

# 高 $\gamma$ -氨基丁酸发芽糙米的循环加湿生产工艺研究

温翠娟,周敏,张露丹,明瑶,吕晓华\*

(四川大学 华西公共卫生学院/华西第四医院,四川 成都 610041)

**摘要:** 探索生产高含量 $\gamma$ -氨基丁酸( $\gamma$ -aminobutyric acid, GABA)发芽糙米的循环加湿工艺的最优条件。采用单因素试验和正交试验,对循环加湿生产工艺的发芽温度、 $\text{CaCl}_2$ 浓度、纤维素酶浓度、谷氨酸钠浓度和发芽时间条件进行筛选,高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)法检测发芽糙米中 GABA 含量。当循环加湿工艺的发芽温度为 40℃、 $\text{CaCl}_2$ 浓度为 1.0 mg/mL、纤维素酶浓度为 0.96 mg/mL、谷氨酸钠浓度为 0.8 mmol/L、发芽时间为 63 h 时,发芽糙米的 GABA 含量最高,达同品种未发芽糙米 GABA 含量的近 5 倍。结果表明,循环加湿工艺可以大幅度提高发芽糙米的 GABA 含量。

**关键词:** 糙米;发芽; $\gamma$ -氨基丁酸(GABA);循环加湿;工艺优化

## Cyclic Humidification of Germinated Brown Rice Enriched with Gamma-aminobutyric Acid

WEN Cui-juan, ZHOU Min, ZHANG Lu-dan, MING Yao, LÜ Xiao-hua\*

(West China School of Public Health and West China Fourth Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** The present study explored optimal conditions for cyclic humidification of germinated brown rice enriched with gamma-aminobutyric acid (GABA). The cyclic humidification conditions, including germination temperature,  $\text{CaCl}_2$  concentration, cellulase concentration, sodium glutamate concentration, and germination time were determined by single factor and orthogonal tests. High performance liquid chromatography (HPLC) was used to determine the GABA content in germinated brown rice. The GABA content peaked in germinated brown rice at germination temperature of 40℃,  $\text{CaCl}_2$  concentration of 1.0 mg/mL, cellulase concentration of 0.96 mg/mL, sodium glutamate concentration of 0.8 mmol/L, and germination time of 63 h, nearly 5 times that of ungerminated brown rice of the same species. The results showed that the cyclic humidification processing could substantially increase the GABA content of germinated brown rice.

**Key words:** brown rice; germination; gamma-aminobutyric acid (GABA); cyclic humidification; processing optimization

引文格式:

温翠娟,周敏,张露丹,等.高 $\gamma$ -氨基丁酸发芽糙米的循环加湿生产工艺研究[J].食品研究与开发,2022,43(9):132-137.

WEN Cuijuan, ZHOU Min, ZHANG Ludan, et al. Cyclic Humidification of Germinated Brown Rice Enriched with Gamma-aminobutyric Acid[J]. Food Research and Development, 2022, 43(9): 132-137.

糙米是稻谷脱去颖壳后的颖果,由皮层、糊粉层、胚乳和胚组成,较好地保留了稻谷中绝大部分营养物质,其生理活性和营养价值远高于精米<sup>[1]</sup>。但糙米因被

高密度的粗纤维和糠蜡包裹,导致其口感粗糙、蒸煮性差;且糙米中的微量元素与植酸结合,难以被人体消化吸收<sup>[2]</sup>。糙米在发芽过程中,不仅保留原有成分,

基金项目:2017年四川省高校人文社会科学重点研究基地科研项目(MLS1701)

作者简介:温翠娟(1997—),女(汉),硕士研究生,研究方向:营养与食品卫生学。

\*通信作者:吕晓华(1971—),女(锡伯),教授,博士,研究方向:特殊人群营养。

而且多种生物酶被激活,使蛋白质、维生素、 $\gamma$ -氨基丁酸( $\gamma$ -aminobutyric acid, GABA)等成分含量升高<sup>[3]</sup>,与植酸结合的营养成分变为游离态,米糠层纤维被软化,从而提高了糙米的营养价值、适口性和消化吸收度。

GABA 是一种存在于脊椎动物、植物和微生物中的氨基酸,也是人体神经系统重要的抑制性神经递质,参与体内多种生理过程,如影响学习与记忆<sup>[4]</sup>、降血压<sup>[5]</sup>、降血糖<sup>[6]</sup>、抗抑郁<sup>[7]</sup>、抗焦虑<sup>[8]</sup>、抗肿瘤<sup>[9]</sup>等,作为一种新型功能性因子,已广泛应用于食品工业领域。植物组织中 GABA 的含量极低,植物在受到缺氧、热激、冷激、机械损伤、盐胁迫等胁迫应激时,GABA 会迅速产生富集<sup>[9]</sup>。利用富含 GABA 的发芽糙米、大豆和蚕豆等原料开发功能食品已成为研究热点。目前,采用浸泡发芽法生产发芽糙米时,糙米急剧吸水导致爆腰率增加<sup>[10]</sup>,水溶性 GABA 流失,影响其食用品质和营养价值;且用水量和污水排放量较大,不利于节能减排。本文采用循环洒水加湿法,探索糙米发芽的适宜条件,优化糙米发芽工艺,以生产高  $\gamma$ -氨基丁酸发芽糙米,提高糙米的食用价值,为工业化生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

糙米品种(Long Qin Dao 08-163)由四川省农业科

学院农产品加工研究所提供,符合 GB 2715—2016《食品安全国家标准 粮食》的标准。

### 1.2 仪器与主要试剂

Agilent 1260 Infinity 高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)仪(配置 G1311B 四元梯度泵、G1329B 自动进样仪、G1316A 柱温箱、G13150 紫外检测器);美国 Agilent 公司;A01 型双层发芽机;中山市容威电器有限公司。

GABA 标准品(色谱纯,纯度>98%);美国 Sigma 公司;乙腈(色谱纯);北京迈瑞达科技有限公司;乙酸钠、氯化钙、纤维素酶(酶活:5 000 U/g)、谷氨酸钠(均为分析纯);成都市科龙化工试剂厂。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 发芽糙米制备

人工筛选糙米,去除不完善粒、杂质等;去杂后用蒸馏水清洗糙米 3 遍,洗去表面的灰尘和糠粉,沥干,经 1%(质量分数)的次氯酸钠溶液消毒 10 min,再用超纯水漂洗 3 遍。把经前处理的糙米平铺于发芽机的置物盘上,将  $\text{CaCl}_2$ 、纤维素酶和谷氨酸钠按计划浓度配制发芽液,每 20 min 洒水加湿一次(多余的发芽液从置物盘的孔径中漏走),每 12 h 换一次发芽液,并置于计划温度下和计划时间内发芽。发芽结束后,将发芽糙米漂洗后 50  $^{\circ}\text{C}$  烘干,粉碎后过 60 目筛,即得米样。具体流程见图 1。

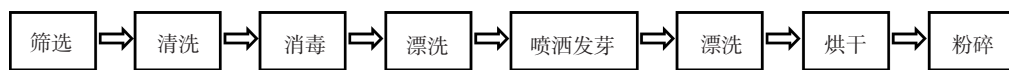


图 1 发芽糙米制备工艺流程

Fig.1 Preparation process of germinated brown rice

#### 1.3.2 单因素试验

根据文献设计发芽温度、 $\text{CaCl}_2$  浓度、纤维素酶浓度、谷氨酸钠浓度和发芽时间,观察不同发芽条件对发芽糙米 GABA 含量的影响。

##### 1.3.2.1 温度对发芽糙米 GABA 含量的影响

将发芽温度分别设定为 25、30、35、40、45  $^{\circ}\text{C}$ ,糙米用清水发芽 24 h,测定 GABA 含量。

##### 1.3.2.2 $\text{CaCl}_2$ 浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响

在发芽温度为 40  $^{\circ}\text{C}$ 、发芽时间为 24 h 的情况下,将发芽液中的  $\text{CaCl}_2$  浓度分别设定为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mg/mL,对糙米进行发芽,测定 GABA 含量。

##### 1.3.2.3 纤维素酶浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响

在发芽温度为 40  $^{\circ}\text{C}$ 、发芽时间为 24 h、发芽液中  $\text{CaCl}_2$  浓度为 1.5 mg/mL 的条件下,将发芽液中的纤维素酶浓度分别设定为 0.32、0.64、0.96、1.28、1.60、

1.92 mg/mL,对糙米进行发芽,测定 GABA 含量。

##### 1.3.2.4 谷氨酸钠浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响

在发芽温度为 40  $^{\circ}\text{C}$ 、发芽时间为 24 h、发芽液中  $\text{CaCl}_2$  浓度为 1.5 mg/mL、纤维素酶浓度为 1.28 mg/mL 的情况下,将发芽液中的谷氨酸钠浓度分别设定为 0.8、1.2、1.6、2.0、2.4 mmol/L,对糙米进行发芽,测定 GABA 含量。

##### 1.3.2.5 时间对发芽糙米 GABA 含量的影响

在发芽温度为 40  $^{\circ}\text{C}$ ,发芽液中  $\text{CaCl}_2$  浓度为 1.5 mg/mL、纤维素酶浓度为 1.28 mg/mL 和谷氨酸钠浓度为 1.2 mmol/L 的情况下,将发芽时间分别设定为 24、39、48、63、72、87 h,糙米进行发芽,测定 GABA 含量。

### 1.3.3 正交试验

在糙米发芽条件单因素试验的基础上,以发芽温度、 $\text{CaCl}_2$  浓度、纤维素酶浓度、谷氨酸钠浓度和发芽时

间为变量,每个变量设定4个水平,进行五因素四水平正交试验以确定最优的制备工艺条件,正交试验因素水平见表1。

表1  $L_{16}(4^5)$ 正交试验因素水平Table 1 Factors and levels of  $L_{16}(4^5)$  orthogonal test

| 水平 | 因素       |                              |                  |                   |          |
|----|----------|------------------------------|------------------|-------------------|----------|
|    | A 发芽温度/℃ | B $\text{CaCl}_2$ 浓度/(mg/mL) | C 纤维素酶浓度/(mg/mL) | D 谷氨酸钠浓度/(mmol/L) | E 发芽时间/h |
| 1  | 25       | 0.5                          | 0.32             | 0.8               | 24       |
| 2  | 30       | 1.0                          | 0.64             | 1.2               | 39       |
| 3  | 35       | 1.5                          | 0.96             | 1.6               | 48       |
| 4  | 40       | 2.0                          | 1.28             | 2.0               | 63       |

### 1.3.4 $\gamma$ -氨基丁酸的测定

#### 1.3.4.1 标准曲线及样品制备

准确称取 GABA 标准品 10.3 mg 于 25 mL 容量瓶中以超纯水溶解并定容,用超纯水稀释为梯度浓度的标准曲线工作液。将配制好的 GABA 标准曲线工作液进行 HPLC 分析,以浓度( $\mu\text{g/mL}$ )为横坐标( $x$ ),峰面积为纵坐标( $y$ ),得到标准曲线  $y = 8961.6x - 140.7$  ( $R^2 = 0.9999$ ,  $n = 6$ ),线性关系良好。准确称取发芽糙米样品 5.00 g,以 60%乙醇为提取液,液料比为 5:1 (mL/g),60℃超声波辅助提取 1 h 后离心,上清液为 GABA 样品溶液。

#### 1.3.4.2 衍生条件及色谱条件

衍生化试剂为 20 mg 邻苯二甲醛、1 mL 甲醇、100  $\mu\text{L}$   $\beta$ -巯基乙醇、4 mL (pH 9.5) 硼酸缓冲液,溶解即得。样品衍生化:取样品溶液 300  $\mu\text{L}$ 、衍生化试剂 150  $\mu\text{L}$ 、反应 4.5 min 后加入 300  $\mu\text{L}$  磷酸二氢钠溶液 (0.1 mol/L) 终止反应,反应液以 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后用于测定。

色谱条件:色谱柱为 IORBAX Eclipse XDB- $\text{C}_{18}$  Analytica (4.6 mm $\times$ 250 mm, 5  $\mu\text{m}$ );流动相 A 为乙酸钠溶液 (25 mmol/L),B 为乙腈;并以 0 min (A 与 B 体积比为 90:10) 至 15 min (A 与 B 体积比为 65:35) 洗脱梯度;流速为 1.10 mL/min;紫外检测波长为 332 nm;柱温为 40℃;进样量为 10  $\mu\text{L}$ 。

### 1.4 数据统计分析

采用 SPSS 23.0 统计软件进行数据统计分析。采用方差分析进行差异性检验。采用一般线性模型进行主效应分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 发芽温度对发芽糙米 GABA 含量的影响

发芽温度对发芽糙米 GABA 含量的影响见图 2。

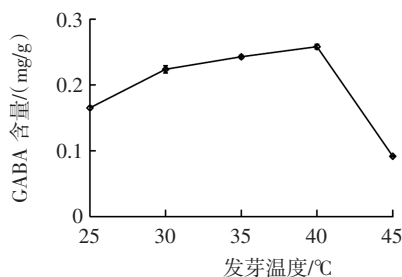


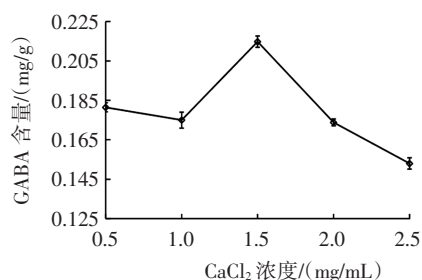
图2 发芽温度对发芽糙米 GABA 含量的影响

Fig.2 Effect of germination temperature on GABA content in germinated brown rice

如图 2 所示,随着发芽温度升高,GABA 含量先升高后降低,在发芽温度为 40℃时达到最大值,发芽温度为 45℃时 GABA 含量降低。发芽糙米中 GABA 由谷氨酸经谷氨酸脱羧酶脱羧而成,谷氨酸脱羧酶的最适温度是 37℃~40℃<sup>[11]</sup>,此时谷氨酸脱羧酶等多种生物酶活性高,利于 GABA 的产生。但超过 40℃时,生成的 GABA 在 GABA 转移酶的催化下与丙酮酸或  $\alpha$ -酮戊二酸发生可逆的转氨反应,生成琥珀酸半醛和丙氨酸<sup>[9]</sup>,从而使 GABA 含量下降。故将最优发芽温度确定为 40℃。

### 2.2 $\text{CaCl}_2$ 浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响

$\text{CaCl}_2$  浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响见图 3。

图3  $\text{CaCl}_2$  浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响Fig.3 Effect of  $\text{CaCl}_2$  concentration on GABA content in germinated brown rice

如图 3 所示,GABA 含量随着  $\text{CaCl}_2$  的浓度增大先升高后降低,在  $\text{CaCl}_2$  浓度为 1.5 mg/mL 时达到最大值,之后 GABA 含量随  $\text{CaCl}_2$  浓度增高而降低,故将  $\text{CaCl}_2$  的最佳浓度设定为 1.5 mg/mL。谷氨酸脱羧酶是一种钙调素结合蛋白, $\text{Ca}^{2+}$ 和谷氨酸脱羧酶结合可调节谷氨酸脱羧酶的活性,从而控制 GABA 的代谢<sup>[12]</sup>,适宜的  $\text{Ca}^{2+}$ 浓度利于 GABA 的产生。但发芽液中  $\text{Ca}^{2+}$ 浓度过高可使细胞内  $\text{Ca}^{2+}$ 浓度升高,此时细胞内  $\text{Ca}^{2+}$ 与磷酸反应形成沉淀,扰乱以磷酸为基础的能量代谢,且对淀粉酶的活性产生抑制作用,从而抑制发芽和 GABA 的形成<sup>[12-13]</sup>。

### 2.3 纤维素酶浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响

纤维素酶浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响见图 4。

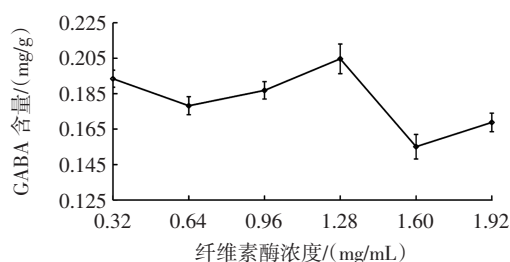


图 4 纤维素酶浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响

Fig.4 Effect of cellulase concentration on GABA content in germinated brown rice

如图 4 所示, GABA 含量随纤维素酶浓度的增大先升高后降低再升高, 在纤维素酶浓度为 1.28 mg/mL 时达到最大值。因此, 将纤维素酶的最佳浓度确定为 1.28 mg/mL。纤维素酶可使糙米皮层发生部分降解, 有利于达到糙米发芽所需的含水率<sup>[14]</sup>, 提高发芽效率, 促进 GABA 的形成。此外, 经纤维素酶处理的糙米, 粗纤维被降解、皮层结构被破坏, 使糙米的硬度下降, 适口性更好<sup>[15]</sup>。

### 2.4 谷氨酸钠浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响

谷氨酸钠浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响见图 5。

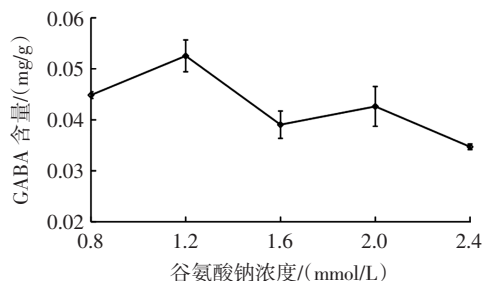


图 5 谷氨酸钠浓度对发芽糙米 GABA 含量的影响

Fig.5 Effect of sodium glutamate concentration on GABA content in germinated brown rice

如图 5 所示, GABA 含量在谷氨酸钠浓度为 1.2 mmol/L 达到最大值。随后 GABA 的生成量随谷氨酸钠浓度的升高而降低。谷氨酸是谷氨酸脱羧酶的唯一底物, 谷氨酸盐及其衍生物可转化为谷氨酸, 从而经脱羧生成 GABA<sup>[16]</sup>。谷氨酸钠溶解性较好<sup>[17]</sup>, 且成本低廉, 故将谷氨酸钠的最佳浓度设定为 1.2 mmol/L。

### 2.5 发芽时间对发芽糙米 GABA 含量的影响

发芽时间对发芽糙米 GABA 含量的影响见图 6。

如图 6 所示, 发芽糙米中 GABA 的含量随着时间的延长而增加。因为随着发芽时间的延长, 糙米内源

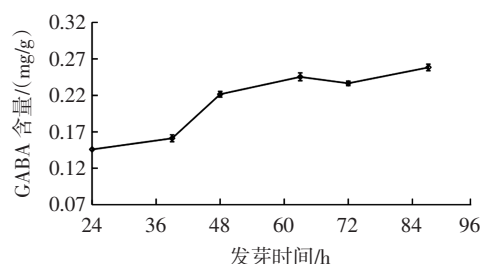


图 6 发芽时间对发芽糙米 GABA 含量的影响

Fig.6 Effect of germination time on GABA content in germinated brown rice

性酶活性增强<sup>[18]</sup>, 营养物质发生转化, 淀粉、蛋白质等大分子被分解为还原糖、游离氨基酸等<sup>[19]</sup>, 利于 GABA 产生; 但是发芽时间延长后, 容易滋生微生物, 使糙米产生刺鼻的气味, 感官品质下降, 并且芽的长度较长, 在砻谷时容易脱落<sup>[20]</sup>。因此, 糙米发芽的最佳时间选为 63 h, 以兼顾 GABA 的累积和良好的感官品质。

### 2.6 正交试验结果

正交试验结果见表 2。

表 2 正交试验结果

Table 2 Orthogonal test results

| 编号             | A 发芽温度/℃ | B CaCl <sub>2</sub> 浓度/(mg/mL) | C 纤维素酶浓度/(mg/mL) | D 谷氨酸钠浓度/(mmol/L) | E 发芽时间/h | GABA 含量/(mg/g) |
|----------------|----------|--------------------------------|------------------|-------------------|----------|----------------|
| 1              | 25       | 0.5                            | 0.32             | 0.8               | 24       | 0.17           |
| 2              | 30       | 1.0                            | 0.64             | 1.2               | 24       | 0.17           |
| 3              | 35       | 1.5                            | 0.96             | 1.6               | 24       | 0.20           |
| 4              | 40       | 2.0                            | 1.28             | 2.0               | 24       | 0.22           |
| 5              | 40       | 0.5                            | 0.64             | 1.6               | 39       | 0.26           |
| 6              | 35       | 1.0                            | 0.32             | 2.0               | 39       | 0.19           |
| 7              | 30       | 1.5                            | 1.28             | 0.8               | 39       | 0.19           |
| 8              | 25       | 2.0                            | 0.96             | 1.2               | 39       | 0.17           |
| 9              | 30       | 0.5                            | 0.96             | 2.0               | 48       | 0.16           |
| 10             | 25       | 1.0                            | 1.28             | 1.6               | 48       | 0.15           |
| 11             | 40       | 1.5                            | 0.32             | 1.2               | 48       | 0.31           |
| 12             | 35       | 2.0                            | 0.64             | 0.8               | 48       | 0.22           |
| 13             | 35       | 0.5                            | 1.28             | 1.2               | 63       | 0.37           |
| 14             | 40       | 1.0                            | 0.96             | 0.8               | 63       | 0.47           |
| 15             | 25       | 1.5                            | 0.64             | 2.0               | 63       | 0.31           |
| 16             | 30       | 2.0                            | 0.32             | 1.6               | 63       | 0.26           |
| k <sub>1</sub> | 0.192    | 0.242                          | 0.233            | 0.262             | 0.202    |                |
| k <sub>2</sub> | 0.202    | 0.253                          | 0.240            | 0.258             | 0.195    |                |
| k <sub>3</sub> | 0.212    | 0.246                          | 0.252            | 0.217             | 0.247    |                |
| k <sub>4</sub> | 0.351    | 0.216                          | 0.232            | 0.220             | 0.314    |                |
| R              | 0.159    | 0.037                          | 0.020            | 0.045             | 0.119    |                |

由表 2 可知, 5 个因素对糙米富集 GABA 的主次效应为 A>E>D>B>C, 发芽温度的影响最大, 其次依次

为发芽时间、谷氨酸钠浓度、 $\text{CaCl}_2$  浓度及纤维素酶浓度, 糙米发芽富集 GABA 的最优条件组合为  $\text{A}_4\text{B}_2\text{C}_3\text{D}_1\text{E}_4$ , 即正交试验 14 号, 发芽温度  $40^\circ\text{C}$ 、 $\text{CaCl}_2$  浓度  $1.0\text{ mg/mL}$ 、纤维素酶浓度  $0.96\text{ mg/mL}$ 、谷氨酸钠浓度  $0.8\text{ mmol/L}$ 、发芽时间  $63\text{ h}$ 。在最优条件组合下, 糙米发芽后 GABA 含量为  $46.73\text{ mg}/100\text{ g}$ , 同品种未发芽糙米 GABA 含量为  $9.44\text{ mg}/100\text{ g}$ , 糙米发芽后 GABA 含量是发芽前的 4.95 倍。

对各因素水平下 GABA 含量进行方差分析见表 3。

表 3 正交试验方差分析

Table 3 Analysis of variance in orthogonal test

| 因素 | 偏差平方和 | 自由度 | 方差                    | F 值       | P 值   |
|----|-------|-----|-----------------------|-----------|-------|
| A  | 0.203 | 3   | 0.068                 | 4 392.687 | 0.000 |
| B  | 0.009 | 3   | 0.003                 | 196.929   | 0.000 |
| C  | 0.003 | 3   | 0.001                 | 64.844    | 0.000 |
| D  | 0.020 | 3   | 0.007                 | 463.086   | 0.000 |
| E  | 0.108 | 3   | 0.036                 | 2 332.438 | 0.000 |
| 误差 | 0.000 | 32  | $1.540\times 10^{-5}$ |           |       |

注:  $P<0.01$ , 差异具有统计学意义。

由表 3 可知, 发芽温度、 $\text{CaCl}_2$  浓度、纤维素酶浓度、谷氨酸钠浓度和发芽时间均对发芽糙米 GABA 含量影响显著。

### 3 结论

本文利用循环加湿生产高  $\gamma$ -氨基丁酸发芽糙米的工艺最优条件为发芽温度  $40^\circ\text{C}$ 、 $\text{CaCl}_2$  浓度  $1.0\text{ mg/mL}$ 、纤维素酶浓度  $0.96\text{ mg/mL}$ 、谷氨酸钠浓度  $0.8\text{ mmol/L}$ 、发芽时间  $63\text{ h}$ 。此条件下发芽糙米 GABA 含量达发芽前的近 5 倍。故适宜条件下, 循环加湿生产工艺可以大幅度提高发芽糙米的 GABA 含量。

### 参考文献:

- [1] 吕呈蔚, 岳玉兰, 王政, 等. 糙米营养价值及加工技术研究进展[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(6): 140-144.  
LV Chengyu, YUE Yulan, WANG Zheng, et al. Research progress on the nutritional value and processing technology of brown rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(6): 140-144.
- [2] 杨冰, 王德华, 张金连, 等. 发芽糙米的应用研究及产业化开发概况[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(6): 218-221.  
YANG Bing, WANG Dehua, ZHANG Jinlian, et al. The application research and industrialization development situation of germinated brown rice[J]. Food Research and Development, 2017, 38(6): 218-221.
- [3] 王嘉怡, 潘姝璇, 夏陈, 等. 发芽糙米米糠营养成分和  $\gamma$ -氨基丁酸分析及缓解体力疲劳功效[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 177-182.  
WANG Jiayi, PAN Shuxuan, XIA Chen, et al. Nutritional composition, gamma-aminobutyric acid content and anti-fatigue activity of germinated brown rice bran[J]. Food Science, 2019, 40(1): 177-182.
- [4] DIEZ-GUTIÉRREZ L, SAN VICENTE L, R BARRÓN L J, et al. Gamma-aminobutyric acid and probiotics: Multiple health benefits and their future in the global functional food and nutraceuticals market[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103669.
- [5] PRUD'HOMME G J, GLINKA Y, KURT M, et al. The anti-aging protein Klotho is induced by GABA therapy and exerts protective and stimulatory effects on pancreatic beta cells[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2017, 493(4): 1542-1547.
- [6] NAGUY A. Brexanolone and postpartum depression: What does it have to do with GABA? [J]. Archives of Women's Mental Health, 2019, 22(6): 833-834.
- [7] OHM J B, LEE C W, CHO K. Germinated wheat: Phytochemical composition and mixing characteristics[J]. Cereal Chemistry, 2016, 93(6): 612-617.
- [8] 宁亚维, 马梦戈, 杨正, 等.  $\gamma$ -氨基丁酸的制备方法及其功能食品研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 238-247.  
NING Yawei, MA Mengge, YANG Zheng, et al. Research progress in the enrichment process and functional foods of  $\gamma$ -aminobutyric acid[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 238-247.
- [9] 王姗姗, 刘小娇, 胡赞, 等. 植物中  $\gamma$ -氨基丁酸的代谢及富集机制[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(24): 9-12.  
WANG Shanshan, LIU Xiaojiao, HU Yun, et al. Metabolism and enrichment mechanism of  $\gamma$ -aminobutyric acid in plants[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(24): 9-12.
- [10] 王阳阳, 刘洁, 刘亚伟, 等. 发芽糙米加工工艺研究进展[J]. 食品科技, 2018, 43(1): 188-191.  
WANG Yangyang, LIU Jie, LIU Yawei, et al. Development of processing technology of germinated brown rice[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(1): 188-191.
- [11] CHUNGCHAROEN T, PRACHAYAWARAKORN S, TUNG TRA-KUL P, et al. Effects of germination process and drying temperature on gamma-aminobutyric acid (GABA) and starch digestibility of germinated brown rice[J]. Drying Technology, 2014, 32(6): 742-753.
- [12] 郑艺梅. 发芽糙米营养特性、 $\gamma$ -氨基丁酸富集及生理功效的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006: 72-73.  
ZHENG Yimei. Study of germinated brown rice on its nutritional property and physiological function of gamma amino-butyric acid accumulation therein[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006: 72-73.
- [13] 温坤芳, 林亲录, 吴跃, 等. 浸泡工艺对糙米发芽率的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2012(2): 5-9.  
WEN Kunfang, LIN Qinlu, WU Yue, et al. Effect of soaking process on the germination rate of brown rice[J]. Cereal & Feed Industry, 2012(2): 5-9.
- [14] 胡秀娟, 刘亚伟, 刘洁, 等. 酶对发芽糙米皮层结构影响的研究[J].

- 粮食与饲料工业, 2012(8): 30-32, 36.
- HU Xiujuan, LIU Yawei, LIU Jie, et al. Effect of enzyme on cortex structure of germinated brown rice [J]. Cereal & Feed Industry, 2012(8): 30-32, 36.
- [15] ZHANG Q, LIU N, WANG S S, et al. Effects of cyclic cellulase conditioning and germination treatment on the  $\gamma$ -aminobutyric acid content and the cooking and taste qualities of germinated brown rice[J]. Food Chemistry, 2019, 289: 232-239.
- [16] 曹晶晶, 顾丰颖, 罗其琪, 等. 发芽糙米  $\gamma$ -氨基丁酸形成的谷氨酸脱羧酶活性与底物变化的相关性分析[J]. 食品科学, 2018, 39(16): 47-52.
- CAO Jingjing, GU Fengying, LUO Qiqi, et al. Correlation between changes in glutamate decarboxylase activity and  $\gamma$ -aminobutyric acid and glutamic acid contents in germinated brown rice[J]. Food Science, 2018, 39(16): 47-52.
- [17] 姚森. 高  $\gamma$ -氨基丁酸含量的发芽糙米品种筛选及应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008: 28-29.
- YAO Sen. Screening and application of germinated brown rice varieties with high  $\gamma$ -aminobutyric acid content[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008: 28-29.
- [18] NASCIMENTO L Á D, AVILA B P, COLUSSI R, et al. Effect of abiotic stress on bioactive compound production in germinated brown rice[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(4): 868-876.
- [19] 吴晓娟, 从竞远, 吴伟, 等. 糙米发芽前后营养成分的变化及其对发芽糙米糊化特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 67-72.
- WU Xiaojuan, CONG Jingyuan, WU Wei, et al. Nutritional changes of brown rice during germination and their effects on pasting properties of germinated brown rice[J]. Food Science, 2017, 38(18): 67-72.
- [20] 吕庆云, 周坚, 贾喜午. 稻谷发芽富集  $\gamma$ -氨基丁酸研究[J]. 粮食与饲料工业, 2014(6): 1-5.
- LV Qingyun, ZHOU Jian, JIA Xiwu. GABA enriching of germinated brown rice[J]. Cereal & Feed Industry, 2014(6): 1-5.

加工编辑: 姚骏

收稿日期: 2021-04-21