糙米饭的口感和营养特性有提升作用,为其品质改良提供了参考。

关键词 糙米饭;复合菌种;发酵;营养特性

文章编号 1009-7848(2024)11-0197-12 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.11.019

糙米是经稻谷去除稻壳后获得的一种全谷物,包括糠层(6%~7%)、胚(2%~3%)和胚乳(约 90%)^[1]。糙米糠层中富含蛋白质、粗纤维、灰分^[2-3]、矿物质^[4]和生物活性物质(GABA、多酚、黄酮、 γ -谷维素)^[5-9]等多种营养成分。然而,糙米饭的米糠味、坚硬的质地、粗糙的口感以及黯淡的色泽均阻碍了其主食化。目前改良糙米饭品质的方法主要有物理法、化学法和生物法 3 种,比如通过碾削法减少糙米表面的糠层厚度,促进水分进入糙米内部而使米饭的硬度降低^[7];通过添加酸碱电解水等来改善糙米的加工特性^[8];通过添加纤维素酶使糙米皮层表面的纤维素降解,从而增加其吸水率^[9]。这些方法虽能在一定程度上改善糙米饭的品质,但仍存在设备要求高、工艺复杂和营养成分流失等不足。发酵法是一种技术简单、成本低的方法,微生物在生长过程中产生的酶可以破坏糙米坚硬的麸皮层和内部组织,使水分更易进入糙米内部使糙米硬度降低^[10],从而有效改善糙米产品的食用品质。目前市场上出现了发酵糙米糕^[11]、糙米酵素^[12]和发酵糙米酒^[13]等发酵糙米产品。

发酵法中微生物的作用至关重要,乳酸菌和酵母菌作为发酵过程中的主要微生物^[14],对糙米的品质具有不同的影响。乳酸菌有助于降解米糠

中的纤维物质^[15],提高谷物的还原糖^[16]和 GABA 含量^[17]。酵母菌发酵则可以提高糙米中的蛋白质^[18]和微量元素(钙、铁)^[19]等。研究表明乳酸菌和酵母菌单一发酵可以改善糙米的营养特性,虽会在一定程度上提升糙米的蒸煮及食用品质,但效果并不理想^[20-21]。范媛媛等^[22]采用乳酸菌和酵母菌复合菌种发酵糙米,发现在提高 GABA 含量方面,复合菌种比单一菌种发酵有更好的效果。然而,复合菌种发酵对糙米饭蒸煮与食用品质的影响还不清楚。

本文研究发酵时间、接种量和菌种比对糙米饭口感和营养特性的影响,同时比较不同发酵处理糙米的糊化特性,糙米饭的蒸煮品质、感官品质和营养成分,以期复合菌种发酵改良糙米饭的品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

糙米,集贤县康泰米业有限公司;卡斯特新酒香酵母(*Brettanomyces custersii*)ZSM-001,本实验室保藏,保藏号为 CCTCC NO:M207150;植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)ZSM-002,本实验室保藏,保藏号为 CCTCC NO:M209127;硼酸、四硼酸钠、重蒸苯酚、次氯酸钠、无水乙醇、3,5-二硝基水杨酸、考马斯亮蓝 G-250、MRS 肉汤、YPD 液体培养基,国药集团化学试剂有限公司;琼脂,青岛海博生物科技有限公司。

收稿日期:2023-11-24

第一作者:马铃铃,女,硕士

通信作者:张宾佳 E-mail: zbw9383@163.com

1.2 仪器与设备

722S型可见分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;TA.XT Plus质构仪,美国PERVICEL公司;TecMaster快速黏度分析仪,瑞典Perten公司;Ultrascan XE型色度仪,美国Hunterlab公司;PHS-25 pH计,梅特勒-托利多仪器有限公司;LRH-150B型生化培养箱,广东省医疗器械公司;智能电饭煲,美的集团股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 复合菌种发酵糙米的制备

1.3.1.1 菌种的活化 将配制好的酵母浸出粉葡萄糖(Yeast extract peptone dextrose medium, YPD)固体和液体培养基以及乳酸细菌(Lactic acid bacteria culture medium, MRS)固体和液体培养基于121℃灭菌20 min,倒平板后备用。将ZSM-001菌株和ZSM-002菌株分别划线接种到YPD固体培养基和MRS固体培养基,30℃培养24 h,活化2代后,取固体培养基上的活化菌种接种到液体培养基中进行扩大培养,30℃下培养24 h。使用前,将活化菌液在4 000 r/min下离心3 min,用灭菌后的0.85%的生理盐水洗涤沉淀,摇匀后重复离心3次,菌泥备用。

1.3.1.2 发酵糙米的制备 称取200 g糙米,装入单向出气的塑料袋,加入菌种和水后搅拌均匀,排气后封口,于30℃发酵,2 h翻料一次。发酵结束的糙米置于40℃烘箱干燥4 h至水分含量为13%~14%。部分发酵糙米于4℃冷藏,另一部分粉碎后过80目筛,置于干燥器中保存备用。糙米的发酵时间分别为0,2,4,6,8,10 h(BR、FBR-2、FBR-4、FBR-6、FBR-8、FBR-10),菌种的接种量分别为糙米重量的0.2%,0.6%,1.0%,1.4%,1.8%(BR、FBR-0.2%、FBR-0.6%、FBR-1.0%、FBR-1.4%、FBR-1.8%),植物乳杆菌和卡斯特酒香酵母的菌种配比分别为3:1,2:1,1:1,1:2,1:3(BR、FBR-3:1、FBR-2:1、FBR-1:1、FBR-1:2、FBR-1:3),其中固定水平为发酵时间6 h,接种量0.6%,菌种配比1:1。

1.3.2 糙米糊化特性的测定 称取2.5 g糙米粉样品于测量罐,加入25 mL蒸馏水,置于快速粘度分析仪中。测定程序为:50℃保持1 min;以12℃/min的速率加热到95℃(3.75 min);95℃保持2.5

min;以12℃/min的速率降温至50℃(3.75 min);50℃保持1.5 min。测定过程中搅拌器转速于960 r/min保持10 s后降至160 r/min至测试结束。

1.3.3 糙米蒸煮品质的测定

1.3.3.1 加热吸水率的测定 参考周小理等^[23]的方法并稍作修改。称取10 g糙米样品于漏网,用蒸馏水洗涤后把漏网置于200 mL高型烧杯中,加50℃蒸馏水至120 mL后封口,沸水锅中蒸煮20 min后将漏网取出,冷却30 min至漏网上不再有米汤滴下后对糙米饭称重。

大米吸水率(%)=米饭质量/大米质量×100 (1)

1.3.3.2 膨胀体积的测定 采用量筒排水法测量蒸煮前、后的糙米饭体积,并由式(2)计算糙米饭膨胀体积。

米饭膨胀体积(%)=米饭体积/大米体积×100 (2)

1.3.3.3 米汤pH值的测定 待1.3.3.1节中制备的米汤冷却至室温后,用pH计测定其pH值。

1.3.3.4 米汤干物质的测定 将测定pH值后的米汤稀释至100 mL,于3 000 r/min离心20 min,取10 mL沉淀置于已知质量的铝盒中,放入105℃烘箱中烘干至恒重。米汤干物质以每克干大米的米汤中含有干物质的毫克数来表示。

米汤干物质(mg/g)=(干物质质量/10)×(100/10) (3)

1.3.3.5 米汤碘蓝值的测定 参考李天真^[24]的测定方法加以修改。取测定米汤干物质的上清液1.0 mL加入50 mL蒸馏水中,然后加入0.5 mL的HCl溶液(0.5 mol/L)及1 mL碘试剂(0.2%),蒸馏水定容至100 mL。于波长660 nm处测定吸光值。

1.3.4 糙米饭的制备 参考吴凤凤^[25]的米饭蒸煮方法,称量30 g糙米样品于铝盒中,淘洗3次后加入糙米质量1.3倍的水,在盛有少量水的电饭煲中进行蒸煮,完成后松动米饭使多余水分散发。

1.3.5 糙米饭色度的测定 参考Lamberts等^[26]的方法,将冷却至室温的糙米饭样品平整的置于培养皿中,用白色和黑色色板校准后的色度计对糙米饭进行测量,记录 L^* 、 a^* 和 b^* 值。

1.3.6 糙米饭质构特性的测定 参考王曦^[27]的方法并作修改。质构仪设定参数如下:测试类型为TPA质构分析,使用P36/R探头,测试前速度1.0 mm/s,测后速度2.0 mm/s,触发力2 g,压缩速率

1.0 mm/s, 压缩比 50%, 2 次测量间隔 5 s。

1.3.7 糙米饭气味特征的测定 称取糙米饭样品 2 g 于 10 mL 顶空瓶中, 在 70 °C 平衡 0.5 h 后进行测定。电子鼻测定条件^[28]: 顶空产生温度 60 °C, 顶空时间 600 s; 注射针温度 70 °C, 注射体积 2.5 mL; 搅动速度 500 r/min; 测试时间 120 s, 延滞时间 300 s。

1.3.8 糙米饭的感官评价 评价过程参照《稻米、

大米蒸煮食用品质感官评价方法》(GB/T 15682-2008) 和熊善柏等^[29]米饭感官评定标准并作一定的修改, 将糙米饭样品平均分入白色陶瓷盘中, 由培训合格的 8 名品评人员(4 名男生 4 名女生, 年龄在 20~30 岁)组成品评小组, 趁热对米饭的气味做出评分, 然后对糙米饭的外观、适口性和整体感官等方面进行评价。糙米饭具体评分标准见表 1。

表 1 米饭感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of rice

一级指标	二级指标	具体特性描述
气味 (20 分)	纯正性、浓郁性 (20 分)	香气浓郁, 并有淡淡的酸味: 18~20 分
		香气清香, 有酸甜味: 15~17 分
		香气不明显, 酸味较浓: 13~14 分
		无香味, 有很浓的酸味: 7~12 分 有很浓的酸味, 难以接受: 0~6 分
外观结构 (20 分)	颜色 (7 分)	颜色黄色偏白色: 6~7 分
		颜色正常: 4~5 分
		颜色发暗发灰: 0~3 分
	光泽 (8 分)	有明显光泽: 7~8 分
		稍有光泽: 5~6 分
		无光泽: 0~4 分
适口性 (30 分)	饭粒完整性 (5 分)	结构紧密, 饭粒完整性好: 4~5 分
		大部分结构紧密完整: 3 分 出现爆花: 0~2 分
	黏性 (10 分)	滑爽, 有黏性, 不黏牙: 8~10 分
		有黏性, 基本不黏牙: 6~7 分 有黏性, 黏牙; 或无黏性: 0~5 分
弹性 (10 分)	有嚼劲: 8~10 分	
	稍有嚼劲: 6~7 分	
	疏松、发硬, 感觉有渣: 0~5 分	
软硬度 (10 分)	软硬适中: 8~10 分	
	感觉略硬或略软: 6~7 分	
	感觉很硬或很软: 0~5 分	
滋味 (25 分)	纯正性、持久性 (25 分)	咀嚼时, 有较浓郁的清香和甜味: 22~25 分
		咀嚼时, 有淡淡的清香和甜味: 18~21 分
		咀嚼时, 无清香滋味和甜味, 有轻微的酸味: 16~17 分
		咀嚼时, 无清香滋味和甜味, 酸味很浓: 0~15 分
冷饭质地 (5 分)	成团性、黏弹性、硬度 (5 分)	较松散, 黏弹性较好, 硬度适中: 4~5 分
		结团, 黏弹性稍差, 稍变硬: 2~3 分
		板结, 黏弹性差, 偏硬: 0~1 分
综合评分 (100 分)		总分=气味+外观结构+适口性+滋味+冷饭质地

1.3.9 糙米饭营养成分的测定

1.3.9.1 还原糖、总糖含量的测定 参照周婷^[30]的方法加以改进。称取 5 g 糙米粉样品置于离心杯,

加 50 mL 纯水, 40 °C 在恒温磁力搅拌器中提取 30 min, 4 000 r/min 离心 15 min, 吸取上清液于容量瓶中, 加入 20 mL 纯水重复上述操作, 合并上清

液,定容至 100 mL。采用 3,5-二硝基水杨酸法(3,5-Dinitrosalicylic acid, DNS)测定。

1.3.9.2 可溶性蛋白含量的测定 采用考马斯亮蓝比色法进行可溶性蛋白含量测定。

1.3.9.3 糙米中 GABA 含量的测定 参考姚森等^[31]的方法加以改进。取 5 g 糙米粉样品置于离心管中,加 25 mL 蒸馏水,30 ℃振荡提取 2 h,4 000 r/min 离心 10 min,取上清液 2 mL 于比色管中,依次加入 0.2 mol/L (pH 9.0) 四硼酸钠缓冲液 0.2 mL、6% 苯酚 1.0 mL、活性氯 $\geq 5.2\%$ 的次氯酸钠溶液 0.4 mL,混合均匀,沸水浴 10 min 后立即冰浴 20 min,不断振荡,溶液重现蓝绿色后,加 60% 乙醇溶液 2.0 mL,振荡均匀,静置 40 min 后,若出现浑浊则 4 000 r/min 离心 10 min,取上清液在波长 645 nm 处测吸光值,由标准曲线计算 GABA 含量。

1.4 数据分析

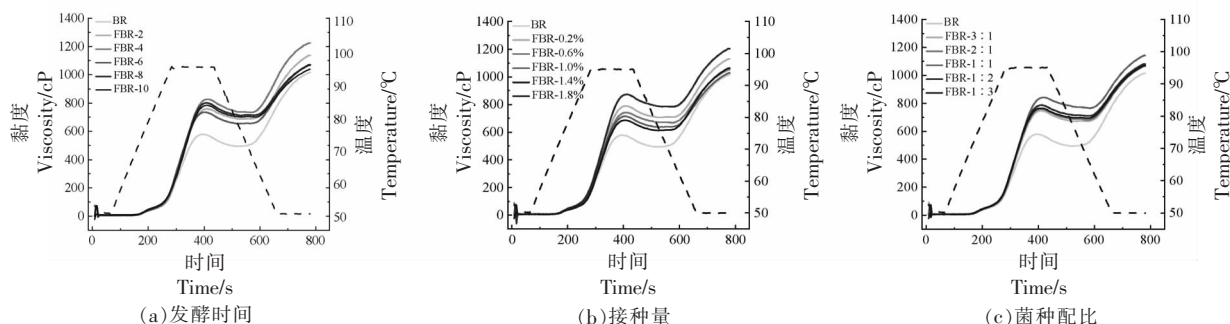
每次试验均有 3 组平行,数据以平均值 \pm 标准偏差表示。采用 IBM SPSS Statistics 25 进行数据统计分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。使用 Origin

2023 作图。

2 结果与分析

2.1 发酵条件对糙米糊化特性的影响

由图 1 可知,随着发酵时间的延长,糙米的峰值黏度和最低黏度均在发酵 4 h 达到峰值,表明此时糙米的黏结性最好^[32]。回生值呈现下降趋势,说明延长发酵时间可以提升糙米的冷糊稳定性,增强淀粉的抗老化性^[33]。随着接种量的增加,糙米的峰值黏度与最低黏度均呈现先降后升再降的趋势(图 1b),表明接种量的增加可以提高淀粉的吸水率,使淀粉更好地吸水膨胀,而随着接种量的继续增加,菌种发酵产生的酶可能对淀粉有分解作用,导致黏度下降^[34]。随着卡斯特酒香酵母菌比例的增加,糙米的峰值黏度、最低黏度和最终黏度均呈现先增后减的趋势(图 1c)。糙米的崩解值在植物乳杆菌与卡斯特酒香酵母菌菌种配比为 1:3 时降至最低,意味着此时的淀粉颗粒不易破裂,热糊稳定性好。



注:BR 代表糙米,FBR 代表发酵糙米。

图 1 不同发酵条件下糙米的糊化特性

Fig.1 Pasting characteristics of brown rice under different fermentation conditions

2.2 发酵条件对糙米蒸煮特性的影响

如表 2 所示,随着发酵时间的增加,糙米的吸水率、体积膨胀率均显著增加($P < 0.05$),而 pH 值则整体呈现下降趋势,这可能是长时间的发酵处理增加了糙米表面纤维结构的酶解程度,使水分更易进入糙米内部,与此同时,乳酸的不断积累使糙米的 pH 值降低。随着接种量的增加,糙米的吸水率、体积膨胀率均呈现先升后降的趋势,其上升趋势说明在发酵过程中适当增加接种量可有效降解糙米皮层,降低内部组织连接的致密性^[35],而下

降趋势可能与营养物质的限制使菌株代谢减弱有关。随着植物乳杆菌比例的下降,米汤的 pH 值逐渐增加,表明植物乳杆菌的产酸能力强于卡斯特酒香酵母菌^[36]。此外,米汤干物质含量在植物乳杆菌与卡斯特酒香酵母菌菌种配比为 2:1 时最大,表明此菌种比例下糙米适口性最好^[37]。相较于未经处理的糙米,发酵后糙米碘蓝值的增加也说明发酵可以增加米汤中可溶性直链淀粉的含量,使米饭具有更好的食用品质^[37]。

表 2 不同发酵条件下糙米的蒸煮特性

Table 2 Cooking characteristics of brown rice under different fermentation conditions

样品名称	吸水率/%	体积膨胀率/%	米汤 pH 值	米汤干物质/(mg/g)	米汤碘蓝值
BR	194.27 ± 0.46 ^d	131.67 ± 1.65 ^e	7.05 ± 0.06 ^a	11.47 ± 0.15 ^e	0.04 ± 0.01 ^f
FBR-2	220.83 ± 0.15 ^c	173.63 ± 6.36 ^b	6.59 ± 0.01 ^b	16.13 ± 0.15 ^c	0.15 ± 0.00 ^c
FBR-4	218.17 ± 0.15 ^c	170.83 ± 4.15 ^b	5.99 ± 0.04 ^d	15.43 ± 0.10 ^d	0.11 ± 0.01 ^c
FBR-6	219.33 ± 1.02 ^c	170.83 ± 4.15 ^b	6.26 ± 0.02 ^c	15.13 ± 0.03 ^d	0.13 ± 0.00 ^d
FBR-8	308.93 ± 2.08 ^a	220.83 ± 4.15 ^a	5.52 ± 0.02 ^e	20.77 ± 0.14 ^a	0.30 ± 0.00 ^a
FBR-10	285.93 ± 4.08 ^b	216.67 ± 8.35 ^a	5.45 ± 0.16 ^e	19.47 ± 0.15 ^b	0.29 ± 0.00 ^b
BR	194.27 ± 0.46 ^c	131.67 ± 1.65 ^d	7.05 ± 0.06 ^a	11.47 ± 0.15 ^e	0.04 ± 0.01 ^f
FBR-0.2%	195.87 ± 4.00 ^c	127.33 ± 2.14 ^d	5.91 ± 0.00 ^c	14.5 ± 0.20 ^b	0.07 ± 0.00 ^b
FBR-0.6%	205.03 ± 1.10 ^c	149.10 ± 2.14 ^c	5.69 ± 0.01 ^c	21.37 ± 0.25 ^a	0.33 ± 0.10 ^a
FBR-1.0%	244.45 ± 8.63 ^a	182.28 ± 13.41 ^a	5.72 ± 0.20 ^d	15.50 ± 0.00 ^{ab}	0.10 ± 0.00 ^d
FBR-1.4%	220.00 ± 3.80 ^b	165.83 ± 3.00 ^b	5.64 ± 0.01 ^{cd}	19.93 ± 0.15 ^b	0.24 ± 0.06 ^b
FBR-1.8%	213.80 ± 4.46 ^b	150.27 ± 0.46 ^c	5.77 ± 0.03 ^b	16.00 ± 0.10 ^c	0.19 ± 0.03 ^c
BR	194.27 ± 0.46 ^d	131.67 ± 1.65 ^e	7.05 ± 0.06 ^a	11.47 ± 0.15 ^e	0.04 ± 0.01 ^b
FBR-3:1	218.60 ± 4.46 ^c	163.90 ± 1.47 ^b	5.55 ± 0.00 ^e	18.50 ± 0.20 ^b	0.23 ± 0.17 ^a
FBR-2:1	253.17 ± 8.63 ^b	186.10 ± 1.34 ^{bc}	5.64 ± 0.02 ^d	20.40 ± 0.27 ^a	0.07 ± 0.00 ^b
FBR-1:1	195.87 ± 4.00 ^d	127.33 ± 2.14 ^c	5.91 ± 0.00 ^c	15.00 ± 0.10 ^c	0.09 ± 0.00 ^{ab}
FBR-1:2	247.47 ± 3.39 ^b	194.43 ± 2.29 ^a	6.19 ± 0.01 ^b	14.83 ± 0.15 ^{cd}	0.12 ± 0.02 ^{ab}
FBR-1:3	281.13 ± 7.42 ^a	206.93 ± 2.37 ^a	6.15 ± 0.02 ^b	14.50 ± 0.10 ^d	0.11 ± 0.00 ^{ab}

注:同一列字母不同表示有显著性差异, $P < 0.05$; BR 代表糙米, FBR 代表发酵糙米。

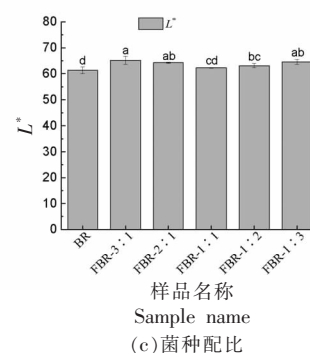
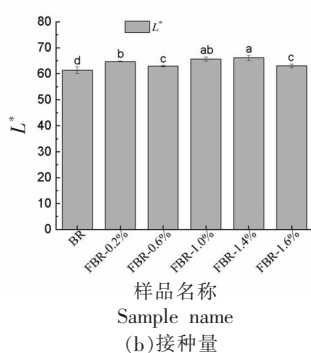
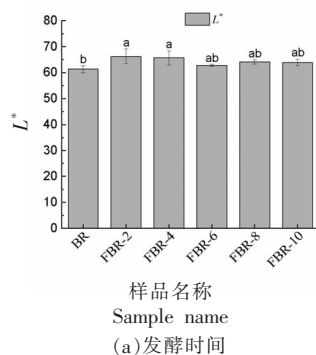
2.3 发酵条件对糙米饭色度的影响

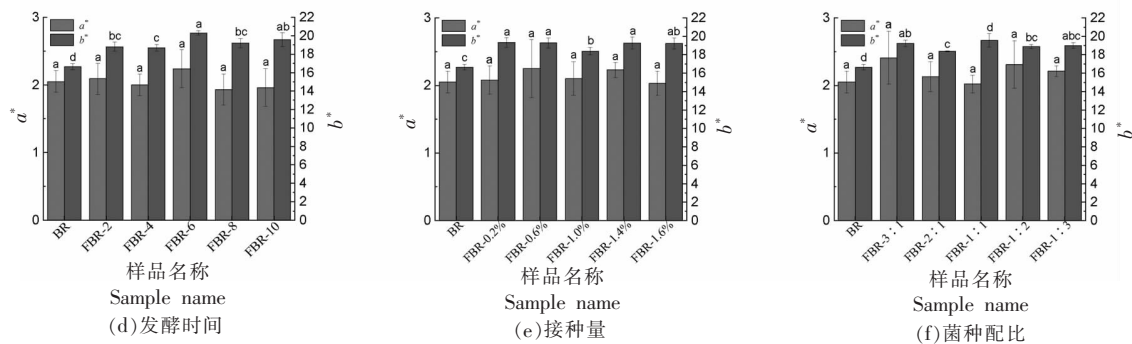
糙米饭的 L^* 值与糙米内部的脂质和胚乳有关, b^* 值与皮层中叶黄素、 β -胡萝卜素等色素有关^[26]。发酵后糙米饭的 L^* 值有所提高(图 2), 说明发酵可使糙米饭的亮度增加, 这是由于发酵产生的酶类物质选择性降解了糙米皮层纤维结构, 使脂质和胚乳更易露出表面^[26]。发酵后糙米饭的 a^* 值变化均不显著 ($P > 0.05$), 而发酵时间会显著改变糙米饭的 b^* 值 ($P < 0.05$) (图 2a), 随发酵时间的延长 b^* 值呈现先升后降的趋势。 b^* 值的下降趋势可能是由于发酵使糙米皮层中的色素转移至胚乳

及水中^[38]。随接种量的增加以及植物乳杆菌比例的减少, 糙米饭的 b^* 值与未发酵的糙米饭相比均显著增加 ($P < 0.05$) (图 2b、2c), 可能是发酵使糙米吸水率增加(见 2.2 节), 而水分含量增加造成了糙米中叶黄素含量的下降^[39], 从而使糙米饭的 b^* 值显著增加 ($P < 0.05$)。

2.4 发酵条件对糙米饭质构特性的影响

由表 3 可知, 发酵处理显著改变了糙米饭的质构特性, 这是因为发酵降解了糙米皮层, 打开了吸水通道, 从而使水分可以快速迁移至米饭内部, 同时也增强了淀粉与水的结合^[40]。糙米饭硬度随





注: L^* 表示亮度, a^* 表示红绿度, b^* 表示黄蓝度。BR 代表糙米, FBR 代表发酵糙米。图 a, d 代表不同发酵时间下糙米饭的色度, 图 b, e 代表不同接种量下糙米饭的色度, 图 c, f 代表不同菌种配比下糙米饭色度。

图 2 不同发酵条件下糙米饭的色度

Fig.2 Color of cooked brown rice under different fermentation conditions

着发酵时间的增加而显著降低 ($P < 0.05$), 这与糙米的吸水率和体积膨胀率随发酵时间延长而显著升高相对应 ($P < 0.05$) (见 2.2 节)。然而, 其黏着性总体上却呈上升趋势, 这与发酵后增加的米汤干物质含量有关^[41]。随着接种量的增加, 糙米饭的硬度整体呈下降趋势, 当接种量为 1.0% 时降为

669.32 g, 这与糙米饭吸水率和体积膨胀率的变化一致。此外, 该接种量下发酵糙米饭的弹性和咀嚼性也最高。植物乳杆菌与卡斯特酒香酵母菌菌种配比为 2:1 时糙米饭的硬度显著降低 ($P < 0.05$), 一定程度上表明了此复配比例降解糙米皮层中纤维层的效果最好, 糙米饭的口感较好。

表 3 不同发酵条件下糙米饭的质构特性

Table 3 Texture characteristics of cooked brown rice under different fermentation conditions

样品名称	硬度/g	弹性	胶着性	咀嚼性	黏着性/g·s
BR	1 388.05 ± 217.30 ^a	0.79 ± 1.55 ^b	764.68 ± 191.41 ^a	619.25 ± 218.92 ^a	9.43 ± 5.88 ^c
FBR-2	806.39 ± 168.68 ^b	0.90 ± 0.12 ^{ab}	493.56 ± 79.10 ^b	448.22 ± 96.96 ^b	34.20 ± 20.37 ^{ab}
FBR-4	690.14 ± 157.46 ^{bc}	0.84 ± 0.11 ^{ab}	395.83 ± 45.71 ^{bc}	334.08 ± 94.96 ^{bc}	24.04 ± 19.22 ^{bc}
FBR-6	670.48 ± 61.22 ^{bcd}	0.91 ± 0.05 ^{ab}	401.37 ± 40.68 ^{bc}	363.88 ± 34.62 ^{bc}	48.33 ± 17.19 ^a
FBR-8	568.72 ± 0.42 ^{cd}	0.92 ± 0.42 ^a	347.75 ± 40.40 ^c	319.17 ± 0.21 ^{bc}	43.65 ± 25.06 ^{ab}
FBR-10	539.56 ± 132.49 ^d	0.88 ± 0.12 ^a	310.97 ± 68.80 ^c	285.43 ± 58.71 ^c	51.96 ± 21.00 ^a
BR	1 388.05 ± 217.30 ^a	0.79 ± 1.55 ^{bc}	764.68 ± 191.41 ^a	619.25 ± 218.92 ^a	9.43 ± 5.88 ^b
FBR-0.2%	812.66 ± 51.95 ^b	0.75 ± 0.14 ^c	440.62 ± 62.24 ^b	335.92 ± 99.42 ^b	11.34 ± 4.61 ^b
FBR-0.6%	689.71 ± 32.24 ^c	0.87 ± 0.10 ^{abc}	400.95 ± 38.70 ^b	352.07 ± 69.76 ^b	36.40 ± 20.20 ^a
FBR-1.0%	669.32 ± 54.51 ^c	0.95 ± 0.06 ^a	404.58 ± 57.85 ^b	383.00 ± 67.66 ^b	27.48 ± 0.05 ^b
FBR-1.4%	689.33 ± 31.28 ^c	0.91 ± 0.05 ^{bc}	394.60 ± 55.98 ^b	360.18 ± 57.60 ^b	43.20 ± 19.41 ^a
FBR-1.8%	690.32 ± 36.01 ^{bc}	0.83 ± 0.08 ^{abc}	384.37 ± 32.17 ^b	321.60 ± 50.17 ^b	34.29 ± 25.28 ^a
BR	1 388.05 ± 217.30 ^a	0.79 ± 1.55 ^b	764.68 ± 191.41 ^a	619.25 ± 218.92 ^a	9.43 ± 5.88 ^c
FBR-3:1	703.50 ± 88.99 ^b	0.92 ± 0.05 ^a	421.14 ± 65.57 ^b	388.11 ± 61.35 ^b	46.04 ± 26.70 ^a
FBR-2:1	407.28 ± 52.21 ^d	0.87 ± 0.12 ^{ab}	235.04 ± 36.89 ^c	205.21 ± 54.68 ^{bc}	15.42 ± 9.04 ^{bc}
FBR-1:1	480.27 ± 62.99 ^{cd}	0.85 ± 0.09 ^{ab}	261.72 ± 34.00 ^c	220.21 ± 28.95 ^{bc}	23.59 ± 10.79 ^{abc}
FBR-1:2	649.92 ± 76.51 ^{bc}	0.86 ± 0.08 ^{ab}	373.85 ± 42.07 ^b	320.91 ± 41.65 ^{bc}	34.22 ± 19.13 ^{ab}
FBR-1:3	693.08 ± 86.57 ^b	0.84 ± 0.11 ^{ab}	387.43 ± 48.59 ^b	344.93 ± 68.13 ^{bc}	46.65 ± 31.38 ^a

注: 同一列字母不同表示有显著性差异, $P < 0.05$; BR 代表糙米, FBR 代表发酵糙米。

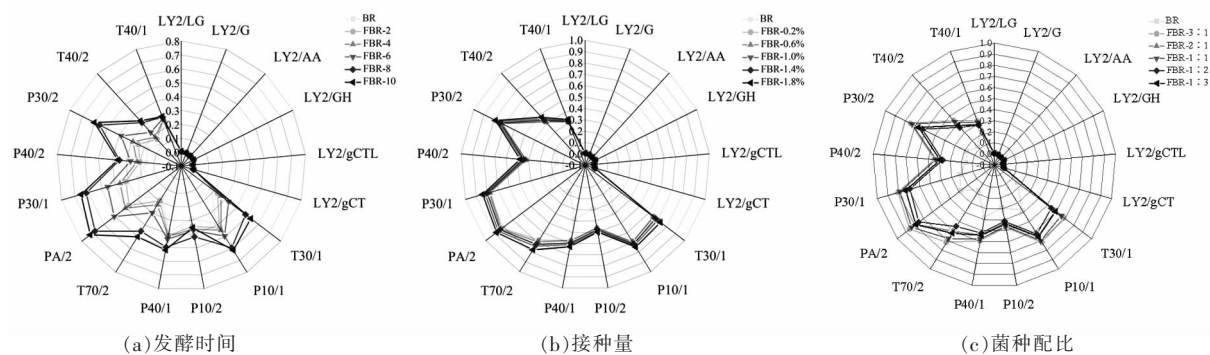
2.5 发酵条件对糙米饭气味特征的影响

发酵后糙米饭的气味发生明显变化 (图 3),

随着发酵时间的延长, 糙米饭的气味特征值均呈现上升趋势 (图 3a), 发酵 10 h 时的气味特征值增

加最为突出。此外,代表有机化合物、氧化气体等的 P40/1、T70/2、T40/1 传感器响应值有所增加,表明发酵过程中产生了乙酸、芳香醇类化合物等有机化合物。由图 3b 可知,经过发酵处理的糙米饭的传感器响应值随着接种量的增加并无明显变

化,其原因可能是过高的接种量对菌种的生长代谢起到了抑制作用。随着卡斯特酒香酵母菌比例的增加,经过发酵处理的糙米饭的雷达图趋势无明显变化(图 3c),说明菌种配比的变化并不会改变发酵过程中生成的化合物种类。



注:BR 代表糙米,FBR 代表发酵糙米。

图 3 不同发酵条件下糙米饭的气味雷达图

Fig.3 Smell radar map of cooked brown rice under different fermentation conditions

2.6 发酵条件对糙米饭感官评价的影响

由表 4 可知,发酵对糙米饭的外观结构及冷饭质地并无显著影响($P>0.05$)。随着发酵时间的延长,与未经处理的糙米饭相比,短时发酵(2~4 h)条件下糙米饭的气味评分并无显著差异,而长时发酵(6~10 h)后气味评分却显著降低($P<0.05$),评分降低可能与发酵过程中乳酸积累导致酸味增强有关。糙米饭的适口性评分及总分随发酵时间

和接种量的增加均呈先升后降的趋势。当接种量为 1.0%时糙米饭的适口性评分最高,这与此接种量下糙米饭的硬度最低结果一致。不同菌种配比条件下糙米饭的气味评分并无显著变化($P>0.05$),而当菌种配比为 2:1 时,糙米饭的总分最高,且糙米饭的外观结构、适口性以及滋味得分也较高,这与其色度的改善和硬度的降低有关。

表 4 不同发酵条件下糙米饭的感官评价结果

Table 4 Sensory evaluation results of cooked brown rice under different fermentation conditions

样品名称	感官指标					
	气味/分	外观结构/分	适口性/分	滋味/分	冷饭质地/分	总分/分
BR	16.25 ± 1.49 ^a	14.75 ± 1.98 ^a	17.50 ± 2.39 ^{bc}	19.63 ± 2.66 ^a	3.75 ± 0.89 ^a	71.88 ± 3.64 ^{ab}
FBR-2	14.88 ± 1.73 ^a	15.25 ± 1.28 ^a	19.38 ± 1.92 ^{bc}	19.00 ± 2.45 ^a	3.25 ± 0.46 ^a	71.75 ± 5.50 ^b
FBR-4	16.25 ± 1.16 ^a	15.75 ± 1.16 ^a	20.63 ± 1.20 ^{ab}	19.63 ± 1.69 ^a	3.13 ± 1.13 ^a	75.37 ± 4.13 ^a
FBR-6	12.75 ± 1.67 ^b	15.75 ± 1.49 ^a	22.88 ± 2.59 ^a	19.00 ± 1.58 ^a	3.88 ± 0.83 ^a	74.25 ± 5.09 ^a
FBR-8	11.13 ± 1.46 ^b	14.75 ± 2.31 ^a	18.50 ± 3.51 ^{bc}	17.88 ± 2.80 ^a	3.38 ± 0.92 ^a	65.63 ± 7.73 ^{bc}
FBR-10	12.25 ± 2.12 ^b	14.00 ± 2.00 ^a	16.75 ± 2.55 ^c	18.13 ± 2.64 ^a	3.25 ± 0.70 ^a	64.38 ± 6.97 ^c
BR	16.25 ± 1.49 ^a	14.75 ± 1.98 ^a	17.50 ± 2.39 ^{ab}	19.63 ± 2.66 ^a	3.75 ± 0.89 ^a	71.88 ± 3.64 ^a
FBR-0.2%	14.75 ± 2.38 ^{ab}	15.13 ± 2.03 ^a	17.13 ± 1.13 ^b	19.25 ± 1.67 ^a	4.00 ± 1.07 ^a	70.25 ± 2.10 ^{ab}
FBR-0.6%	13.75 ± 1.49 ^b	16.00 ± 1.51 ^a	17.75 ± 1.67 ^{ab}	19.25 ± 1.28 ^a	3.63 ± 0.52 ^a	69.13 ± 0.22 ^{ab}
FBR-1.0%	14.38 ± 1.77 ^{ab}	14.88 ± 2.17 ^a	19.50 ± 1.41 ^a	19.25 ± 2.31 ^a	4.13 ± 0.83 ^a	72.88 ± 1.45 ^a
FBR-1.4%	12.50 ± 1.41 ^b	16.38 ± 1.77 ^a	16.25 ± 1.67 ^b	18.13 ± 1.36 ^a	3.38 ± 0.74 ^a	67.88 ± 3.23 ^{ab}
FBR-1.8%	12.63 ± 2.20 ^b	15.38 ± 2.62 ^a	16.13 ± 1.36 ^b	19.00 ± 1.77 ^a	3.63 ± 0.92 ^a	66.75 ± 3.54 ^b

(续表 4)

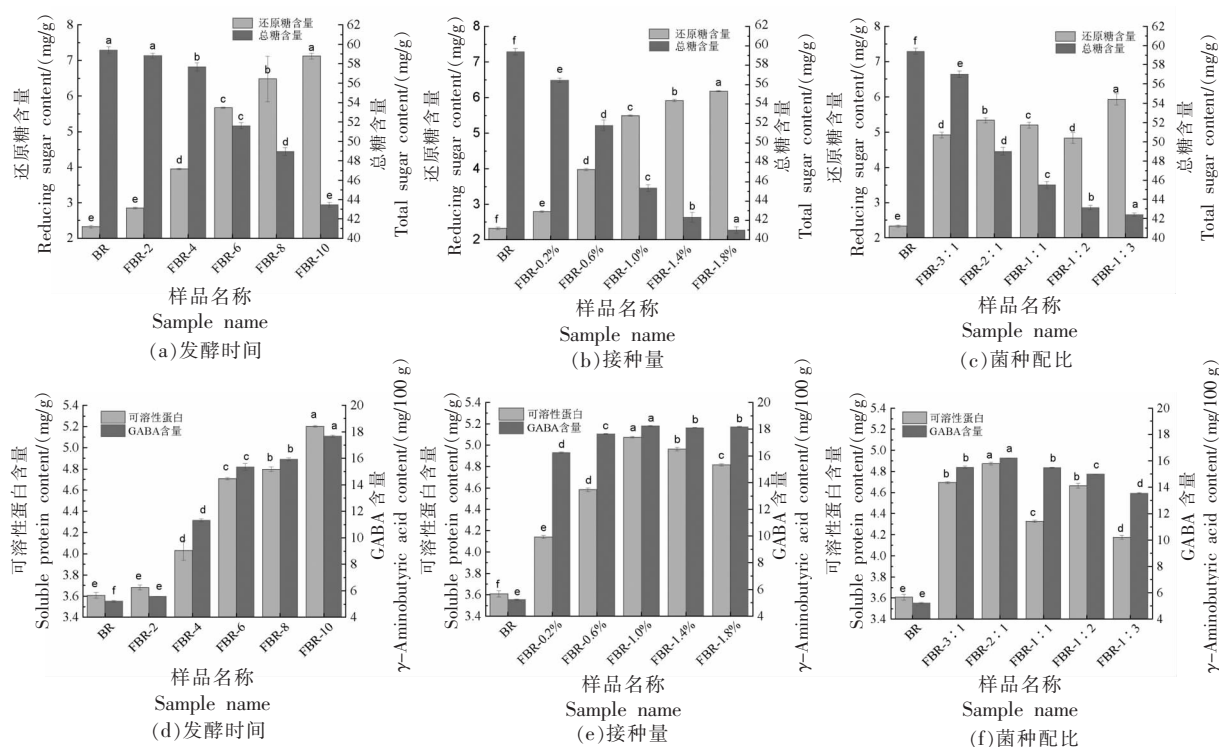
样品名称	感官指标					
	气味/分	外观结构/分	适口性/分	滋味/分	冷饭质地/分	总分/分
BR	16.25 ± 1.49 ^a	14.75 ± 1.98 ^a	17.50 ± 2.39 ^{bc}	19.63 ± 2.66 ^a	3.75 ± 0.89 ^a	71.88 ± 3.64 ^{bc}
FBR-3:1	16.63 ± 1.20 ^a	15.25 ± 1.67 ^a	15.50 ± 1.31 ^c	16.13 ± 1.46 ^b	3.88 ± 0.35 ^a	67.38 ± 3.02 ^c
FBR-2:1	17.50 ± 1.41 ^a	15.37 ± 1.92 ^a	21.50 ± 4.57 ^a	20.63 ± 1.41 ^a	3.88 ± 0.64 ^a	78.88 ± 7.08 ^a
FBR-1:1	16.75 ± 2.25 ^a	15.63 ± 1.19 ^a	20.13 ± 3.56 ^{ab}	20.25 ± 2.05 ^a	3.75 ± 0.71 ^a	76.50 ± 5.10 ^{ab}
FBR-1:2	17.25 ± 2.31 ^a	15.25 ± 1.28 ^a	20.63 ± 3.07 ^{ab}	20.88 ± 2.30 ^a	3.75 ± 0.89 ^a	77.75 ± 7.55 ^{ab}
FBR-1:3	17.00 ± 1.69 ^a	15.63 ± 1.19 ^a	20.00 ± 3.02 ^{ab}	20.75 ± 1.91 ^a	4.13 ± 0.64 ^a	77.50 ± 3.42 ^{ab}

注:同一列字母不同表示有显著性差异, $P<0.05$;BR 代表为糙米,FBR 代表发酵糙米。

2.7 发酵条件对糙米饭营养成分的影响

由图 4a、4d 可知,随着发酵时间的延长,糙米饭中的还原糖含量呈现上升趋势,而总糖含量则呈下降趋势,原因是发酵过程中菌种代谢以及酶活性的增加分解利用了更多碳水化合物^[42]。可溶性蛋白含量的显著提高($P<0.05$)表明菌种发酵过程中产生的酶将蛋白质分解为易吸收的肽和氨基酸^[43]。同时,GABA 含量也得到了显著的提高($P<0.05$)。随着接种量的增加,还原糖含量增加幅度

明显减缓(图 4b、4e),这可能是微生物之间竞争营养物质,造成微生物代谢减缓甚至死亡。可溶性蛋白含量呈现先升后降的趋势,意味着过高或过低的接种量都不利于蛋白酶的产生。由图 4c、4f 可得,植物乳杆菌与卡斯特酒香酵母菌种配比为 2:1 时糙米饭的 GABA 含量最高,这与范媛媛等^[22]的研究结果一致,同时此菌种配比下可溶性蛋白含量也最高,表明此复配比例能够明显提高糙米饭的营养成分。



注:BR 代表糙米,FBR 代表发酵糙米,图 a、d 代表不同发酵时间下糙米饭营养成分的变化,图 b、e 代表不同接种量下糙米饭营养成分的变化,图 c、f 代表不同菌种配比下糙米饭营养成分的变化。

图 4 不同发酵条件下糙米饭中还原糖、总糖、可溶性蛋白和 GABA 含量的变化

Fig.4 Changes of reducing sugar, total sugar, soluble protein and GABA contents in cooked brown rice under different fermentation conditions

3 结论

本试验以改善糙米饭口感和营养特性为目标,采用复合菌种发酵处理糙米,探究发酵条件(发酵时间、接种量和菌种配比)对糙米饭口感和营养特性的影响。试验结果表明:发酵 6 h 后糙米饭的硬度较低,适口性评分最高,GABA 含量较高。接种量为 1.0% 时,糙米的吸水率、体积膨胀率均为最高,回生值和硬度降至最低,糙米饭的感官评分和 GABA 含量最高。当植物乳杆菌与卡斯特酒香酵母菌菌种配比为 2:1 时,糙米的吸水率、体积膨胀率和干物质含量较高,糙米饭的适口性、综合评分和 GABA 含量最高。综合各项指标以及考虑实际生产得出,发酵时间为 6 h、接种量为 1.0%、植物乳杆菌与卡斯特酒香酵母菌菌种配比为 2:1 是复合菌种发酵糙米的理想处理条件,此条件下糙米的糊化特性和蒸煮特性得到改善,糙米饭的硬度较低、营养成分含量较高并且感官品质最佳。本研究通过对比不同发酵处理对糙米饭口感和营养成分的影响,为糙米饭品质改良技术的发展提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] CHEN H, SIEBENMORGEN T J, GRIFFIN K. Quality characteristics of long-grain rice milled in two commercial systems[J]. *Cereal Chemistry*, 1998, 75(4): 560-565.
- [2] 王艳, 兰向东, 陈钊, 等. 糙米、胚芽米和精白米营养成分分析[J]. *食品科技*, 2016, 41(11): 156-159. WANG Y, LAN X D, CHEN Z, et al. Analysis of nutrition components in brown rice, germinated rice, and polished rice[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(11): 156-159.
- [3] 赵金海, 郭春景. 萌动糙米的营养价值及行业发展现状[J]. *黑龙江科学*, 2020, 11(18): 22-24. ZHAO J H, GUO C J. Overviews of germinating brown rice quality and the current situation of brown rice industry[J]. *Heilongjiang Science*, 2020, 11(18): 22-24.
- [4] 吴娜娜, 马占倩, 谭斌, 等. 不同加工精度稻米的营养物质含量、米粉特性及米饭品质研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2019, 27(6): 40-45. WU N N, MA Z Q, TAN B, et al. Research progress of nutrient content, flour properties, cooking and sensory quality of rice with different milling degree[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2019, 27(6): 40-45.
- [5] DYKES L, ROONEY L. Phenolic compounds in cereal grains and their health benefits[J]. *Cereal Foods World*, 2007, 52: 105-111.
- [6] 曹晶晶. 发芽糙米及制品加工过程中 γ -氨基丁酸变化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018. CAO J J. Study on the change of γ -aminobutyric acid in germinated brown rice and its products processing[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2018.
- [7] YAN X D, LIU C M, HUANG A, et al. The nutritional components and physicochemical properties of brown rice flour ground by a novel low temperature impact mill [J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 92: 102927.
- [8] ZHANG C L, XIA X D, LI B M, et al. Disinfection efficacy of electrolyzed oxidizing water on brown rice soaking and germination[J]. *Food Control*, 2018, 89: 38-45.
- [9] DAS M, BANERJEE R, BAL S. Evaluation of physicochemical properties of enzyme treated brown rice (Part B)[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2008, 41(10): 2092-2096.
- [10] 叶彦均, 谭斌, 乔聪聪, 等. 生物发酵对糙米品质影响研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(10): 1-14. YE Y J, TAN B, QIAO C C, et al. Research progress on the effect of biological fermentation on brown rice quality [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(10): 1-14.
- [11] 仰思颖. 发酵糙米糕工艺研究及品质改良[D]. 无锡: 江南大学, 2017. YAN S Y. Study on the process and quality improvement of fermented brown rice steam sponge cake[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [12] 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. ZHANG X P. The preliminary study on fermentation technology of brown rice jiaosu[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [13] 邬晓晨, 刘春清, 吕虹. 类干酪乳杆菌酿酒酵母复合发酵发芽糙米酿造营养米酒的研究[J]. *酿酒*, 2020, 47(5): 94-96.

- WU X C, LIU C Q, LÜ H. Study on nutritious rice wine made from germinated unpolished rice by co-fermentation with *Lactobacillus paracasei* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Liquor Making*, 2020, 47(5): 94-96.
- [14] 刘小翠, 李云波, 赵思明. 生米发酵食品的研究进展[J]. *食品科学*, 2006, 27(10): 616-619.
- LIU X C, LI Y B, ZHAO S M. Research progress on food made of uncooked fermented rice[J]. *Food Science*, 2006, 27(10): 616-619.
- [15] SAMAN P, FUCIÑOS P, VÁZQUEZ J A, et al. Fermentability of brown rice and rice bran for growth of human *Lactobacillus plantarum* NCIMB 8826[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2011, 49(1): 128-132.
- [16] 文伟, 张名位, 刘磊, 等. 乳酸菌发酵对脱脂米糠中糖和酚类物质含量的影响[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(2): 137-141.
- WEN W, ZHANG M W, LIU L, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation on the content of sugars and polyphenols of defatted rice bran [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(2): 137-141.
- [17] 董玲, 姚英政, 朱宇. 乳酸菌发酵糙米产 γ -氨基丁酸的研究[J]. *食品与发酵科技*, 2014, 50(5): 9-11.
- DONG L, YAO Y Z, ZHU Y. Studies on the improvement of γ -aminobutyric acid (GABA) in brown rice by lactic acid bacterium fermentation[J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2014, 50(5): 9-11.
- [18] CHINMA C E, ILOWEFAH M, SHAMMUGASAMY B, et al. Chemical, antioxidant, functional and thermal properties of rice bran proteins after yeast and natural fermentations[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2014, 49(10): 2204-2213.
- [19] ILOWEFAH M, BAKAR J, GHAZALI H M, et al. Enhancement of nutritional and antioxidant properties of brown rice flour through solid-state yeast fermentation[J]. *Cereal Chemistry Journal*, 2017, 94(3): 519-523.
- [20] 程鑫, 李永富, 史锋, 等. 乳酸菌发酵对糙米蒸煮性能和食用品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(5): 1-7.
- CHENG X, LI Y F, SHI F, et al. Effect of lactic acid bacteria fermentation on cooking performance and edible quality of brown rice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(5): 1-7.
- [21] 杨闯, 邢志超, 李境艺, 等. 不同发酵条件对糙米酵素中植酸酶和 GABA 的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(10): 19-24.
- YANG C, XING Z C, LI J Y, et al. Effect of different fermentation conditions on phytase and gaba in brown rice enzymes[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(10): 19-24.
- [22] 范媛媛, 丁俊胄, 熊善柏, 等. 复合菌种发酵法提高发芽糙米中 γ -氨基丁酸[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(3): 1-6.
- FAN Y Y, DING J Z, XIONG S B, et al. Increasing γ -aminobutyric acid in germinated brown rice by synergistic fermentation[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(3): 1-6.
- [23] 周小理, 王惠, 周一鸣, 等. 不同烹煮方式对米饭食味品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 75-80.
- ZHOU X L, WANG H, ZHOU Y M, et al. Influence of different cooking methods on eating quality of rice[J]. *Food Science*, 2017, 38(11): 75-80.
- [24] 李天真. 碾减率对成品大米品质影响的研究[J]. *食品科技*, 2006, 31(3): 96-100.
- LI T Z. Research on the effect of bran removal degree on rice[J]. *Food Science and Technology*, 2006, 31(3): 96-100.
- [25] 吴凤凤. 发芽对糙米主要营养成分, 生理功效和加工特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- WU F F. Effect of germination on nutritional components, physiological functions and processing characteristics of brown rice[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [26] LAMBERTS L, BIE E D, DERYCKE V, et al. Effect of processing conditions on color change of brown and milled parboiled rice[J]. *Cereal Chemistry*, 2006, 83(1): 80-85.
- [27] 王曦. 发芽糙米饭超高压改性加工技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- WANG X. Study on the modification and processing technology of ultra-high pressure on the germinated brown rice[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [28] 吕昊, 胡亚东, 周晓林, 等. 发酵饲料和微生态制

- 剂对池塘养殖鲤鱼肌肉品质的影响[J]. 科学养鱼, 2017(11): 24-29.
- LÜ H, HU Y D, ZHOU X L, et al. Effects of fermented feed and microecological preparations on muscle quality of pond cultured carp[J]. Scientific Fish Farming, 2017(11): 24-29.
- [29] 熊善柏, 赵思明, 姚霓, 等. 乙醇浸泡对方便米饭品质影响及浸泡工艺优化控制[J]. 粮食与油脂, 2002(5): 39-41.
- XIONG S B, ZHAO S M, YAO N, et al. Effect of soaking ethanol on the properties of instant rice[J]. Cereals & Oils, 2002(5): 39-41.
- [30] 周婷. 糙米发芽过程中营养成分变化规律及新产品开发[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- ZHOU T. Changes of nutrients in the germination of brown rice and development of new product [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014.
- [31] 姚森, 郑理, 赵思明, 等. 发芽条件对发芽糙米中 γ -氨基丁酸含量的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 211-215.
- YAO S, ZHENG L, ZHAO S M, et al. Effect of germination conditions on γ -aminobutyric acid content of germinated brown rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(12): 211-215.
- [32] 冯琳, 陈江枫, 陈明育, 等. 高峰值粘度淀粉及凝胶型淀粉的研制[J]. 现代食品科技, 2010, 26(3): 291-294.
- FENG L, CHEN J F, CHEN M Y, et al. Preparation of starch with high peak viscosity and gel starch [J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(3): 291-294.
- [33] 赵黎平. 发芽及超高压处理对糙米淀粉特性的影响及其在低脂产品中的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- ZHAO L P. Effect of germination and ultra high pressure treatment on brown rice starch's properties and development of low-fat product [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [34] 寇芳, 康丽君, 宁冬雪, 等. 生物发酵处理对小米淀粉分子结构及糊化特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(12): 36-42.
- KOU F, KANG L J, NING D X, et al. Effects of fermentation on molecular structure and pasting properties of millet starch[J]. Food Science, 2017, 38(12): 36-42.
- [35] 叶彦均, 谭斌, 乔聪聪, 等. 生物发酵对糙米品质影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 466-474.
- YE Y J, TAN B, QIAO C C, et al. Research progress on the effect of biological fermentation on brown rice quality [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 466-474.
- [36] 刘贞, 刘小翠, 赵思明, 等. 发酵米浆中高发酵性能酵母菌和乳酸菌的筛选和鉴定[J]. 食品科学, 2010, 31(7): 232-235.
- LIU Z, LIU X C, ZHAO S M, et al. Screening and identification of strains of yeast and *Lactobacillus* with high fermentation performance from fermented rice slurry[J]. Food Science, 2010, 31(7): 232-235.
- [37] 战旭梅, 郑铁松, 陶锦鸿. 质构仪在大米品质评价中的应用研究[J]. 食品科学, 2007, 28(9): 62-65.
- ZHAN X M, ZHNEG T S, TAO J H. Study on application of texture analyzer in quality evaluation of rice[J]. Food Science, 2007, 28(9): 62-65.
- [38] YU Y, PAN F, RAMASWAMY H S, et al. Effect of soaking and single/two cycle high pressure treatment on water absorption, color, morphology and cooked texture of brown rice[J]. J Food Sci Technol, 2017, 54(6): 1655-1664.
- [39] 顾佳缘, 王琰, 杨恒, 等. 不同水分含量糙米动态储藏过程中叶黄素含量及色度值变化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 1-6.
- GU J Y, WANG Y, YANG H, et al. Changes of lutein content and chromatic value in brown rice with different water content during dynamic storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(11): 1-6.
- [40] GHASEMI E, MOSAVIAN M T H, KHODAPARAST M H H. Effect of stewing in cooking step on textural and morphological properties of cooked rice[J]. Rice Science, 2009, 16(3): 243-246.
- [41] 黄亚伟, 徐晋, 王若兰. 不同品种五常大米储藏期间蒸煮品质与质构变化规律及相关性研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(8): 33-38.
- HUANG Y W, XU J, WANG R L. Changes and correlation studies of the cooked character and texture indexes of difference kinds of Wuchang rice during storage [J]. Cereals & Oils, 2016, 29(8): 33-38.

- [42] VIESSER J A, DE MELO PEREIRA G V, DE CARVALHO NETO D P, et al. Co-culturing fructophilic lactic acid bacteria and yeast enhanced sugar metabolism and aroma formation during cocoa beans fermentation[J]. *Int J Food Microbiol*, 2021, 339: 109015.
- [43] ZHAO B B, WANG B L, ZHENG B D, et al. Effects and mechanism of high-pressure homogenization on the characterization and digestion behavior of lotus seed starch-green tea polyphenol complexes[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 57: 173-181.

Effect of Fermentation with Complex Strains on the Taste and Nutritional Properties of Cooked Brown Rice

Ma Lingling^{1,2}, Lin Zexue^{1,2}, Li Jiangnan², Zhao Siming², Niu Meng², Zhang Binjia^{1*}

(¹College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715

²College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract This work investigated the effects of fermentation time, inoculation amount, and strain ratio on the taste and nutritional characteristics of cooked brown rice after fermentation with the complex strain (*Lactobacillus plantarum* and *Saccharomyces castellum*). Results showed that the optimum parameters for brown rice fermentation were as follows: The fermentation time was 6 h, inoculation amount was 1.0% and the ratio of *Lactobacillus plantarum* to *Saccharomyces castellans* was 2:1. Compared with raw brown rice, the setback value of brown rice was significantly decreased under this fermentation condition, and the volume expansion rate and water absorption rate increased from 131.67% and 194.27% to 186.10% and 253.17%, respectively. Meanwhile, the brightness of the prepared brown rice was higher (L^* was 64.23), and the hardness was reduced from 1 388.05 g to 407.28 g, and increased sensory quality (from 71.88 to 78.88). Moreover, the content of reducing sugar, γ -aminobutyric acid (GABA) and soluble protein of cooked brown rice increased obviously. These results indicated that the fermentation of composite strains could improve the taste and nutritional characteristics of cooked brown rice, which could provide a certain reference for the development of cooked brown rice.

Keywords cooked brown rice; composite strain; fermentation; nutritional properties