

# 基于稻谷加温加湿技术的 $\gamma$ -氨基丁酸富化

## Enrichment of $\gamma$ -aminobutyric acid based on rice heating and humidification technology

徐 斌 米行琼 白 琼 徐金龙 刘淑一

XU Bin MI Xingqiong BAI Qiong XU Jinlong LIU Shuyi

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212000)

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212000, China)

**摘要:** 目的: 提高糙米品质。方法: 以  $\gamma$ -氨基丁酸 (GABA) 含量和谷氨酸脱羧酶活性作为指标, 研究富化条件对 GABA 含量的影响; 基于最优参数, 通过分析富化过程中籽粒各部位 GABA 含量, 揭示其迁移规律; 最后分析该法对糙米品质的影响, 并与浸泡法对比。结果: 原料水分含量 14.5%, 富化温度 65 °C, 最终水分含量 20%, 富化时间 5 h 时, GABA 含量最高。富化过程中, GABA 主要在糠层生成, 在生成的同时向内部迁移, 各碾减率的糙米 GABA 含量均在 5 h 达到峰值, 但迁移率在 4 h 后趋于稳定, 胚乳部分的 GABA 迁移率最高可达 87.1%。与浸泡法相比, 加温加湿法富化的糙米偏黄, 爆腰率较低, 米饭更柔软。结论: 加温加湿法优于浸泡法, 可用于制备高 GABA 含量的糙米和精米。

**关键词:** 糙米; 加温加湿;  $\gamma$ -氨基丁酸; 谷氨酸脱羧酶; 迁移规律

**Abstract:** **Objective:** This study aimed to improve the quality of brown rice. **Methods:** The content of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) and the activity of glutamate decarboxylase were used as indicators to study the effect of enrichment conditions on GABA content. Based on the optimal parameters, GABA content in each part of the grain was analyzed to reveal the migration law of GABA. Finally, the effect of the method on the quality of brown rice was analyzed and compared with the soaking method. **Results:** The highest GABA content was obtained when the water content of the raw material was 14.5% with the final moisture content of 20%, enrichment at 65 °C for 5 h. During the enrichment process, GABA was mainly generated in the bran

layer and then migrated inward. The content of GABA in brown rice with different milling rates reached the peak at 5 h, but the migration rate tended to be stable after 4 h. The highest migration rate of GABA in endosperm was 87.1%. Compared with the soaking method, the brown rice enriched by the heating and humidifying method showed a yellower color, lower waist burst rate and softer cooked rice. **Conclusion:** The heating and humidification method is superior to the soaking method and can be used to prepare brown rice and white rice with high GABA content.

**Keywords:** brown rice; heating and humidifying; gamma-aminobutyric acid; glutamic acid decarboxylase; migration rule

$\gamma$ -氨基丁酸 ( $\gamma$ -aminobutyric acid, GABA) 是一种非蛋白氨基酸, 具有助眠安神、降血压、防止动脉肝硬化等多种生理功效, 可作为天然的膳食补充剂<sup>[1]</sup>。水稻是中国重要的粮食作物之一, 在人们日渐强烈的健康需求下, 糙米因其高营养价值深受消费者青睐。

植物富化法因其操作简单、绿色安全且高效成为制备高 GABA 含量食品的主要方法, 目前糙米 GABA 的富化主要采用浸泡萌发法, 可将 GABA 含量提升 2~4 倍<sup>[2]</sup>。已有研究<sup>[3-5]</sup>表明, 在糙米浸泡前对其进行盐、高温、低温、低氧、超声等胁迫处理可大幅提高 GABA 含量, 但盐、低温、低氧和超声胁迫难以实现工业化生产。高温胁迫是在浸泡前对糙米采用短时高温热处理, Youn 等<sup>[6]</sup>研究表明, 在 120~140 °C 下处理 30 s 能促进小麦 GABA 富化; Ratiya 等<sup>[7]</sup>研究表明, 将水稻置于 120 °C 处理 30 s 可使 GABA 含量增加 18.35%; Techo 等<sup>[8]</sup>采用 140~160 °C 处理糙米 1~2 s, 其 GABA 含量为仅浸泡处理的两倍。然而, 将短时高温处理的糙米再置于水中浸泡, 会导致其吸水过快而开裂, 造成爆腰率过高; 并且, 高温处理后的浸泡发芽仍需较长时间 (24~72 h), 会引起水溶性营养成分的流失, 增加微生物繁殖。有研究<sup>[9]</sup>指出,

**基金项目:** 泗洪县科技创新专项 (编号: H202317); 扬州市市级计划——现代农业 (编号: YZ2022040); 苏州市关键核心技术攻关 (农业、社会发展) 项目 (编号: SNG2023020)

**作者简介:** 徐斌, 男, 江苏大学教授, 博士。

**通信作者:** 刘淑一 (1991—), 女, 江苏大学实验师, 博士。

E-mail: 1000006610@ujs.edu.cn

**收稿日期:** 2024-01-21 **改回日期:** 2024-04-16

降低表面和内部之间的水分及温度梯度差可有效改善糙米爆腰情况。因此,考虑降低糙米水分含量和热处理温度,在保证高 GABA 含量的基础上提升糙米品质,但目前关于采用 50~75 ℃ 的中高温富化糙米 GABA 的研究未见报道,其适宜的水分和时间需进一步研究。此外,发芽处理是改善糙米食用品质的有效方法之一,但与精米之间仍存在差距,若将发芽糙米的米胚和麸皮大部分去除, GABA 含量将下降 50%<sup>[10]</sup>。Kamjijam 等<sup>[11]</sup>通过对糙米浸泡发芽过程中的氨基酸定位,发现大部分氨基酸在萌发初期(0~24 h)集中在胚区,72~96 h 后逐渐增加并向内部扩散到胚乳。因此,为制备 GABA 含量与口感俱佳的大米,亟需明确中高温胁迫富化过程中 GABA 是否会由外层向内部迁移及其迁移规律。

研究拟采用加温加湿法对稻谷进行 GABA 富化,首先分析原料水分、富化温度、富化时间和富化水分对糙米中 GABA 含量和谷氨酸脱羧酶 (glutamate decarboxylase, GAD) 活性的影响,以获得最佳工艺参数;并通过分析最佳工艺参数下,富化过程中不同碾减率的糙米中 GABA 含量,阐明 GABA 的迁移规律;最后,与传统浸泡发芽法对比,通过分析糙米的色泽、爆腰率和质地特性,明确加温加湿法对糙米品质的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

南粳 46 稻谷:苏州市太仓市东林农场;

$\gamma$ -氨基丁酸:色谱级,上海源叶生物科技有限公司;

乙醇、碳酸氢钠、无水乙酸钠、冰醋酸、乙二胺四乙酸、氯化钠、L-谷氨酸、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、氢氧化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

乙腈:色谱级,上海麦克林生化科技股份有限公司;

4-二甲基胺基偶氮苯-4-磺酰氯、 $\beta$ -巯基乙醇:分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

磷酸吡哆醛一水合物:生物试剂,上海源叶生物科技有限公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

检验砻谷机:JLGJ·B-45 型,日照粮安仓储设备有限公司;

电热鼓风干燥箱:DHG-9245A 型,上海恒一科学仪器有限公司;

恒温恒湿箱:HWS-260H 型,宁波扬辉仪器有限公司;

磁力搅拌水浴锅:HH-4JS 型,常州朗越仪器制造有限公司;

岛津液相色谱仪器—紫外检测器:LC-20AT 型,岛津企业管理(中国)有限公司;

台式高速离心机:H1-16K 型,湖南可成仪器设备有

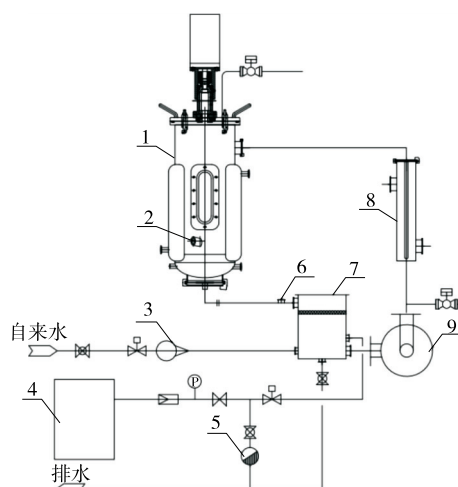
限公司;

精米机:RCI-B5-W 型,爱丽思(中国)集团;

食品物性测试仪:TA-XT-Plus 型,英国 Stable Micro System 公司。

### 1.2 方法

1.2.1 稻谷的加温加湿处理 称取 200 g 稻谷,加入定量的水,于润麦器中混合 2 h,低温(4 ℃)平衡 12 h,使其含水量达到设定值。将经水分调质后的稻谷放入实验室特制的加温加湿装置(构成示意图如图 1 所示),启动雾化加湿模式,通过控制雾化时间使稻谷含水量达到预设富化水分含量,打开高温蒸汽输送管道开关,向稻谷通入预设富化温度的蒸汽,开始加温加湿处理,富化结束后立即置于 45 ℃ 烘箱中烘干至水分约为 14.5%,砻谷后即得糙米样品,于 4 ℃ 下保存备用。



1. 发芽罐 2. 温度变送器 3. 流量计 4. 蒸汽发生器 5. 疏水阀 6. 湿度变送器 7. 湿热混合器 8. 送风加热器 9. 引风机

图 1 加温加湿装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of heating and humidifying device

#### 1.2.2 稻谷加温加湿法的富化试验设计

(1) 富化温度对糙米 GABA 含量的影响:按照 1.2.1 所述方法处理稻谷,取 14.5% 含水量的稻谷置于加温加湿装置中通过雾化加湿使富化中稻谷含水量达到 20%,分别在 55, 60, 65, 70, 75 ℃ 下进行 5 h 的富化处理,测定糙米中 GABA 含量和 GAD 活性。

(2) 富化时间对糙米 GABA 含量的影响:按照 1.2.1 所述方法处理稻谷,取 14.5% 含水量的稻谷置于加温加湿装置中通过雾化加湿使富化中稻谷含水量达到 20%,在 65 ℃ 下分别进行 4, 5, 6, 7, 8 h 的富化处理,测定糙米中 GABA 含量和 GAD 活性。

(3) 富化中稻谷含水量对糙米 GABA 含量的影响:按照 1.2.1 所述方法处理稻谷,取 14.5% 含水量的稻谷置于加温加湿装置中通过控制雾化加湿的时间(30 ~

150 min)将稻谷的含水量分别提升至 16%, 18%, 20%, 22%, 24%, 于 65 °C 下进行 5 h 的富化处理, 测定糙米中 GABA 含量和 GAD 活性。

(4) 稻谷含水量对糙米 GABA 含量的影响: 按照 1.2.1 所述方法处理稻谷, 使富化前稻谷水分含量分别为 11.5%, 13.0%, 14.5%, 16.0%, 17.5%, 之后置于加温加湿装置中通过雾化加湿使富化中稻谷含水量达到 20%, 在 65 °C 下进行 5 h 的富化处理, 测定糙米中 GABA 含量和 GAD 活性。

1.2.3 糙米的碾磨分级 使用 IRIS 小型精米机, 对糙米相继碾磨获得碾减率 (DOM) 分别为 0%, 5%, 10%, 15%, 20% 的大米样品。

1.2.4 稻谷的浸泡发芽处理 参照 Jirapa 等<sup>[2]</sup>的方法。

1.2.5 分析方法

(1) GABA 含量: 参照 NY/T 2890—2016, 修改如下。利用磨粉将糙米粉碎至过 60 目筛, 取 1 g 糙米粉, 加入 10 mL 70% 乙醇, 漩涡混匀, 于室温 (25 °C) 超声提取 30 min, 5 000 r/min 离心 10 min, 将上清液转入 25 mL 容量瓶中, 样品残渣用 10 mL 提取溶液提取 1 次, 合并两次提取液, 将提取液定容至 25 mL, 摇匀。吸取 1 mL 上清液, 依次加入 0.2 mL 0.04 g/mL NaHCO<sub>3</sub>、0.4 mL 2 mg/mL 4-二甲基氨基偶氮苯-4-磺酰氯, 漩涡混匀, 70 °C 孵育 20 min。冷却至室温, 采用微孔过滤器 (0.22  $\mu$ m) 过滤后, 装入 1.5 mL 液相进样瓶待测。色谱柱为 ZORBAX Eclipse Plus C<sub>18</sub> (5  $\mu$ m, 4.6 mm  $\times$  250 mm), 采用流动相 A (50 mmol/L 醋酸钠缓冲液, 69%) 和流动相 B (乙腈, 31%) 洗脱样品 25 min, 柱温 30 °C, 进样量 10  $\mu$ L, 流速 1 mL/min, 在 436 nm 处检测洗脱曲线。

(2) GAD 活性: 参照 Zhang 等<sup>[12]</sup>的方法, 修改如下。取 5.0 g 发芽糙米用提取缓冲液 (50 mmol/L 的磷酸缓冲液, pH 5.7, 0.2 mmol/L 磷酸吡哆醛, 2 mmol/L 乙二胺四乙酸, 0.2 mL/100 mL  $\beta$ -巯基乙醇, 0.15 mol/L NaCl) 4 °C 下研磨成浆, 定容到 50 mL, 静置提取 2 h, 5 000 r/min 离心 10 min, 上清液即为粗酶提取液。取 0.3 mL 粗酶液加入 0.2 mL 底物溶液 (含 50 mmol/L 的磷酸缓冲液, pH 5.7, 0.2 mmol/L 磷酸吡哆醛, 100 mmol/L L-谷氨酸), 30 °C 反应 2 h 后迅速置于冰浴中终止反应, 按照 1.2.5(1) 的方法测定产生的 GABA 含量, 以每 1 h 生成 1  $\mu$ mol 的 GABA 作为一个酶活力单位 (U)。

(3) 糙米色泽: 采用色度计测定<sup>[13]</sup>, 色标用  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  表示。 $L^*$  表示 0~100 范围内的亮度或黑暗,  $a^*$  表示红色(+)和绿色(-),  $b^*$  表示黄色(+)和蓝色(-)。每个样品的色泽值重复 8 次。

(4) 爆腰率: 取糙米 100 粒, 于自制爆腰灯下检查其爆腰情况, 横向有裂纹但未贯穿整个米粒, 为轻度爆腰, 裂纹横向贯穿整个米粒为重度爆腰。爆腰率以重度爆腰

米粒数占总米粒数的百分比表示。

(5) 米饭质地: 参照 Li<sup>[14]</sup>的方法, 修改如下。将糙米和精米 (100 g, 水分含量为 14%) 分别用蒸馏水冲洗 3 次, 按照糙米与水的质量比为 2:3 在米中加入蒸馏水, 采用电饭煲的煮饭模式, 煮饭结束后保温 10 min。舍弃最上层 1 cm 的煮熟米饭层和粘在电饭煲侧面的米饭, 直接从中间取出煮好的米饭, 转移到预热 (120 °C) 的玻璃碗中, 充分混合, 同时尽量减少谷粒破损。将煮熟的米饭冷却到室温 (25 °C) 进行质地测定。使用 TA-XT-Plus 型食品物性测试仪进行测定。取 3 粒外观、大小相近的米粒样品, 等距间隔摆放在底板上, 采用 P/50 探头, 测前、测中速度为 1 mm/s, 压缩比为 75%。每个样品重复 2 组, 每组进行 6 次重复测量。结果以力—时间曲线上峰值处的力表示硬度, 负峰的面积表示黏着性。

1.2.6 数据处理与分析 每组试验重复 3 次, 结果取平均值, 数值以均值  $\pm$  标准差形式表示。采用 Excel 2010 和 Origin 9.0 软件绘制曲线图; 采用 SPSS 22.0 统计分析数据之间的显著性,  $P < 0.05$  说明存在显著性差异,  $P < 0.01$  说明存在极显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 加温加湿富化参数对糙米 GABA 生成效果的影响

2.1.1 富化温度对糙米 GABA 生成效果的影响 如表 1 所示, 糙米经高温富化处理后, GABA 含量均显著上升, 由最初的 43.25 mg/kg 提升至 157.72~234.64 mg/kg。在 55~65 °C 范围内, 随着富化温度的升高, 糙米中的 GABA 含量逐渐上升, 在 65 °C 时达到最大值, 温度继续升高, GABA 含量反而逐渐下降 (表 1), 表明过高或过低的温度均不利于 GABA 的积累。GAD 活性是影响 GABA 富化的重要因素, 60~70 °C 富化温度下的 GAD 活性较高, 而随着富化温度降低或者升高, GAD 活性均显著下降, 与糙米 GABA 含量的变化趋势一致。

糙米中的 GAD 对温度比较敏感, 因此温度是影响 GABA 富化的重要因素, GAD 活性的增加是糙米中 GABA 含量升高的主要原因; 但温度过高会导致 GAD 活

表 1 富化温度对糙米 GABA 含量和 GAD 活性的影响<sup>†</sup>

Table 1 Effects of enrichment temperature on GABA content and GAD activity in brown rice

富化温度/ °C	GABA 含量/ (mg $\cdot$ kg <sup>-1</sup> 干基)	GAD 活性/ (10 <sup>-2</sup> U $\cdot$ g <sup>-1</sup> 干基)
55	157.72 $\pm$ 16.00 <sup>c</sup>	0.57 $\pm$ 0.00 <sup>b</sup>
60	184.08 $\pm$ 9.53 <sup>bc</sup>	1.01 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>
65	234.64 $\pm$ 20.16 <sup>a</sup>	0.80 $\pm$ 0.02 <sup>ab</sup>
70	216.60 $\pm$ 15.02 <sup>ab</sup>	0.79 $\pm$ 0.01 <sup>ab</sup>
75	166.76 $\pm$ 5.37 <sup>c</sup>	0.66 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

性下降, 75 ℃ 时糙米中 GABA 含量显著下降至 166.76 mg/kg。综上, 在原料水分、富化时间和富化水分一定的条件下, 加温加湿法富化 GABA 的最佳富化温度为 65 ℃, 此时糙米中 GABA 含量最高。

2.1.2 富化时间对糙米 GABA 生成效果的影响 如表 2 所示, 富化 4 h 时, 糙米中的 GABA 含量为 205.64 mg/kg, 富化 5 h 时显著增加至 221.32 mg/kg, 但富化 5~7 h 的无显著性差异, 富化 8 h 时 GABA 含量急剧下降; 富化 4 h 时, GAD 的酶活为 1.20 U/100 g, 富化 5 h 时, GAD 活性显著上升, 富化继续进行, GAD 活性逐渐降低, 且富化 6~8 h 的无显著性变化。

表 2 富化时间对糙米 GABA 含量和 GAD 活性的影响<sup>†</sup>  
Table 2 Effects of enrichment time on GABA content and GAD activity in brown rice

富化时间/ h	GABA 含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> 干基)	GAD 活性/ (10 <sup>-2</sup> U · g <sup>-1</sup> 干基)
4	205.64 ± 14.97 <sup>ab</sup>	1.20 ± 0.24 <sup>b</sup>
5	221.32 ± 5.45 <sup>a</sup>	1.64 ± 0.02 <sup>a</sup>
6	224.30 ± 2.29 <sup>a</sup>	1.15 ± 0.01 <sup>b</sup>
7	224.53 ± 6.96 <sup>a</sup>	1.02 ± 0.00 <sup>b</sup>
8	182.17 ± 5.44 <sup>b</sup>	0.99 ± 0.07 <sup>b</sup>

† 同列字母不同表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

富化时间较短时 ( $\leq 4$  h), GAD 尚未被完全激活, GABA 富化量较低, 但富化时间过长 ( $\geq 8$  h), 由于糙米长时间处于高温环境下, 需要自身合成大量的 GABA 来抵抗环境胁迫, 促使 GABA 向琥珀酸转化<sup>[15]</sup>, 导致糙米中 GABA 含量大幅下降; 同时, 长时高温处理可导致 GAD 失活, 使 GABA 的生成受阻, 这是造成 GABA 含量在 8 h 时显著下降的另一重要原因。由此可见, 加温加湿法富化 GABA 的最佳时间为 5 h, 该方法所需时间远小于传统浸泡法 (24~72 h), 可减少微生物的繁殖, 提高糙米卫生品质。

2.1.3 富化水分含量对糙米 GABA 生成效果的影响 如表 3 所示, 当富化水分为 16% 时, 糙米中的 GABA 含量为 193.62 mg/kg, 富化水分增加至 18% 时, GABA 含量显著上升, 但当富化水分为 18%~24% 时, GABA 含量无显著差异。糙米中的 GAD 活性随富化水分的增加呈先增加后降低的趋势, 在富化水分为 20% 时活性最高。

稻谷含水率会影响内源酶活性, 含水率提升至适宜水平是糙米萌动的必要条件, 加水量较低时, 大量水分被稻壳吸收, 胚芽未吸收足够水分, 内源酶也未被完全激活, 因此富化水分为 16% 时, GAD 活力和 GABA 含量最低。当施加水分充足时, 表层的水分子层使糙米处于轻度厌氧胁迫环境下, 有利于提高 GAD 活性, 因此, 富化水分为 20% 时, GAD 活性最高, 并且除 GAD 以外, 淀粉酶、

表 3 稻谷富化水分含量对糙米 GABA 含量和 GAD 活性的影响<sup>†</sup>

Table 3 Effects of rice enriched water content on GABA content and GAD activity in brown rice

富化水分 含量/%	GABA 含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> 干基)	GAD 活性/ (10 <sup>-2</sup> U · g <sup>-1</sup> 干基)
16	193.62 ± 13.26 <sup>b</sup>	0.72 ± 0.05 <sup>b</sup>
18	248.90 ± 10.81 <sup>a</sup>	0.86 ± 0.00 <sup>ab</sup>
20	225.43 ± 11.35 <sup>ab</sup>	0.92 ± 0.00 <sup>a</sup>
22	250.27 ± 3.31 <sup>a</sup>	0.77 ± 0.04 <sup>b</sup>
24	213.33 ± 5.09 <sup>ab</sup>	0.76 ± 0.06 <sup>b</sup>

† 同列字母不同表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

蛋白酶等也被激活, 相关酶促反应和非酶反应的发生均达到饱和状态<sup>[16]</sup>, 此时即使再施加水分, GABA 含量变化不大, 使得富化水分为 18%~22% 的糙米 GABA 含量处于较高水平。然而, 富化水分含量过高时, 糙米吸水速率加快的同时, 裂纹率的增加破坏了胚乳组织结构, 内源酶的反应体系受到严重破坏<sup>[17]</sup>, 因此, 富化水分为 22% 和 24% 时, GAD 活性较低。综上所述, 富化水分为 20% 时, GAD 活力最高, GABA 处于较高水平, 且更高的水分含量会增加后续的干燥成本, 因此, 加温加湿法的 GABA 富化方法中最佳富化水分含量为 20%, 与传统浸泡法相比, 较低的水分可减少水溶性营养物质的溶出, 并减少微生物的繁殖, 提高 GABA 糙米的营养和卫生品质。

2.1.4 富化前稻谷水分含量对糙米 GABA 生成效果的影响 如表 4 所示, 不同原料水分含量下富化后糙米的 GABA 含量之间无显著差异, 表明原料水分对糙米 GABA 合成前体物质以及最终的 GABA 含量无显著影响。此外, 11.5%~17.5% 原料水分下糙米 GAD 活性呈先增加后降低的趋势, 14.5% 时其值最高。若富化前稻谷水分含量较低, 富化时调节水分会造成糙米吸水速率过快而导致裂纹率增加, 再进行碾磨等精加工时将导致高碎米率, 降低其加工品质; 若富化前稻谷水分含量较高,

表 4 富化前稻谷含水量对糙米 GABA 含量和 GAD 活性的影响<sup>†</sup>

Table 4 Effects of rice moisture before enrichment on GABA content and GAD activity

富化前稻谷 水分含量/%	GABA 含量/ (mg · kg <sup>-1</sup> 干基)	GAD 活性/ (10 <sup>-2</sup> U · g <sup>-1</sup> 干基)
11.5	213.43 ± 16.59	0.52 ± 0.04 <sup>c</sup>
13.0	215.39 ± 4.01	0.84 ± 0.05 <sup>b</sup>
14.5	213.54 ± 21.18	1.23 ± 0.13 <sup>a</sup>
16.0	208.93 ± 1.11	0.95 ± 0.01 <sup>b</sup>
17.5	210.11 ± 5.16	0.88 ± 0.02 <sup>b</sup>

† 同列字母不同表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。



可能会造成稻谷在贮藏过程中易发霉变质,对贮藏环境的要求较高,增加成本,因此,将 14.5%作为最佳的原料水分进行后续研究。

2.2 加温加湿富化过程中糙米 GABA 生成与迁移规律

为分析富化过程中糙米中 GABA 的生成与迁移规

律,在最佳富化工艺参数下(富化温度 65 ℃、富化水分含量 20%、原料水分含量 14.5%)对稻谷进行加温加湿处理,并于不同时间取样,将稻谷干燥脱壳后使用精米机通过控制碾米时间得到碾减率分别为 0%,5%,10%,15%,20%的样品,测定其 GABA 含量,结果如表 5 所示。

表 5 富化过程中 GABA 含量变化<sup>†</sup>

富化时间/h	GABA 含量/(mg · kg <sup>-1</sup> 干基)				
	DOM 为 0%	DOM 为 5%	DOM 为 10%	DOM 为 15%	DOM 为 20%
0	43.25±6.02 <sup>Ac</sup>	14.44±0.95 <sup>Bd</sup>	9.32±0.89 <sup>Bd</sup>	8.54±0.30 <sup>Be</sup>	8.18±0.87 <sup>Be</sup>
1	142.66±2.23 <sup>Ad</sup>	125.56±1.09 <sup>ABc</sup>	112.72±1.22 <sup>BCc</sup>	94.09±6.17 <sup>CDd</sup>	80.67±10.11 <sup>Dd</sup>
2	169.52±1.09 <sup>Ac</sup>	159.89±3.23 <sup>ABc</sup>	136.19±4.61 <sup>Bc</sup>	133.54±11.01 <sup>Bc</sup>	119.81±2.47 <sup>Bc</sup>
3	219.58±5.46 <sup>Ab</sup>	207.31±7.75 <sup>ABab</sup>	195.60±10.47 <sup>ABb</sup>	172.89±19.59 <sup>Bb</sup>	171.09±8.09 <sup>Bb</sup>
4	219.53±12.77 <sup>b</sup>	211.40±9.80 <sup>ab</sup>	210.66±10.62 <sup>ab</sup>	202.57±6.26 <sup>ab</sup>	191.21±1.93 <sup>a</sup>
5	265.97±3.76 <sup>Aa</sup>	244.26±15.56 <sup>ABa</sup>	235.68±1.34 <sup>ABa</sup>	216.56±8.88 <sup>BCa</sup>	201.44±5.16 <sup>Cab</sup>
6	244.32±5.32 <sup>ab</sup>	238.66±31.52 <sup>a</sup>	224.90±20.49 <sup>ab</sup>	197.65±1.66 <sup>ab</sup>	203.31±5.73 <sup>a</sup>
8	227.53±9.01 <sup>b</sup>	219.53±20.33 <sup>a</sup>	201.55±2.82 <sup>ab</sup>	200.18±2.05 <sup>ab</sup>	189.25±3.93 <sup>ab</sup>

<sup>†</sup> 大写字母不同表示同行差异显著( $P<0.05$ );小写字母不同表示同列差异显著( $P<0.05$ )。

由表 5 可知,对于未处理的糙米(富化 0 h),碾减率为 0%时,GABA 含量为 43.25 mg/kg,当碾减率为 5%时,显著下降至 14.44 mg/kg,并随碾减率增加,其值无显著变化,说明 GABA 集中分布在糙米的糠层,与 Liu<sup>[18]</sup>的研究结果一致。经加温加湿处理后,糙米 GABA 含量显著增加,且随着富化时间的延长,不同碾减率的糙米中 GABA 含量均呈先快速升高后略微下降的变化趋势,在富化 5 h 时达到最高值。富化 5~8 h 时,碾减率为 0%的糙米 GABA 含量下降 14.45%,而碾减率为 20%时,其值仅下降 6.05%,说明随富化时间延长,越靠内部糙米中的 GABA 越稳定。稻谷在雾化加湿着水过程中,大部分水首先囤积在稻壳与糙米之间的空隙中,糙米内外部存在水分梯差,此时胚芽处吸水水分,GAD 被激活,谷氨酸脱羧开始向 GABA 转化,同时随着富化时间的延长,籽粒内外部的水分差推动水分向糙米内部的迁移,水溶性的 GABA 在糠层生成的同时也不断向内部转移。试验过程中发现,虽然样品处于密闭环境中,但富化结束后稻谷的水分含量由 20%下降至 18%,说明长时间高温仍可导致水分少量散失,因此,富化 5 h 后由于内部水分的向外部迁移,内部 GABA 也少量向外部迁移,造成各碾减率糙米中 GABA 含量的下降;同时,由于富化时间过长,GABA 向琥珀酸转化,也会导致各碾减率下 GABA 含量的下降。

进一步对糙米中的 GABA 由胚芽向内部各部分的迁移率进行了计算,GABA 迁移率为同等碾磨程度下富化前后的 GABA 含量增量与富化后未碾磨糙米的 GABA 含量之比。如图 2 所示,富化 0~1 h 时 GABA 由糙米外层向内层的迁移率快速增加,富化 1~4 h 时 GABA 迁移率仍逐渐增加,但趋势变缓,在富化 4h 时达到最高值,且

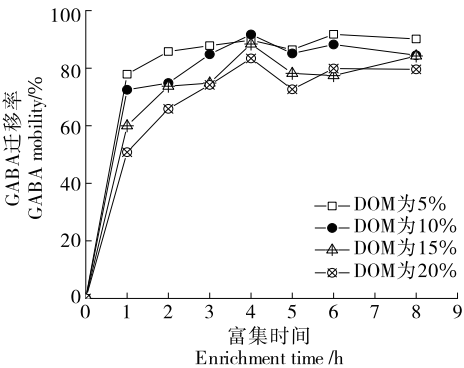


图 2 富化过程中 GABA 的迁移率

Figure 2 Mobility of GABA during enrichment

碾减率越高,迁移率的变化量越大,富化 4 h 之后其值趋于平稳。此外,随着富化时间的延长,不同碾减率的 GABA 迁移率之间的差异越小,说明 GABA 在糙米内部的分布逐渐趋于平衡。GABA 呈水溶性,可随稻谷中的水分浓度梯度迁移,其迁移速率与水分扩散速率密切相关<sup>[15,19]</sup>。富化 0~1 h,稻谷吸水并迅速扩散,使得该时间段的迁移率较高;富化 1~4 h,水分扩散速率变缓,且越靠外层水分的迁移越不明显,造成该时间段的迁移率变缓,因此碾减率越低,迁移率的变化越小。富化 4 h 后,稻谷内部水分含量趋近平衡,GABA 向中心的迁移扩散速率减慢,因而富化 5~8 h 的 GABA 迁移率逐渐趋于平稳。

2.3 两种富化方式下的糙米品质对比

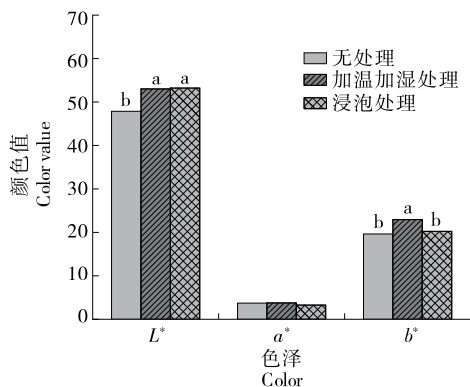
Mizuno 等<sup>[20]</sup>研究发现,富化过程中的温湿度变化将引起内部传质和相关酶活性的改变,可促进糙米中

GABA 实现内部迁移。富化 0 h 的糙米胚乳 GABA 含量仅占整籽粒的 18.91%，随着富化时间的延长，糙米胚乳处 GABA 含量占比大幅提高，富化 1 h 后胚乳 GABA 占比即提升至 56.55%，最终均能达到 70% 以上，最高可达 87.1% ( $t=4$  h)，表明加温加湿处理可实现糙米糠层中的 GABA 向胚乳内部的转移富化。由于糙米米糠层中含有植酸盐、糠蜡及纤维素等物质，因此蒸煮时水分难以进入籽粒内部使淀粉完全糊化，导致烹饪时间长，硬度和咀嚼性高，食用口感较差。GB/T 42173—2022《发芽糙米》中规定，发芽糙米中的 GABA 含量需高于 130 mg/kg。试验结果表明，碾减率为 20% 时，富化 5 h 得到的大米中 GABA 含量仍高于 200 mg/kg。因此，加温加湿法可作为制备 GABA 精米的方法，在有效提高食用品质的同时能保留较高的 GABA 含量。

2.3.1 富化对糙米色泽的影响 由图 3 所示，与未经过 GABA 富化处理的糙米相比，采用两种富化方式处理后，糙米的  $L^*$  值均显著增加，但  $a^*$  无显著变化，加温加湿法的  $b^*$  值显著增加，而浸泡发芽法的  $b^*$  值无显著变化。

在 GABA 富化过程中，由于高温高湿环境促使吸足水分的糙米内部氨基化合物发生了一系列反应，导致色度  $L^*$  值升高<sup>[21]</sup>，糙米的亮度提高。与浸泡法相比，加温加湿法处理后的糙米  $b^*$  值较高，说明其偏黄，褐变程度更高，这主要是由于长时间的高温处理导致糙米水分含量相对降低，使得部分还原糖脱水导致以红色物质为主的焦糖化反应的发生，且较高的富化温度 (65 °C) 导致美拉德反应速率加快，褐变程度加剧，糙米颜色由浅黄变为深黄<sup>[22]</sup>。

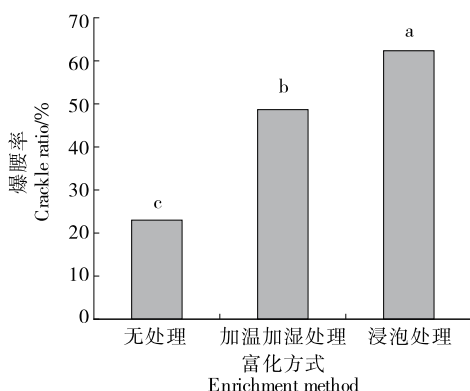
2.3.2 富化对糙米爆腰率的影响 如图 4 所示，浸泡处理后的糙米爆腰率最高，为 62.33%，是加温加湿法的 1.28 倍，但两种富化方式的爆腰率均高于未处理糙米。加温加湿法的加水速率较慢，同时高温有利于消除糙米内部的水分梯度，因此爆腰率更低。



字母不同表示同个指标之间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 3 不同富化方式下的糙米色泽

Figure 3 Color of brown rice prepared by different enrichment methods

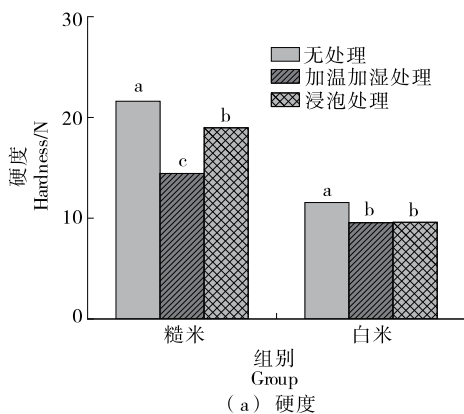


字母不同表示不同处理方式之间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 4 不同富化方式下的糙米爆腰率

Figure 4 Crackle rate of brown rice prepared by different enrichment methods

2.3.3 富化对米饭质地特性的影响 由图 5(a) 所示，与未处理的样品相比，经两种方式富化处理后煮制的糙米丁酸主要在糠层生成，在生成的同时随水分的扩散不断



字母不同表示不同处理方式之间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 5 不同富化方式下糙米和精米饭的质地特性

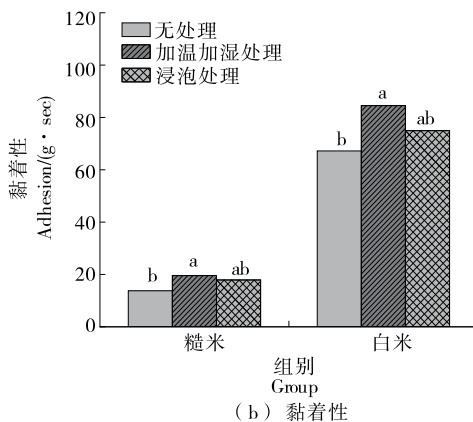


Figure 5 Texture characteristics of brown rice and white rice under different enrichment methods

向内部迁移;各碾减率的糙米  $\gamma$ -氨基丁酸含量均随碾米率的增加而显著下降,其中,经加温加湿处理后的糙米碾米率最低,而两种富化方式的白米饭之间无显著性差异。由图 5(b)可知,经富化处理后,糙米饭和精米饭的黏着性均有所上升,其中加温加湿富化处理后的黏着性最高,但两种处理方式的黏着性之间无显著差异。

GABA 富化过程中,多种内源酶被激活,纤维素和半纤维素经酶解后,米粒皮层组织软化,且表面微观结构发生了变化,导致富化处理后糙米和精米饭的硬度显著降低;同时,糙米表面组织结构的变化,使糙米和精米在煮制过程中淀粉更易浸出并黏附在表面,从而造成富化处理后米饭的黏着性增大<sup>[23]</sup>。与浸泡法相比,加温加湿法处理后的糙米和精米饭硬度更低,说明该法在一定程度上对米饭质构特性的改善效果更佳。

### 3 结论

(1) 原料水分含量为 14.5%,富化温度 65℃,富化水分含量 20%,富化时间 5 h 是稻谷加温加湿法富化  $\gamma$ -氨基丁酸的最佳条件。富化时,温度过高或较低、时间较短或过长以及稻谷水分不足或过量,均会使谷氨酸脱羧酶活性较低,且富化时间过长会导致  $\gamma$ -氨基丁酸向琥珀酸转化,不利于  $\gamma$ -氨基丁酸的积累。

(2) 在稻谷加温加湿富化  $\gamma$ -氨基丁酸过程中, $\gamma$ -氨基在 5 h 达到最高值,但迁移率在 4 h 后趋于不变,且越靠内部,迁移率的差异越小, $\gamma$ -氨基丁酸在糙米内部的分布逐渐趋于平衡;胚乳部分(碾减率为 20%)的  $\gamma$ -氨基丁酸含量最高可达 203.31 mg/kg,迁移率可达 87.1%。

(3) 与浸泡法相比,采用加温加湿法制备的  $\gamma$ -氨基丁酸糙米  $b^*$  值较高,爆腰率较低,煮后糙米和精米的硬度较低。

(4) 该研究从富化参数以及过程中糙米籽粒各部位  $\gamma$ -氨基丁酸含量变化明确加温加湿法下  $\gamma$ -氨基丁酸的富化迁移规律,后续可从  $\gamma$ -氨基丁酸代谢基因的表达水平以及中间代谢产物的变化进一步阐明  $\gamma$ -氨基丁酸富化的分子机制。

### 参考文献

[1] RASHMI D, ZANAN R, JOHN S, et al.  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA): Biosynthesis, role, commercial production, and applications[J]. *Studies in Natural Products Chemistry*, 2018, 57: 413-452.

[2] JIRAPA K, JARAE Y, PHANEE R, et al. Changes of bioactive components in germinated paddy rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *International Food Research Journal*, 2016, 23: 229-236.

[3] 丁俊肖. 低氧胁迫与超声场激发对发芽糙米中  $\gamma$ -氨基丁酸积累的影响及其代谢机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 5-128.

DING J Z. Effects of hypoxic stress and ultrasonic stimulation on the  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) accumulation in germinating

dehulled rice and metabolomic mechanism[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016: 5-128.

[4] GUO Y X, CHEN H, SONG Y, et al. Effects of soaking and aeration treatment on  $\gamma$ -aminobutyric acid accumulation in germinated soybean (*Glycine max* L.) [J]. *European Food Research and Technology*, 2011, 232(5): 787-795.

[5] AL-QURAAN N A, AL-SHARE A T. Characterization of the  $\gamma$ -aminobutyric acid shunt pathway and oxidative damage in *Arabidopsis thaliana* pop 2 mutants under various abiotic stresses[J]. *Biologia Plantarum*, 2016, 60(1): 132-138.

[6] YOUN Y S, PARK J K, JANG H D, et al. Sequential hydration with anaerobic and heat treatment increases GABA ( $\gamma$ -aminobutyric acid) content in wheat[J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(4): 1 631-1 635.

[7] RATIYA T, UMAPORN Y, DONLUDEE J, et al. Enhancement of  $\gamma$ -aminobutyric acid in germinated paddy by soaking in combination with anaerobic and fluidized bed heat treatment[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2015, 95: 55-62.

[8] TECHO J, SOPONRONNARIT S, DEVAHASTIN S, et al. Effects of heating method and temperature in combination with hypoxic treatment on  $\gamma$ -aminobutyric acid, phenolics content and antioxidant activity of germinated rice[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(4): 1 330-1 341.

[9] MOHAMMAD F D, MORTEZA G, REZA P, et al. On the characteristics of thin-layer drying models for intermittent drying of rough rice[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2015, 202(8): 1 024-1 035.

[10] 刘彦霄. 碾减率对大米营养品质和食用品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022: 33.

LIU Y X X. Effects of degree of milling on nutritional quality and eating quality of rice[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022: 33.

[11] KAMJIJAM B, BEDNARZ H, SUWANNAPORN P, et al. Localization of amino acids in germinated rice grain: Gamma-aminobutyric acid and essential amino acids production approach [J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 93: 102958.

[12] ZHANG H, YAO H Y, CHEN F, et al. Purification and characterization of glutamate decarboxylase from rice germ[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(4): 1 670-1 676.

[13] PENG S, XU C H, CHEN W D, et al. Quality formation of germination brown rice under microwave drying: From GABA content to color value [J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2021, 33(8): 621-628.

[14] LI H Y. Understanding the texture of cooked rice from the molecular, instrumental and sensory levels[D]. Queensland: The University of Queensland, 2017: 47.

[15] SHELPI B J, BOWN A W, MCLEAN M D. Metabolism and functions of gamma-aminobutyric acid[J]. *Trends in Plant Science*, 1999, 4(11): 446-452.

(下转第 26 页)

- [22] GUUNDY M M L, QUINT J, RIEDER A, et al. Impact of hydrothermal and mechanical processing on dissolution kinetics and rheology of oat  $\beta$ -glucan[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 166: 387-397.
- [23] CYRAN M R, SNOCHOWSKA K K. Evidence of intermolecular associations of  $\beta$ -glucan and high-molar mass xylan in a hot water extract of raw oat groat [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 272: 118463.
- [24] 陈中伟, 汪玲, 牛瑞, 等. 裸燕麦米和燕麦粉加工所得麸皮中  $\beta$ -葡聚糖和酚酸的分布[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 1-6.  
CHEN Z W, WANG L, NIU R, et al. Distribution of  $\beta$ -glucan and phenolic acids in oat bran (*Avena nuda*) from the processing of oat roce and oat flour[J]. Food Science, 2018, 39(10): 1-6.
- [25] HENRION M, FRANCEY C, LÊ K A. Cereal  $\beta$ -glucans: The impact of processing and how it affects physiological responses[J]. Nutrients, 2019, 11(8): 1 729.
- [26] ZHAO Y, ZHOU H M, HUANG Z H. Different aggregation states of barley  $\beta$ -glucan molecules affects their solution behavior: A comparative analysis[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105543.
- [27] DJURLE S, ANDERSSON A A, ANDERSSON R. Milling and extrusion of six barley varieties, effects on dietary fibre and starch content and composition[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 72: 146-152.
- [28] 李金冉. 食品加工对燕麦  $\beta$ -葡聚糖理化性质和生理活性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 3.  
LI J R. The influence of food processing on the physicochemical and physiological properties of oat  $\beta$ -glucan [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021: 3.
- [29] 申瑞玲, 王章存, 姚惠源. 燕麦  $\beta$ -葡聚糖对小鼠肠道菌群的影响[J]. 食品科学, 2005(2): 208-212.
- SHEN R L, WANG Z C, YAO H Y. Effect of oat  $\beta$ -glucan on intestinal flora in mice[J]. Food Science, 2005(2): 208-212.
- [30] BHATTARAI R R, DHITAL S, WILLIAMS B A, et al. In vitro fermentation of legume cells and components: Effects of cell encapsulation and starch/protein interactions [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106538.
- [31] MCALLISTER T A, NEWBOLD C J. Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2008, 48(2): 7-13.
- [32] BAI J Y, LI Y, ZHANG W H, et al. Source of gut microbiota determines oat  $\beta$ -glucan degradation and short chain fatty acid-producing pathway[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 101010.
- [33] ABBEELE P V D, KAMIL A, FLEIGE L, et al. Different oat ingredients stimulate specific microbial metabolites in the gut microbiome of three human individuals in vitro[J]. ACS Omega, 2018, 3(10): 12 446-12 456.
- [34] 金姝, 张斌, 高彤, 等. 粒径和含结合酚不溶性膳食纤维对白芸豆皮体外发酵特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 118-127.  
JIN S, ZHANG B, GAO T, et al. Effect of particle size and phenolics bounded-insoluble dietary fiber on the in vitro fermentation properties of white kidney bean skin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 118-127.
- [35] STEWART M L, SLAVIN J L. Particle size and fraction of wheat bran influence short-chain fatty acid production in vitro[J]. British Journal of Nutrition, 2009, 102(10): 1 404-1 407.
- [36] TUNCIL Y E, THAKKAR R D, MARCIA A D R, et al. Divergent short-chain fatty acid production and succession of colonic microbiota arise in fermentation of variously-sized wheat bran fractions[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 16655.
- (上接第 19 页)
- [16] MA Y L, TONG L T, LI J, et al. Comparison of  $\gamma$ -aminobutyric acid accumulation capability in different mung bean (*Vigna radiata* L.) varieties under heat and relative humidity treatment, and its correlation with endogenous amino acids and polyamines [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 56(4): 1 562-1 573.
- [17] 邱硕, 贾富国, 韩燕龙, 等. 糙米发芽前含水率提升工艺优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 345-350.  
QIU S, JIA F G, HAN Y L, et al. Optimization of moisture increase technique for brown rice before its germination [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 345-350.
- [18] LIU R H. Whole grain phytochemicals and health[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 46(3): 207-219.
- [19] LI Y, CHE G, WAN L, et al. Effects of a combined processes of low-pressure steam enrichment and low-pressure superheated steam drying on the  $\gamma$ -aminobutyric acid content of japonica rice [J]. Journal of Chemistry, 2022, 2 022: 8196654.
- [20] MIZUNO H, FUKUMORI T, LIU K, et al. The influence of heating and humidifying by humidified air on GABA generation and quality in paddy [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2012, 74(3): 226-233.
- [21] 王斐. 发芽糙米的生产工艺研究及热风干燥设备的改进[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020: 54.  
WANG F. Study on production technology of germinated brown rice and improvement of hot air drying equipment[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020: 54.
- [22] MIAH M, HAQUE A, DOUGLASS M, et al. Parboiling of rice part I: Effect of hot soaking time on quality of milled rice[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37: 527-537.
- [23] LI H Y, FITZGERALD M A, PRAKASH S, et al. The molecular structural features controlling stickiness in cooked rice, a major palatability determinant[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 43713.