

## 原创研究型文章

基于  $\gamma$ -氨基丁酸生物富集技术的研究进展

李云, 赵雷, 王凯, 胡卓炎, 刘旭炜\*

广东省食品质量安全重点实验室, 华南农业大学食品学院, 广州市 510640, 中国

\* 通讯作者: 刘旭炜, xuwei.liu@scau.edu.cn

**摘要:**  $\gamma$ -氨基丁酸 (GABA) 是一种非蛋白质氨基酸, 在人类神经系统中起着重要作用。在医学和制药领域对 GABA 的研究已经揭示了 GABA 对人类众多的生理益处。因此, 富含 GABA 的功能性食品备受消费者青睐。因此, 为了满足人们对健康食品的需求, 运用有效且安全的富集手段以增加 GABA 在食品中的含量受到广泛关注。本文主要综述了 GABA 在天然食品中的含量、生物富集技术以及富含 GABA 食品的健康益处。此外, 本文还探讨了关于 GABA 生物富集技术存在的缺陷以及未来所面临的挑战, 以期 GABA 生物富集技术的研究提供一个新思路。

**关键词:** GABA; 营养; 加工; 生物活性化合物; 功能食品

## 1. 前言

$\gamma$ -氨基丁酸 (GABA), 化学名 4-GABA, 是一种四碳非蛋白氨基酸<sup>[1]</sup>。GABA 在动物、植物和微生物中自然存在, 具备多种重要的生理功能<sup>[2]</sup>。据报道, 它主要作为抑制性神经递质存在于脊椎动物中枢神经系统中<sup>[3]</sup>, 在调节突触传递、促进神经元发育、缓解压力以及预防抑郁等方面都发挥着重要作用<sup>[4-6]</sup>。值得注意的是, GABA 的各种生物活性已成为医学和药学的研究热点, 包括预防神经细胞损伤、降血糖、降血压、抗炎、抗氧化、改善睡眠以及抗抑郁等<sup>[7-9]</sup>。此外, GABA 还可以保护肝脏、肾脏和肠道, 防止毒素引起的损伤<sup>[10,11]</sup>。

基于 GABA 众多的健康益处, 富含 GABA 的保健用途食品得到大力开发, 如大米、乳制品、茶叶等<sup>[12,13]</sup>, 且广受消费者追捧。然而, 由于天然食品中的 GABA 含量普遍较低<sup>[14]</sup>。在正常的膳食摄入量下, GABA 的摄入难以达到明显的健康益处。此外, 尽管 GABA 具有良好的热稳定性, 但在 105 °C 以上的热处理下仍会发生热分解, 从而导致其含量下降<sup>[15]</sup>。从天然产物中分离提取 GABA 是相对困难的。当前 GABA 的制备方式主要分为化学法与生物法, 其中生物制备法又可以细分为植物富集法、微生物发酵法以及新兴技术。化学制备由于可能涉及到有毒试剂, 其产物存在潜在的安全隐患, 所以化学合成的 GABA 不能用作食品添加剂, 同样不能用于样品。因此, 本文主要针对当前 GABA 生物富集法所涉及到的技术进行综述, 包括发芽、各种胁迫 (热湿处理、冷热胁迫、缺氧以及盐胁迫)、微生物发酵以及新兴技术。此外, 本文还对 GABA 在富集技术应用上所面临的挑战进行了讨论, 旨在为食品研究人员和工业人员开发富含 GABA 的新型功能食品提供理论依据。

## 2. 天然食物中 GABA 的含量

GABA 广泛分布于动植物、微生物体中。在动物体内, GABA 几乎仅存在于神经组织, 其中脑组织中的含量约为 100.0–600.0 mg/100 g<sup>[16]</sup>, 但不适宜用于食品加工中。GABA 的植物和微生物来源主要包括谷类<sup>[17-29]</sup>、豆类<sup>[30-38]</sup>、水果<sup>[39-46]</sup>、蔬菜<sup>[39,40,47-50]</sup>、茶叶<sup>[51-56]</sup>和食用菌<sup>[57-60]</sup> (如图 1 所示)。

豆类种子 <https://cae.usp-pl.com/index.php/fnc/article/view/82>, 通常由于谷氨酸 (Glu, GABA 的前体) 的存在而含有较高含量的 GABA。其中, 芸豆含量能达到 69.2 mg/100 g<sup>[36]</sup>。在谷类中, 大麦和红米的 GABA 含量较高<sup>[25,61]</sup>。在水果中, 荔枝中的 GABA 含量能达到 139.0–350.0 mg/100 g<sup>[40,43]</sup>。但苹果中的 GABA 含量仅有 0.0–0.5 mg/100 g<sup>[39,40]</sup>。在蔬菜中, 菠菜和番茄具有较高的 GABA 含量。但番茄中 GABA 的含量受品种以及成熟期的影响较大<sup>[47]</sup>。洋葱中仅有 0.1 mg/100 g 的 GABA 含量。在茶叶中, 乌龙茶的 GABA 含量最高可达到 97.0 mg/100 g。此外, 食用菌中也含有大量的 GABA。高等担子菌类蘑菇, 如平菇、金针菇、香菇等, 其氨基酸含量与动物蛋白相当, 包括所有必需氨基酸和非必需氨基酸, 尤其是 Glu, 这可能是蘑菇产生大量 GABA 的原因<sup>[58]</sup>。综上所述, 由于食物基因型、生长气候和培养条件的差异, 不同食物类别甚至同一食物类别的 GABA 水平差异很大。为了满足人体健康的需求, 新的研究试图通过安全且有效的富集技术来增加食物中 GABA 的含量。

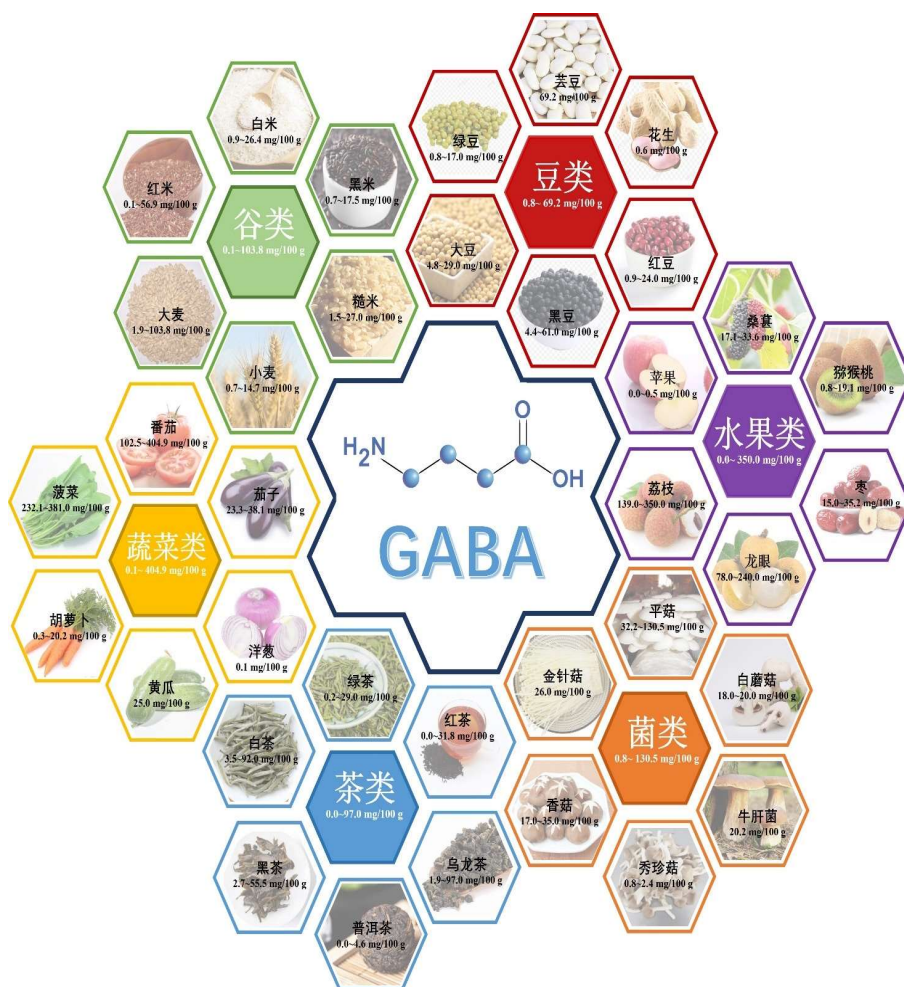


图 1. 天然食物中的 GABA 含量。  
Figure 1. GABA content in natural foods.

### 3. GABA 的生物富集技术

近年来, 随着人们对 GABA 健康益处的认识不断增强, 针对提升食品中 GABA 含量的方法的研究日益增多。为了有效地增加食品中的 GABA 水平, 需要深入了解适用于各种食品的不同富集技术, 以及这些技术的基本富集机制、优势和局限性。这些技术包括但不限于发芽、加热和控制相对湿度的处理、胁迫处理, 微生物发酵以及新兴技术等。

目前,关于 GABA 的富集技术主要涉及两个主要的合成代谢途径(如图 2 所示)。GABA 的首要合成途径是 GABA 分支途径<sup>[62]</sup>。即谷氨酸脱羧酶(GAD)在细胞质中催化 Glu 不可逆脱羧合成 GABA。随后,GABA 被转移到线粒体中,经 GABA 转氨酶(GABA-T)转氨形成琥珀半醛。琥珀半醛随后被 NAD<sup>+</sup> 依赖的琥珀酸半醛脱氢酶(SSADH)氧化为琥珀酸,随后琥珀酸进入 TCA 循环。另一种 GABA 合成途径是多胺代谢途径,其中精氨酸通过多步骤途径转化为腐胺。然后,腐胺被多胺氧化酶(PAO)转化为 4-氨基丁醛或转化为亚精胺,亚精胺降解为 4-氨基丁醛,然后被 NAD<sup>+</sup> 依赖的 4-氨基丁醛脱氢酶(ABALDH)氧化为 GABA。

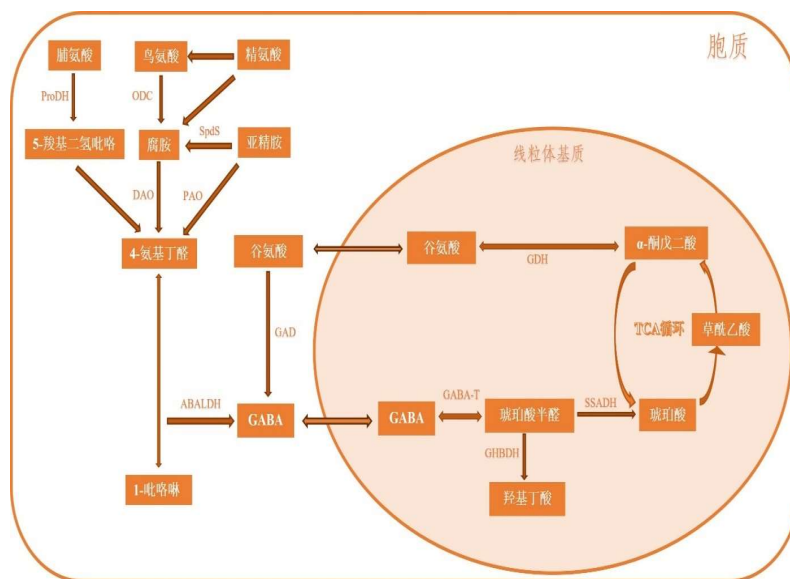


图 2. GABA 合成代谢途径。

Figure 2. GABA synthesis metabolic pathway.

注: ProDH: 脯氨酸脱氢酶; ODC: 鸟氨酸脱羧酶; SpdS: 亚精胺合酶; DAO: 二胺氧化酶; PAO: 聚胺氧化酶; ABALDH: 4-氨基丁醛脱氢酶; GDH: Glu 脱氢酶; GAD: 谷氨酸脱羧酶; TCA: 三羧酸; GABA-T: GABA 转氨酶; SSADH: 琥珀酸半醛脱氢酶; GHBDH: 羧基丁酸脱氢酶。

### 3.1. 植物富集法

#### 3.1.1. 热湿处理

热相对湿度 (HRH) 处理是一种在低水分 (16.0–18.5%)、高温 (50–70 °C) 条件下,能在数小时 (5–6 h) 内提高天然食品中 GABA 含量的新方法。如表 1 所示, Ma 等<sup>[31,63]</sup>收集了中国八个不同省份种植的 34 个主要绿豆品种进行 HRH 处理,发现 HRH 处理后的绿豆中 GABA 的平均含量增加了 7.5 倍且黑绿豆品种在 HRH 处理下的平均 GABA 水平高于绿绿豆品种。此外,还发现游离 Glu 水平与 GABA 含量之间存在显著的相关性 ( $p < 0.05$ )。这表明植物品种对 GABA 积累能力的影响主要是由 GABA 通道中内源性游离氨基酸的作用引起的。富含内源性游离 Glu 的 MB 品种具有更好的 GABA 积累潜力。同样,用这种方法处理 25 种青稞,其 GABA 也表现出不同程度的增强,范围为 26.9–76.3 mg/100 g<sup>[64]</sup>。此外,结果显示多胺降解途径的底物(多胺)的含量以及关键酶(二胺氧化酶(DAO)和 PAO)的活性与 GABA 的积累没有显著相关性。这表明 HRH 处理下青稞 GABA 积累的主要途径是 GABA 分流途径。值得注意的是,尽管关于利用 HRH 富集 GABA 的相关研究数据有限,但已有日本日本佐竹机械会社使用 HRH 处理生产富含 GABA 的大米,且该大米目前在市场上广泛销售<sup>[65]</sup>。

表 1. GABA 富集的各种胁迫处理。

Table 1. Various stress treatments for GABA enrichment.

处理方法	种类	最佳处理条件	GABA 含量	增长倍数	参考文献
HRH	绿豆	70 °C, 95%RH 下处理 4 h	31.1 mg/100 g	7.5	[63]
	绿豆	70 °C, 95%RH 下处理 4 h	113.1 mg/100 g	-	[31]
	高原大麦	65 °C, 95%RH 下处理 2.5 h	76.3 mg/100 g	2.1	[64]
热胁迫	未成熟大豆种子	40 °C加热干燥 72 h, 20 °C真空干燥 4 h,	447.5 mg/100 g	5.6	[66]
	桑叶	130 °C先烘干后瓶炒 25 min	401.0 mg/100 g	-	[67]
冷胁迫	大豆芽	-18 °C冷冻 12 h, 25 °C冻融 6 h	209.0 mg/100 g	7.2	[38]
	桑叶 (BR 60)	梯度降温: 4 °C, 0 °C 和-1 °C下分别贮存 10 h	3.6 mmol/g	4.3	[68]
	桑叶 (Lunbai No.1)	梯度降温: 4 °C, 0 °C 和-1 °C下分别贮存 10 h	3.8 mmol/g	11.8	[68]
	桑叶 (Kangxuan 01-28)	4 °C冷藏 2 d	5.1 mmol/g	33.9	[68]
缺氧	双孢蘑菇	N <sub>2</sub> 处理 24 h	-	13.9	[69]
	绿茶	CO <sub>2</sub> 处理 6 h	-	1.5	[57]
	茶叶	25 °C真空处理 11 h	73.0 mg/100 g	20.0	[70]
	茶叶	真空处理 4 h	266.0 mg/100 g	16.6	[71]
	米糠	40 °C下 N <sub>2</sub> 处理 8 h	171.5 mg/100 g	16.0	[72]
盐胁迫	高粱	NaCl (41.07 mmol/L), 磷酸吡哆醛 (82.62 μmol/L), CaCl <sub>2</sub> (0.40 mmol/L) 处理 2 d (避光)	33.6 mg/100 g	1.3	[73]
	大麦幼苗	25 °C浸泡 6 h, 25 °C下 NaCl (20 mmol/L) 培养 2 d	-	1.3	[74]
	桑叶	谷氨酸钠浓度 6.22 g/L, 在 25 °C浸泡 18 h	377.0 mg/100 g	6.3	[75]
两种及以上胁迫	毛叶茶	真空处理 3 h, 有氧处理 2 h, 循环 3 次	270.0 mg/100 g	22.5	[76]
	桑叶	鲜叶摊放 1.5 h, 揉捻 30 min, 真空厌氧处理 8 h, 干燥温度 80 °C	655.0 mg/100 g	-	[77]

### 3.1.2. 冷热胁迫

在冷胁迫中, 冷冻或冻融处理可能导致细胞膜组织破裂和溶质聚集, 从而加速 GABA 的合成。在 Yang 等<sup>[38]</sup>的研究里, 经缺氧处理的豆芽在-18 °C冷冻 12 小时, 在 25 °C解冻 6 小时后, GABA 含量显著增加, 是同样经过缺氧处理但未冷冻的豆芽的 7.2 倍。在另一项研究中<sup>[68]</sup>, 在低温贮藏处理下, 三个桑叶品种“康选 01-28”、“轮白 1 号”和“BR 60”中的 GABA 浓度分别比初始浓度增加了 33.9 倍、11.8 倍和 4.3 倍。这说明在同一种处理下, GABA 的富集效果会受品种影响而差异巨大。冷胁迫下的桑叶的 GAD 活性增加, GABA-T 活性的降低, 这促使 Glu 合成 GABA 速率加快, 但 GABA 转化成琥珀酸的速率变慢, 从而促使 GABA 在桑叶中富集。尽管许多研究报告低温胁迫会产生高水平的 GABA, 但 Wang 等<sup>[78]</sup>报道了茶根中的 GABA 含量在低温处理下会降低。这说明 GABA 含量高与植物的低温耐受性也有关。

此外, 也有研究显示热胁迫可以促进 GABA 在植物中的富集。例如, 郭红梅等<sup>[67]</sup>报道了不同干燥方式 (包括先烘干后瓶炒、先烘干后锅炒、瓶式炒干、二次烘干、先瓶炒后烘干、先锅炒后烘干、曲毫炒干) 对桑叶的 GABA 含量变化, 发现相比较未处理的桑叶, 经过不同的干燥方式的桑叶的 GABA 含量增加 259.0–401.0 mg/100 g。此外, 未成熟大豆种子的 GABA 含量在热干燥下快速积累, 并在 40 °C 时最大, 达到未处理种子的 5.6 倍。在热胁迫下, 种子中的 GAD 得到高水平表达, GABA-T 和 SSADH 却迅速下降<sup>[66]</sup>。这和冷胁迫富集 GABA 的原理相同, 即都是依赖于 GABA 分流途径来积累 GABA。

### 3.1.3. 缺氧

据报道, 缺氧会使细胞质的 pH 值降低 0.4–0.8, 从而产生酸性条件。在这种酸性条件, GAD 被激活进而催化 Glu 脱羧反应, 产生更多的 GABA 来抵抗压力, 降低有毒化合物的含量以及调节 pH 值。目前, 厌氧应激主要应用于蘑菇<sup>[69]</sup>、茶<sup>[57]</sup>和一些谷物<sup>[72]</sup>, 以富集 GABA。Liao 等<sup>[70]</sup>在 25 °C 利用真空处理茶叶 11 小时后, 其 GABA 的含量增加至原本的 20 倍。这是由于 GAD 和 DAO 活性的增

加。参与 GABA 形成的基因, 如 CsGAD1 和 CsGAD2, 在缺氧条件下显著上调。同时, 多胺降解途径的底物, 即腐胺和精胺, 其浓度也因缺氧而升高。Liao 等<sup>[70]</sup>在缺氧条件下, 用氨基胍处理茶叶完全抑制了 DAO 的活性, 但 GABA 浓度仅下降了 25%。因此推测, 在缺氧条件下, 茶叶中形成的 GABA 约有四分之一来自多胺降解途径<sup>[76]</sup>。此外, 米糠在 40 °C 下被 N<sub>2</sub> 处理 8 小时, 其 GABA 含量显著增加至 171.5 mg/100 g, 是原本的 16.0 倍<sup>[72]</sup>。在缺氧条件下, GAD 和 DAO 活性增加, 从而使植物 GABA 含量升高。缺氧有氧交替处理也能够增加茶叶的 GABA 含量<sup>[76]</sup>。综上所述, 植物在缺氧环境下同时依赖 GABA 分流和多胺降解途径积累 GABA, 但不同的植物主要依赖的途径有所不同。

### 3.1.4. 盐胁迫

盐胁迫通常是通过用高浓度的 NaCl、CaCl<sub>2</sub> 以及谷氨酸钠溶液处理食品原料来实现的, 且不同的盐处理导致的 GABA 合成途径不同。Wang 等<sup>[79]</sup>对切碎的胡萝卜进行 CaCl<sub>2</sub> 处理, 探讨其对 GABA 含量及其代谢途径的影响。结果表明, 外源 CaCl<sub>2</sub> 不仅能显著促进 GAD、GABA-T、DAO、PAO 和氨基醛脱氢酶 (AMADH) 的活性, 还能上调 DcGAD1、DcGAD2、DcGABA-T1 和 DcPAO 的表达。这表明 CaCl<sub>2</sub> 处理都能激活 GABA 分流途径和多胺降解途径。CaCl<sub>2</sub> 似乎对 GABA 分流调节更有效。Chi 等<sup>[80]</sup>在利用外源 CaCl<sub>2</sub> 处理胡萝卜丝时, 同样发现外源 CaCl<sub>2</sub> 通过激活 GABA 分流通路从而诱导 GABA 积累。此外, Bai 等<sup>[81]</sup>报道 NaCl 胁迫也显著提高萌发谷子 GABA 含量和 GAD 活性水平。更值得注意的是, 该研究表明 NaCl 胁迫主要是通过多胺降解途径使 GABA 富集, 但在加入 CaCl<sub>2</sub> 后, GABA 积累主要是通过 GABA 分流合成。总的来说, 盐胁迫能够通过激活 GABA 合成的相关酶, 从而富集 GABA。但需要注意的是, 高剂量的这些盐会导致 GABA 水平和 GAD 活性的降低<sup>[73]</sup>。

### 3.1.5. 发芽

发芽富集技术可以激活内源性 GAD 酶的活性, 该酶催化 Glu 转化为 GABA。在发芽过程中, 种子呼吸增强, 内源酶系统被激活, 蛋白质被水解成氨基酸等。先前研究报道对于发芽富集技术, GABA 的合成主要通过 GABA 分流而不是多胺降解途径完成<sup>[82]</sup>。目前, 发芽富集技术主要适用于谷类和豆类作物。

一般来说, 发芽富集技术涉及到浸泡过程和在特定时间和温度下的发芽过程。部分研究人员对提高不同食物来源中的 GABA 含量做了大量工作, 其中包括适当时间和温度的探索。在黑暗中浸泡 10 小时的大豆在发芽第三天达到 GABA 的最大值 (151.0 mg/100 g), 是生大豆的 12.6 倍<sup>[83]</sup>。如 Tiansawang 等<sup>[30]</sup>的报道, 种子在发芽过程中可以激活能够将 Glu 转化为 GABA 的 GAD。绿豆和豇豆在浸泡和早期发芽过程中 GABA 的快速积累被认为是幼嫩组织对水分胁迫的反应<sup>[84,85]</sup>。

此外, 除了将种子浸泡在水中外, 还进行了其他研究。如表 2 所示, 在发芽过程中加入添加剂, 包括纤维素酶、电解水、甘露糖、Glu 以及盐类物质, 可以增加 GABA 的含量。Xie 等<sup>[86]</sup>发现在浸泡液中加入 1.0 mmol/L 甘露糖而萌发的西兰花含有高水平的 GABA。甘露糖可以提高 GABA 的合成酶活性, 抑制 GABA-T 活性, 同时通过 GABA 分流和多胺降解两种途径实现的 GABA 的富集。除了上述条件外, 还可以采用改变周围条件, 如低氧或缺氧处理以及冷冻处理 (如表 2 所示), 这些处理都进一步增强 GABA 的积累。厌氧胁迫被发现可以增强水稻发芽过程中 GABA 的富集能力<sup>[87]</sup>。最近的一项研究表明<sup>[88]</sup>, 在黑米粒中, 冷胁迫和发芽的组合比单独发芽表现出更大的 GABA 积累。如前所述, 冷胁迫激活了 GABA 分流途径可能是造成这一结果的原因。

表 2. 发芽富集技术。  
Table 2. Germination enrichment techniques.

	种类	最佳条件	GABA 含量	增长倍数	参考文献
发芽	糙米	浸泡 5.76 h, 35 °C 萌发 40 h	48.2 mg/100 g	2.8	[89]
	黄豆	浸泡 10 h, 25 °C 萌发 3 d (避光)	151.0 mg/100 g	12.6	[83]
	大豆	30 °C 浸泡 6 h, 30 °C 萌发 48 h (避光)	51.0 mg/100 g	2.2	[38]
	绿豆	(种子: 水 = 1:4, g/mL), 40 °C 浸泡 4 h, pH 5.5, 萌发 7 h	110.4 mg/100 g	-	[84]
发芽协同其他处理	糙米	50 mg/mL 纤维素酶溶液浸泡 90 min, 30 °C 萌发 32 h	32.0 mg/100 g	7.5	[90]
	苦荞麦	微酸性电解水 (pH 5.83) 浸泡 12 h, 20 °C 萌发 6 d	143.2 mg/100 g	138.5	[91]
	西兰花	25 °C 浸泡 4 h, 12 h 光照和 12 h 避光萌发, 1.0 mmol/L 甘露糖处理 6 d	195.0 mg/100 g	1.3	[86]
	芸豆	在盐胁迫 (3.00 g/L 谷氨酸钠、5.37 mmol/L CaCl <sub>2</sub> ) 协同 0.17 g/L 抗坏血酸处理下, 萌发 24 h	303.6 mg/100 g	4.4	[36]
	南瓜种子	在 28 °C 下用 0.2% CaCl <sub>2</sub> , 3.8 mg/mL MSG, 4.0 mg/mL V <sub>B6</sub> 混合物浸泡 6 h, 30 °C 萌发 61.6 h	2679.0 mg/100 g	5.4	[92]
发芽协同缺氧处理	糙米	30% 含水量, 30 °C 萌发 48 h, 每间隔 4 h 通气处理	39.2 mg/100 g	1.5	[93]
	糙米	30 °C 浸泡 12 h, 28 °C 萌发 66 h, 28 °C 缺氧 (CO <sub>2</sub> ) 处理 6 h	542.8 mg/100 g	5.9	[87]
发芽协同冷冻处理	黑米	0 °C 冷冻 1 h, 24 °C 萌发 72 h	195.6 mg/100 g	1.5	[88]

基于以上讨论, 发芽食品中 GABA 的水平取决于其品种、发芽条件和预处理。发芽过程涉及到应激相关条件的因素, 如水分胁迫、缺氧、胞质 pH 值降低以及冷应激处理。调节这些条件可以不同程度的激活 GABA 富集的两条途径, 即 GABA 分流途径和多胺降解途径<sup>[94,95]</sup>。然而, 发芽富集技术有一定的局限性, 主要适用于豆类和谷物种子。

### 3.2. 微生物发酵法

除了植物来源外, GABA 的摄入还可以通过食用乳制品和发酵食品来补充。所使用的大多数产生 GABA 的菌株都是从奶酪、泡菜、酸奶和发酵大豆等传统发酵食品中分离出来的 (如表 3 所示)。

GABA 主要由类杆菌产生, 类杆菌是 GABA 最大的生产者群体, 包括短乳杆菌<sup>[96-98]</sup>、发酵乳杆菌<sup>[99]</sup>、植物乳杆菌<sup>[100]</sup>等。Wu 等<sup>[101]</sup>发现, 从鱼类中分离的短乳杆菌 RK03 表现出最高的 GABA 生产能力, 最高 GABA 产量为 62.5 g/L。Santos-Espinosa 等<sup>[102]</sup>从手工墨西哥奶酪中分离的 94 株乳酸菌中, L-571 和 L-572 两株乳酸菌发酵乳中 GABA 含量最高, 是其他菌株的 7.5–20.5 倍。此外, 在最佳发酵条件下 (37 °C、109 CFU/mL 菌落浓度、3 g/L Glu、100 μM 5-磷酸吡哆醛), L-571 和 L-572 的 GABA 产量分别提高了 10 倍和 1.6 倍。令人惊讶的是, 在 GABA 发酵富集过程中, 食品的外观和营养特性都得到了显著改善。如发酵 24 小时后, 短旋乳酸杆菌 TISTR 860 可使米粉的 GABA 含量提高至 21.8 mg/100 g, 米粉的拉伸强度和弹性均显著提高<sup>[103]</sup>。目前, 发酵富集技术主要用于液体 (牛奶和部分果汁) 和半固体食品 (奶酪) 中, 以提高 GABA 含量。通过菌种筛选和发酵工艺优化, 包括菌种、底物、活性因子、温度、pH 等, 达到预期的 GABA 富集效果。微生物发酵的富集原理是微生物具有较高的 GAD 活性, 可以在 GABA 的分流代谢过程中催化 Glu 合成 GABA<sup>[104]</sup>。

表 3. 微生物发酵技术。  
Table 3. Microbial fermentation technology.

菌株	菌株来源	培养条件	GABA 含量	增长倍数	参考文献
短乳杆菌 RK03	咸水鱼	用优化肉汤配方培养 (1% 葡萄糖、2.5% 酵母提取物、CaCO 各 2 ppm; 硫酸锰、吐温 80 和 10 μM 磷酸吡哆醛), 再加入 650 mM 味精发酵 88 h	62.5 g/L	-	[105]
短乳杆菌 CGMCC1306	传统发酵产品	在 MRS 培养基中 35 °C 发酵 72 h	104.4 g/L	-	[106]
短乳杆菌 A7/法氏乳杆菌 A11	意大利酵母	9.0 log CFU/mL, 30 °C 发酵 6 h	3.9 mg/100 g	4.9	[107]



表 3. (续)。

Table 3. (Continued).

菌株	菌株来源	培养条件	GABA 含量	增长倍数	参考文献
短乳杆菌 TISTR 860	酸菜	9.0 log CFU/mL, pH 4.5, 2%味精发酵 24 h	21.8 mg/100 g	-	[103]
发酵乳杆菌 HP3	泰国发酵食品	0 $\mu$ M 的 PLP, pH 6.5, 温度 40 $^{\circ}$ C	2.4 g/L	9.4	[99]
发酵乳杆菌 YS2	中国腌制蔬菜	在 100 mL 底物溶液 (80 mM 味精、0.2 mM 5-磷酸吡哆醛、0.2 M 乙酸钠缓冲液, pH 4.5) 中, 并在 40 $^{\circ}$ C 下培养 100 min	5.2 g/L	-	[108]
植物乳杆菌 KB1253	日本泡菜	pH 4.0, 20 $^{\circ}$ Bx, 35 $^{\circ}$ C 发酵 24 h	41.0 mM	2.0	[109]
植物乳杆菌 HU-C2W	中国泡菜	7.0 log CFU/mL, 37 $^{\circ}$ C 发酵 40 h	1.3 g/L	1.4	[110]
植物乳杆菌 H64	啤酒花	7.0 log CFU/mL, 30%麦麸, 30 $^{\circ}$ C 发酵 24 h	14.8 mg/100 g	5.9	[111]
乳酸乳球菌 L-571 或 L-572	手工墨西哥奶酪	109 CFU/mL, 3 g/L Glu, 100 $\mu$ M 5-磷酸吡哆醛, 37 $^{\circ}$ C 发酵 48 h	1.2 g/L	13.4	[102]
蜡样芽孢杆菌 KBC	-	温度 40 $^{\circ}$ C, pH 7 和味精 5 g/L	3.4 g/L	7.4	[112]

### 3.3. 新兴富集技术

如今, 为了满足消费者对营养、健康、安全的食品追求, 各种新兴技术逐渐被广泛应用于食品加工中, 包括高压 (HP) 加工、超声波 (US) 处理、脉冲光 (PL) 加工和真空浸渍等。这些技术可以更大程度的保留食品的营养成分以及维持食品理想的感官特性。目前, 这些技术已被用于增加天然食品中 GABA 的含量。

#### 3.3.1. 高压处理

HP 可以诱导固有酶的激活或失活, 这可能导致代谢物含量和浓度的减少或增加。因此, HP 可能诱导 GABA 富集途径的相关酶活增加, 从而促进 GABA 在植物组织中的积累。在 Sasagawa 等<sup>[113]</sup>研究中, 相比较对照样品, 糙米中的 GABA 经过 200 MPa 处理 5 分钟, 并在 25  $^{\circ}$ C 的饱和湿度下保存 15 小时后增加了约 3.5 倍。Kim 等<sup>[114]</sup>发现发芽糙米在 37  $^{\circ}$ C 下经过 50 MPa 处理 24 小时后, 其 GABA 含量达到 111.4 mg/100 g。同样, 在 Ueno 等<sup>[115]</sup>研究 HP 处理大豆子叶中 GABA 的积累时也得到了类似的结果。GABA 在 HP 处理过的植物组织中积累可能是由于 GAD 活性的增加。HP 处理可以通过破坏胞内细胞器或刺激某些代谢过程来促进  $H^+$  的释放, 降低 pH 值, 从而刺激 GAD 活化<sup>[115,116]</sup>。此外, HP 处理还可以通过激活纤维素水解酶来破坏细胞结构或者通过机械力破坏细胞结构以加速 Glu 或 GAD 的传质, 增强 Glu 和 GAD 之间的相互作用, 这可能会增加 GABA 的积累<sup>[117,118]</sup>。

#### 3.3.2. 超声处理

US 处理是可持续、绿色和新兴技术之一, 在食品加工中的应用日益广泛, 特别是在组织均质、提取活性化合物、干燥、酶失活以及过滤方面。US 处理可能是富集 GABA 的潜在方法。Ding 等<sup>[119]</sup>发现 US 处理萌发后的红米, GABA 含量进一步升高。该研究发现 US 处理过的发芽红米中与 GABA 分流相关的代谢物如 Glu、丙氨酸、琥珀酸均有增加。US 处理可能会促进发芽红米的能量代谢, 通过提高 GAD 活性, 从而促进 GABA 的积累。类似的原理在 Yang 等<sup>[120]</sup>的研究中也有所体现。他们利用 US 处理大豆种子, 再使其萌发。结果表明 US 处理后的样品的 GABA 含量高于未处理样品。在种子发芽前进行 US 处理可以通过激活种子中的 GAD。此外, US 处理富集 GABA 的原理在 Sun 等<sup>[121]</sup>的研究中得到深入研究。在该研究中, US 处理的咖啡叶中 GAD、DAO 和 AMADH 活性相比较未处理组分别显著 ( $p < 0.05$ ) 提高至 3.7 倍、1.5 倍和 2.2 倍。此外, US 处理后, PAO 活性略有升高 ( $p > 0.05$ ), 而 GABA-T 活性显著降低 ( $p < 0.05$ )。该研究表明 US 增加了咖啡叶细胞膜的通透性, 从而加速了谷氨酸钠向细胞内的迁移, 增加了细胞内底物的浓度。其次, US 影响了参与 GABA 生物合成

和代谢的酶 (GAD、GABA-T、DAO、PAO 和 AMADH) 的活性, 从而使 GABA 的积累增加到 4.6 倍。

### 3.3.3. 脉冲电场处理

PL 处理被认为是一种非常有前途的非热技术。它采用广谱的高强度光 (通常为 100–1100 nm), 覆盖紫外线、可见光和近红外波长范围, 并以极短的脉冲应用。适当的 PL 处理还可以维持或增强植物中某些酶的活性。研究证实, 特定剂量的 PL 辐照可以增强糙米内源酶的活性, 包括 GAD、 $\alpha$ -淀粉酶和蛋白酶, 这可能有利于提高某些营养物质的水平。关于利用 PL 富集 GABA 的研究有限。张良晨等<sup>[122]</sup>以脉冲强光光照强度、照射次数、照射距离为响应因素进行单因素试验, 在单因素试验的基础上以  $\gamma$ -氨基丁酸富集量为响应值。最后得出发芽糙米脉冲强光富集  $\gamma$ -氨基丁酸最优工艺为: 光照强度 0.45 kJ, 照射次数 395 次, 照射距离 9.0 cm, 在此条件下, 发芽糙米的  $\gamma$ -氨基丁酸含量达到 170.1 mg/100 g。王勃等<sup>[123]</sup>研究了脉冲强光 (IPL) 不同单次能量、闪照次数、开始处理时间对糙米发芽过程中 GAD 的影响。结果表明, 糙米浸泡后, 在单次闪照能量 400 J, 闪照次数 300 次, 发芽 25 小时后, GAD 活力达到 10.8 mg (g·min)<sup>-1</sup>, 是对照组的 2.2 倍。Zhang 等<sup>[124]</sup>发现 PL 组在所有萌发期的 GABA 含量均高于对照组。在萌发 24 小时后, PL 组 GABA 含量达到峰值 48.8 mg/100 g。PL 处理可能加速了 PL 组的蛋白水解, 增加了 Glu 含量和 GAD 活性, 从而促进 GABA 的产生。然而, 较低 PL 能量强度不能有效穿透生物体的细胞膜, 对糙米内源酶活性的激活作用有限。过高的 PL 能量强度会导致糙米内部瞬间高温, 导致部分 GABA 分解。

### 3.3.4. 真空处理和低压等离子体

真空处理和低压等离子体处理也是利用缺氧来提高 GABA 的含量, 如表 4 所示。王斌等<sup>[125]</sup>在稻谷发芽开始时真空处理 10 小时, 发芽稻谷中的 GABA 含量达到最高, 为 210.1 mg/100 g 干基, 相比较未经过真空处理的发芽稻谷提高了 50.4%。姜秀杰等<sup>[126]</sup>探究了真空处理下富集发芽豌豆 GABA 的工艺条件。结果表明: 在浸泡时间为 10 小时、真空时间为 8 小时、发芽温度为 35 °C、真空时段为 0–5 小时的条件下, 豌豆中 GABA 含量高达 210.7 mg/100 g, 是原料 GABA 含量的 2.8 倍, 是发芽豌豆的 1.7 倍。真空处理实质就是低氧胁迫, 在低氧情况下, 植物中乳酸会急剧增加, 使植物组织中氢离子浓度升高, 进而可促进 GABA 的合成; 但真空时间也不宜过长, 时间过长就会超过豌豆组织承受的极限, 导致 GABA 含量下降。

Zargarchi 等<sup>[127]</sup>发现提高等离子体功率水平可以增强 GABA 的富集。100 W 和 50 W 等离子体处理的种子 GABA 含量分别比对照高 10.8 倍和 8.6 倍。Chen 等<sup>[128]</sup>研究了不同电压水平下低压等离子体对粳稻糙米 GABA 含量的影响, 仅 3 kV 低压等离子体处理 10 min 即可显著提高萌发种子 GABA 含量, 比未暴露样品提高约 1.5 倍。干种子浸泡吸水的早期阶段是种子萌发的关键时期。吸水的程度取决于三个因素: (1) 种子的成分; (2) 种皮的渗透性; (3) 水的可用性<sup>[128]</sup>。Chen 等<sup>[129]</sup>发现等离子体处理会导致糙米表面蚀刻, 从而使水更容易被稻仁吸收。这样可提高发芽率, 从而增加 GABA 富集。

表 4. 新兴富集技术。

Table 4. Emerging enrichment technologies.

	种类	最佳条件	GABA 含量	增长倍数	参考文献
高压处理	糙米	200 MPa 处理 5 min	21.0 mg/100 g	3.5	[113]
	糙米	在 25 °C 下 200 MPa 处理 10 min	1.73 $\mu$ mol/g	1.2	[130]
	发芽糙米	在 37 °C 下 50 MPa 处理 24 h	111.4 mg/100 g	3.9	[114]



表 4. (续)。  
Table 4. (Continued).

	种类	最佳条件	GABA 含量	增长倍数	参考文献
超声处理	发芽红米	25 kHz, 16 W/L 处理 5 min	75.8 mg/100 g	1.7	[119]
	大豆种子	在 25 °C 下 300 W 处理 30 min	119.3 mg/100 g	1.4	[120]
	咖啡叶	在 28 °C 下 20/40 kHz 和 150 W 处理 5 min	-	4.6	[121]
脉冲光处理	发芽糙米	脉冲光能量 0.50 J/cm <sup>2</sup> , 照射距离 8 cm; 脉冲次数 400 次	48.8 mg/100 g	6.5	[124]
	发芽糙米	脉冲光能量 0.45 kJ, 距离 9.0 cm, 照射次数 395 次	170.1 mg/100 g	-	[122]
低压等离子体处理	水稻	低压等离子体 100 W 预处理 5 min, 25 °C 浸泡 48 h, 在 30 °C 和 90%–95% RH 条件下, 萌发 48 h	16.0 mg/100 g	10.8	[127]
	糙米	3 kV 低压等离子体处理 10 min	28.0 mg/100 g	1.5	[128]
真空处理	发芽豌豆	浸泡时间 10 h, 真空时间 8 h, 发芽温度 35 °C, 真空时段 0–5 h	210.7 mg/100 g	1.7	[126]
	发芽稻谷	真空处理 10 h	210.1 mg/100 g	1.5	[125]

### 4. 富含 GABA 食品的健康益处

GABA 已经成为食品工业中流行的生物活性化合物。因此, 富含 GABA 的食品具有许多健康益处 (如图 3 所示), 这包括低血糖、降血压、保护神经作用、抗抑郁、改善睡眠、抗氧化、抗炎等作用。由根霉发酵的绿豆<sup>[131]</sup>和由唾液链球菌发酵的酸奶<sup>[132]</sup>可以通过降低糖尿病小鼠的血糖、糖化血红蛋白、胆固醇、甘油三酯和低密度脂蛋白水平来增强其抗高血糖作用。用富含 GABA 的麦麸对高脂饮食大鼠通过进行干预<sup>[133]</sup>, 也可以改善改善葡萄糖稳态。Chen 等<sup>[134]</sup>研究发现富含 GABA 的荞麦具有降血压的潜力, 其对血管紧张素转换酶的抑制率最高为 87.80%, 是原始荞麦的 2.6 倍。Nishimura 等<sup>[135]</sup>给 39 名轻度高血压成年人服用 150 g 富含 GABA 大米, 在第 0、4 和 8 周分别进行血液学检查。结果表明, 与安慰剂大米相比, 在干预期间的第 6 周和第 8 周以及干预后的第 1 周, 早晨收缩压显著降低了。给痴呆小鼠口服 50 mg/kg 体重的海带 GABA 提取物 4 周, 痴呆小鼠的认知功能障碍和神经功能障碍得到明显改善<sup>[5]</sup>。Li 等<sup>[136]</sup>报道了富含 GABA 的鹰嘴豆奶可以保护神经内分泌 PC-12 细胞免受 MnCl<sub>2</sub> 诱导的损伤, 提高细胞活力, 减少乳酸脱氢酶的释放。



图 3. 富含 GABA 的食品的健康益处。  
Figure 3. Health benefits of GABA-rich foods.

饮用富含 GABA 的茶也已经多项研究证明可以缓解抑郁症状、减少氧化应激和改善与抑郁相关的行为参数<sup>[137-139]</sup>。在 Daglia 等<sup>[138]</sup>的研究中,以 10 mg/kg 或 20 mg/kg 富含 GABA 茶提取物给 PSD 小鼠模型灌胃一周,可以明显减弱抑郁情绪,降低小鼠大脑中脂质过氧化产物的水平。Byun 等<sup>[140]</sup>进行了一项随机双盲试验,给 40 名失眠症患者每天喂食 300 mg 富含 GABA 的发酵大米胚芽,持续 4 周,患者睡眠潜伏期由 13.4 分钟显著降低至 5.7 分钟 ( $p = 0.001$ ),睡眠效率由 79.4% 显著提高至 86.1% ( $p = 0.018$ )。Park 等<sup>[141]</sup>持续 29 天给小鼠喂食富含 GABA (92.2 g/L) 的发酵枳椇子提取物可以通过增强抗氧化防御系统、脂肪酸氧化和减少脂肪生成来预防乙醇诱导的小鼠肝损伤。此外,富含 GABA 的发酵苦艾根提取物可以上调乙醇脱氢酶、醛脱氢酶和超氧化物歧化酶 mRNA 表达,并呈剂量依赖性降低肝脏酶活性,从而增加酒精代谢,并表现出抗氧化和抗炎作用,诱导肝脏免受酒精引起的损伤。富含 GABA 的发酵草莓汁通过抑制 Balb/c 小鼠 RAW 264.7 细胞中的促炎细胞因子和调节免疫反应来发挥抗炎作用<sup>[142]</sup>。富含 GABA 的红藻能够显著抑制 IL-1 $\alpha$  的释放和 NGF 的分泌,抑制神经炎症介导体,并表现出显著的神经舒缓活性<sup>[143]</sup>。

## 5. 结论

综上所述,GABA 广泛分布于各种天然食品中但天然含量较低。通过生物富集技术,包括热湿处理、冷热胁迫、缺氧胁迫,以及发芽和微生物发酵技术可以使食品中 GABA 有效富集,但会受到富集载体的品种(基因型)、处理的条件、生存环境等诸多因素影响。富含 GABA 的食物也被证明拥有众多健康益处,包括降血糖、降血压、保护神经、抗抑郁、改善失眠、抗氧化、抗炎等。尽管已经对 GABA 的富集技术进行了大量研究,但是仍有问题需要改进。(1) 挑选易于富集 GABA 的食物载体进行培育。(2) 考虑到微生物发酵比植物胁迫拥有更好的富集效果,未来应该着重于筛选高产 GABA 的优良菌株,扩大生产。(3) 应更多地努力强调 GABA 在储存过程中的稳定性,并开发创新技术来增强传统食品中的 GABA 或最大限度地减少加工损失。(4) 随着众多新兴技术在食品工业中的应用,未来应该考虑将更多新兴技术与 GABA 富集相结合,探究食品加工过程对食品 GABA 富集效果的影响。

## 作者贡献

调查,数据整理和原始草稿撰写,YL; 监督,KW 和 LZ; 审阅和编辑,资源和项目管理,XL 和 ZH。所有作者均已阅读并同意手稿的出版版本。

## 致谢

作者感谢国家自然科学基金项目(32202022)、香江学者计划项目(XJ2023050)、东莞市重点研发计划项目(2022120030008)、广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515012599)、广州市科技规划项目(2023A04J1467)的资助。

## 利益冲突

作者声明没有利益冲突。

## 参考文献

1. Li Y, Zhou X, Chen D, et al. Research progress in development and application of high  $\gamma$ -aminobutyric acid rice and its metric food. *China Rice* 2023; 29(4): 38–44. doi: 10.3969/j.issn.1006-8082.2023.04.007
2. Lee XY, Tan JS, Cheng LH. Gamma aminobutyric acid (GABA) enrichment in plant-based food—A mini review. *Food Reviews International* 2023; 39(8): 5864–5885. doi: 10.1080/87559129.2022.2097257

3. Ngo DH, Vo TS. An updated review on pharmaceutical properties of gamma-aminobutyric acid. *Molecules* 2019; 24(15): 2678. doi: 10.3390/molecules24152678
4. Kim S, Jo K, Hong KB, et al. GABA and L-theanine mixture decreases sleep latency and improves NREM sleep. *Pharmaceutical Biology* 2019; 57(1): 65–73. doi: 10.1080/13880209.2018.1557698
5. Reid SNS, Ryu JK, Kim Y, Jeon BH. GABA-enriched fermented *Laminaria japonica* improves cognitive impairment and neuroplasticity in scopolamine- and ethanol-induced dementia model mice. *Nutrition Research and Practice* 2018; 12(3): 199–207. doi: 10.4162/nrp.2018.12.3.199
6. Wagner S, Castel M, Gainer H, Yarom Y. GABA in the mammalian suprachiasmatic nucleus and its role in diurnal rhythmicity. *Nature* 1997; 387(6633): 598–603. doi: 10.1038/42469
7. Hosseini Dastgerdi A, Sharifi M, Soltani N. GABA administration improves liver function and insulin resistance in offspring of type 2 diabetic rats. *Scientific Reports* 2021; 11(1): 23155. doi: 10.1038/s41598-021-02324-w
8. He Y, Ouyang J, Hu Z, et al. Intervention mechanism of repeated oral GABA administration on anxiety-like behaviors induced by emotional stress in rats. *Psychiatry Research* 2019; 271: 649–657. doi: 10.1016/j.psychres.2018.12.025
9. Rashmi D, Zanan R, John S, et al.  $\gamma$ -Aminobutyric acid (GABA): Biosynthesis, role, commercial production, and applications. *Studies in Natural Products Chemistry* 2018; 57: 413–452. doi: 10.1016/B978-0-444-64057-4.00013-2
10. Untereiner A, Abdo S, Bhattacharjee A, et al. GABA promotes  $\beta$ -cell proliferation, but does not overcome impaired glucose homeostasis associated with diet-induced obesity. *The FASEB Journal* 2019; 33(3): 3968–3984. doi: 10.1096/fj.201801397R
11. Si X, Shang W, Zhou Z, et al. Gamma-aminobutyric acid enriched rice bran diet attenuates insulin resistance and balances energy expenditure via modification of gut microbiota and short-chain fatty acids. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 2018; 66(4): 881–890. doi: 10.1021/acs.jafc.7b04994
12. Wang Y, Yang C, Wang L, et al. Research progress on gamma-aminobutyric acid (GABA) enrichment technology during brown rice germination (Chinese). *Hubei Agricultural Sciences* 2022; 61(S1): 11–16.
13. Li H, Li B, Shi S, et al. Research progress on the application of  $\gamma$ -aminobutyric acid in food. *Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition)* 2023; 44(1): 117–125. doi: 10.16433/j.1673-2383.2023.01.016
14. Diana M, Quilez J, Rafecas M. Gamma-aminobutyric acid as a bioactive compound in foods: A review. *Journal of Functional Foods* 2014; 10: 407–420. doi: 10.1016/j.jff.2014.07.004
15. Toyozumi T, Kosugi T, Toyama Y, Nakajima T. Effects of high-temperature cooking on the gamma-aminobutyric acid content and antioxidant capacity of germinated brown rice (*Oryza sativa* L.). *CyTA—Journal of Food* 2021; 19(1): 360–369. doi: 10.1080/19476337.2021.1905721
16. Lin Y, Tang Q, Chu M, et al. Research progress on the function, production and food application of  $\gamma$ -aminobutyric acid (Chinese). *China Condiment* 2021; 46(6): 173–179.
17. Kamijiam B, Suwannaporn P, Bednarz H, et al. Elevation of gamma-aminobutyric acid (GABA) and essential amino acids in vacuum impregnation mediated germinated rice traced by MALDI imaging. *Food Chemistry* 2021; 365: 130399. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130399
18. Zhang W, Hou Z, Ren G, et al. Comparison of nutrient composition of red rice from different areas. *Science and Technology of Food Industry* 2019; 40(6): 263–267,272. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.06.044
19. Zhang J, He Y, Wu W. Study on the rapid determination of  $\gamma$ -aminobutyric acid in red rice using Bertol chromogenic method (Chinese). *Cereals & Oils* 2014; 27(10): 40–42.
20. Islam MZ, Shim MJ, Jeong SY, Lee YT. Effects of soaking and sprouting on bioactive compounds of black and red pigmented rice cultivars. *International Journal of Food Science & Technology* 2022; 57(1): 201–209. doi: 10.1111/ijfs.15105
21. Bai H, Ma X, Cao G, et al. The differences of nutritional and functional component contents in different types of special rice. *Journal of Plant Genrtic Resources* 2017; 18(6): 1013–1022. doi: 10.13430/j.cnki.jpgr.2017.06.003
22. Munarko H, Sitanggang AB, Kusnandar F, Budijanto S. Germination of five Indonesian brown rice: Evaluation of antioxidant, bioactive compounds, fatty acids and pasting properties. *Food Science and Technology* 2022; 42: 19721. doi: 10.1590/fst.19721
23. Zhang B, Wang RM, Chen P, et al. Study on zinc accumulation, bioavailability, physicochemical and structural characteristics of brown rice combined with germination and zinc fortification. *Food Research International* 2022; 158: 111450. doi: 10.1016/j.foodres.2022.111450
24. Yu C, Zhu L, Zhang H, et al. Effect of cooking pressure on phenolic compounds, gamma-aminobutyric acid, antioxidant activity and volatile compounds of brown rice. *Journal of Cereal Science* 2021; 97: 103127. doi: 10.1016/j.jcs.2020.103127
25. Coda R, Rizzello CG, Gobbetti M. Use of sourdough fermentation and pseudo-cereals and leguminous flours for the making of a functional bread enriched of gamma-aminobutyric acid (GABA). *International Journal of Food Microbiology* 2010; 137(2–3): 236–245. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2009.12.010
26. Youn YS, Park JK, Jang HD, Rhee YW. Sequential hydration with anaerobic and heat treatment increases GABA

- ( $\gamma$ -aminobutyric acid) content in wheat. *Food Chemistry* 2011; 129(4): 1631–1635. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.06.020
27. Rico D, Peñas E, García MDC, et al. Sprouted barley flour as a nutritious and functional ingredient. *Foods* 2020; 9(3): 296. doi: 10.3390/foods9030296
  28. Chung HJ, Jang SH, Cho HY, et al. Effects of steeping and anaerobic treatment on GABA ( $\gamma$ -aminobutyric acid) content in germinated waxy hull-less barley. *LWT—Food Science and Technology* 2009; 42(10): 1712–1716. doi: 10.1016/j.lwt.2009.04.007
  29. Zhang Z, Ren Y, Jiang D, et al. Differences in  $\gamma$ -aminobutyric acid content in different barley grains and their environmental impacts (Chinese). *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* 2022; 35(5): 1089–1094.
  30. Tiansawang K, Luangpituksa P, Varayanond W, Hansawasdi C. GABA ( $\gamma$ -aminobutyric acid) production, antioxidant activity in some germinated dietary seeds and the effect of cooking on their GABA content. *Food Science and Technology* 2016; 36(2): 313–321. doi: 10.1590/1678-457X.0080
  31. Ma Y, Wang A, Yang M, et al. Influences of cooking and storage on  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) content and distribution in mung bean and its noodle products. *LWT* 2022; 154: 112783. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112783
  32. Luo K, Song X. Determination of free neurotransmitter-like amino acids in soy foods by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (Chinese). *Science and Technology of Food Industry* 2021; 42(18): 325–333.
  33. Vann K, Techaparin A, Apiraksakorn J. Beans germination as a potential tool for GABA-enriched tofu production. *Journal of Food Science and Technology* 2020; 57(11): 3947–3954. doi: 10.1007/s13197-020-04423-4
  34. Jiang X, Xu Q, Zhang A, et al. Optimization of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) accumulation in germinating adzuki beans (*Vigna angularis*) by vacuum treatment and monosodium glutamate, and the molecular mechanisms. *Frontiers in Nutrition* 2021; 8: 693862. doi: 10.3389/fnut.2021.693862
  35. Liao WC, Wang CY, Shyu YT, et al. Influence of preprocessing methods and fermentation of adzuki beans on  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) accumulation by lactic acid bacteria. *Journal of Functional Foods* 2013; 5(3): 1108–1115. doi: 10.1016/j.jff.2013.03.006
  36. Yu H, Liao H, Chen C, Tian H. Effects of salt stress and ascorbic acid on the accumulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid during kidney bean germination. *Modern Food Science and Technology* 2023; 39(8): 213–220. doi: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.8.1037
  37. Hung CH, Chen SD. Study of inducing factors on resveratrol and antioxidant content in germinated peanuts. *Molecules* 2022; 27(17): 5700. doi: 10.3390/molecules27175700
  38. Yang R, Feng L, Wang S, et al. Accumulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid in soybean by hypoxia germination and freeze-thawing incubation. *Journal of Science of Food and Agriculture* 2016; 96(6): 2090–2096. doi: 10.1002/jsfa.7323
  39. Quílez J, Diana M. Gamma-aminobutyric acid-enriched fermented foods. In: Frias J, Martínez-Villaluenga C, Peñas E (editors). *Fermented Foods in Health and Disease Prevention*. Academic Press; 2017. pp. 85–103.
  40. Huang Y. Determination of free amino acid content in common fruits and vegetables (Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Science* 2013; 41(9): 4088–4089.
  41. Lee Y, Hwang KT. Changes in physicochemical properties of mulberry fruits (*Morus alba* L.) during ripening. *Scientia Horticulturae* 2017; 217: 189–196. doi: 10.1016/j.scienta.2017.01.042
  42. Choi HR, Baek MW, Tilahun S, Jeong CS. Long-term cold storage affects metabolites, antioxidant activities, and ripening and stress-related genes of kiwifruit cultivars. *Postharvest Biology and Technology* 2022; 189: 111912. doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.111912
  43. Wu ZC, Yang ZY, Li JG, et al. Methyl-inositol,  $\gamma$ -aminobutyric acid and other health benefit compounds in the aril of litchi. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 2016; 67(7): 762–772. doi: 10.1080/09637486.2016.1198888
  44. Huang D, Chen Q, Liu Y, et al. Study on the determination of  $\gamma$ -aminobutyric acid content in Guangxi longan fruits (Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Science* 2012; 40(30): 14967–14968.
  45. Pu Y, Sinclair AJ, Zhong J, et al. Determination of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) in jujube fruit (*Ziziphus jujuba* Mill.). *CyTA—Journal of Food* 2019; 17(1): 158–162. doi: 10.1080/19476337.2019.1566277
  46. Huang B. Aminobutyric acid content in red dates and its influencing factors (Chinese). *The Food Industry* 2020; 41(10): 210–212.
  47. Saito T, Matsukura C, Sugiyama M, et al. Screening for gamma-aminobutyric acid (GABA)-rich tomato varieties. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 2008; 77(3): 242–250. doi: 10.2503/jjshs1.77.242
  48. Yoon YE, Kuppusamy S, Cho KM, et al. Influence of cold stress on contents of soluble sugars, vitamin C and free amino acids including gamma-aminobutyric acid (GABA) in spinach (*Spinacia oleracea*). *Food Chemistry* 2017; 215: 185–192. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.07.167
  49. Mori T, Umeda T, Honda T, et al. Varietal differences in the chlorogenic acid, anthocyanin, soluble sugar, organic acid, and amino acid concentrations of eggplant fruit. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 2013; 88(5): 657–663. doi: 10.1080/14620316.2013.11513021

50. Tilahun S, Choi HR, Baek MW, et al. Antioxidant properties,  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) content, and physicochemical characteristics of tomato cultivars. *Agronomy* 2021; 11(6): 1204. doi: 10.3390/agronomy11061204
51. Ma C, Gao C, Tian D, et al. Study on the quality differences of Yunkang No. 10 anaerobically processed white tea in different seasons (Chinese). *Science and Technology of Food Industry* 2023; 1–12.
52. Chen R, Meng Q, Liu H, et al. Analysis of differences in free amino acid components of different types of tea leaves (Chinese). *Food Science and Technology* 2017; 42(6): 258–263.
53. Yılmaz C, Özdemir F, Gökmen V. Investigation of free amino acids, bioactive and neuroactive compounds in different types of tea and effect of black tea processing. *LWT* 2020; 117: 108655. doi: 10.1016/j.lwt.2019.108655
54. Horanni R, Engelhardt UH. Determination of amino acids in white, green, black, oolong, pu-erh teas and tea products. *Journal of Food Composition and Analysis* 2013; 31(1): 94–100. doi: 10.1016/j.jfca.2013.03.005
55. Syu KY, Lin CL, Huang HC, Lin JK. Determination of theanine, GABA, and other amino acids in green, oolong, black, and Pu-erh teas with dabsylation and high-performance liquid chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2008; 56(17): 7637–7643. doi: 10.1021/jf801795m
56. Zhang J, Li M, Gao Q, et al. Effect of anaerobic treatment time on quality of green and black teas. *Acta Tea Sinica* 2021; 62(2): 78–84.
57. Chen Q, Zhang Y, Tao M, et al. Comparative metabolic responses and adaptive strategies of tea leaves (*Camellia sinensis*) to  $N_2$  and  $CO_2$  anaerobic treatment by a nontargeted metabolomics approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2018; 66(36): 9565–9572. doi: 10.1021/acs.jafc.8b03067
58. Cohen N, Cohen J, Asatiani MD, et al. Chemical composition and nutritional and medicinal value of fruit bodies and submerged cultured mycelia of culinary-medicinal higher Basidiomycetes mushrooms. *International Journal of Medicinal Mushrooms* 2014; 16(3): 273–291. doi: 10.1615/intjmedmushr.v16.i3.80
59. Zhang Y, Zhang X, Fu J, et al. Breeding of *Pleurotus lucidum* strains with high yield of  $\gamma$ -aminobutyric acid using protoplast ultraviolet mutagenesis method (Chinese). *Journal of Zhejiang University of Science and Technology* 2019; 31(3): 198–205.
60. Chen SY, Ho KJ, Hsieh YJ, et al. Contents of lovastatin,  $\gamma$ -aminobutyric acid and ergothioneine in mushroom fruiting bodies and mycelia. *LWT* 2012; 47(2): 274–278. doi: 10.1016/j.lwt.2012.01.019
61. Cai S, Gao F, Zhang X, et al. Evaluation of  $\gamma$ -aminobutyric acid, phytate and antioxidant activity of tempeh-like fermented oats (*Avena sativa* L.) prepared with different filamentous fungi. *Journal of Food Science and Technology* 2014; 51(10): 2544–2551. doi: 10.1007/s13197-012-0748-2
62. Yang R, Yin Y, Gu Z. Polyamine degradation pathway regulating growth and GABA accumulation in germinating fava bean under hypoxia-NaCl stress. *Journal of Agricultural Science and Technology* 2015; 17(2): 311–320.
63. Ma Y, Tong L, 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. *International Journal of Food Science & Technology* 2021; 56(4): 1562–1573. doi: 10.1111/ijfs.14771
64. Wang S, Zhou S, Wang L, et al. Effect of an environment friendly heat and relative humidity approach on  $\gamma$ -aminobutyric acid accumulation in different highland barley cultivars. *Foods(Basel, Switzerland)* 2022; 11(5): 691. doi: 10.3390/foods11050691
65. Institute of Food Science and Technology CAAS. China cereals and oils society group standard— $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA)-enriched cereal and legume products (Chinese). Available online: <https://www.ccoaonline.com/ueditor/php/upload/file/20210304/1614838163858714.pdf> (accessed on 24 October 2023).
66. Takahashi Y, Sasanuma T, Abe T. Accumulation of gamma-aminobutyrate (GABA) caused by heat-drying and expression of related genes in immature vegetable soybean (edamame). *Breeding Science* 2013; 63(2): 205–210. doi: 10.1270/jsbbs.63.205
67. Guo H, Liang J, Liu Z, et al. Effects of different drying methods on bioactive components and their antioxidant activities of mulberry leaves green tea. *Storage and Process* 2021; 21(7): 52–58.
68. Li E, Luo X, Liao S, et al. Accumulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid during cold storage in mulberry leaves. *International Journal of Food Science & Technology* 2018; 53(12): 2664–2672. doi: 10.1111/ijfs.13875
69. Chen Q, Li M, Ding W, et al. Effects of high  $N_2/CO_2$  in package treatment on polyamine-derived 4-Aminobutyrate (GABA) biosynthesis in cold-stored white mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Postharvest Biology and Technology* 2020; 162: 111093. doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.111093
70. Liao J, Wu X, Xing Z, et al.  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) accumulation in tea (*Camellia sinensis* L.) through the GABA shunt and polyamine degradation pathways under anoxia. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2017; 65(14): 3013–3018. doi: 10.1021/acs.jafc.7b00304
71. Dai W, Xie D, Lin Z, et al. A nontargeted and targeted metabolomics study on the dynamic changes in metabolite levels during the anaerobic treatment of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) tea. *LWT* 2020; 126: 109313. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109313

72. Oh SJ, Kim HS, Lim ST, Reddy CK. Enhanced accumulation of gamma-aminobutyric acid in rice bran using anaerobic incubation with various additives. *Food Chemistry* 2019; 271: 187–192. doi: 10.1016/j.foodchem
73. Elbaloula MF, Hassan AB. Effect of different salt concentrations on the gamma-aminobutyric-acid content and glutamate decarboxylase activity in germinated sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) grain. *Food Science & Nutrition* 2022; 10(6): 2050–2056. doi: 10.1002/fsn3.2821
74. Wang M, Zhu Y, Wang P, et al. Effect of  $\gamma$ -aminobutyric acid on phenolics metabolism in barley seedlings under low NaCl treatment. *Antioxidants (Basel)* 2021; 10(9): 1421. doi: 10.3390/antiox10091421
75. Jin Y, Tang C, Yao T, et al. Optimization of enrichment of  $\gamma$ -aminobutyric acid in mulberry leaves by response surface methodology. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology* 2021; 35(5): 102–107.
76. Zhao W, Li Y, Ma W, et al. A study on quality components and sleep-promoting effects of GABA black tea. *Food & Function* 2015; 6(10): 3393–3398. doi: 10.1039/c5fo00265f
77. Shi Y, Li M, Wang J, et al. Effect of anaerobic time on main components such as  $\gamma$ -aminobutyric acid and their sensory quality in mulberry leaf tea (Chinese). *Journal of Southern Agriculture* 2022; 53(4): 1170–1176.
78. Wang Y, Xiong F, Nong S, et al. Effects of nitric oxide on the GABA, polyamines, and proline in tea (*Camellia sinensis*) roots under cold stress. *Scientific Reports* 2020; 10(1): 12240. doi: 10.1038/s41598-020-69253-y
79. Wang K, Xu F, Cao S, et al. Effects of exogenous calcium chloride ( $\text{CaCl}_2$ ) and ascorbic acid (AsA) on the  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) metabolism in shredded carrots. *Postharvest Biology and Technology* 2019; 152: 111–117. doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.03.005
80. Chi Z, Dai Y, Cao S, et al. Exogenous calcium chloride ( $\text{CaCl}_2$ ) promotes  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) accumulation in fresh-cut pears. *Postharvest Biology and Technology* 2021; 174: 111446. doi: 10.1016/j.postharvbio.2020.111446
81. Bai Q, Yang R, Zhang L, Gu Z. Salt stress induces accumulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid in germinated foxtail millet (*Setaria italica* L.). *Cereal Chemistry* 2013; 90(2): 145–149. doi: 10.1094/CCHEM-06-12-0071-R
82. Liu S, Wang W, Lu H, et al. New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: A review. *Trends in Food Science & Technology* 2022; 123: 187–197. doi: 10.1016/j.tifs.2022.02.029
83. Huang G, Cai W, Xu B. Improvement in beta-carotene, vitamin B<sub>2</sub>, GABA, free amino acids and isoflavones in yellow and black soybeans upon germination. *LWT* 2017; 75: 488–496. doi: 10.1016/j.lwt.2016.09.029
84. Yen NTH, Hoa PN, Hung PV. Optimal soaking conditions and addition of exogenous substances improve accumulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) in germinated mung bean (*Vigna radiata*). *International Journal of Food Science & Technology* 2022; 57(7): 3924–3933. doi: 10.1111/ijfs.15473
85. Guo Z, Zhu Q, Zhao Y. Study on the process of enriching  $\gamma$ -aminobutyric acid through sprouting of cowpea (Chinese). *Farm Machinery* 2012; 33(22): 70–74.
86. Xie K, Wu C, Chi Z, et al. Enhancement of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) and other health-promoting metabolites in germinated broccoli by mannose treatment. *Scientia Horticulturae* 2021; 276: 109706. doi: 10.1016/j.scienta.2020.109706
87. Ding J, Yang T, Feng H, et al. Enhancing contents of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) and other micronutrients in dehulled rice during germination under normoxic and hypoxic conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2016; 64(5): 1094–1102. doi: 10.1021/acs.jafc.5b04859
88. Yu Y, Li M, Li C, et al. Accelerated accumulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid and modifications on its metabolic pathways in black rice grains by germination under cold stress. *Foods* 2023; 12(6): 1290. doi: 10.3390/foods12061290
89. Hussain SZ, Jabeen R, Naseer B, Shikari AB. Effect of soaking and germination conditions on  $\gamma$ -aminobutyric acid and gene expression in germinated brown rice. *Food Biotechnology* 2020; 34(2): 132–150. doi: 10.1080/08905436.2020.1744448
90. Zhang Q, Liu N, Wang 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. *Food Chemistry* 2019; 289: 232–239. doi: 10.1016/j.foodchem
91. Hao J, Wu T, Li H, et al. Dual effects of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) treatment on the accumulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) and rutin in germinated buckwheat. *Food Chemistry* 2016; 201: 87–93. doi: 10.1016/j.foodchem
92. Liang L, Chen L, Liu G, et al. Optimization of germination and ultrasonic-assisted extraction for the enhancement of  $\gamma$ -aminobutyric acid in pumpkin seed. *Food Science & Nutrition* 2022; 10(6): 2101–2110. doi: 10.1002/fsn3.2826
93. Zhang Q, Liu N, Wang SS, Pan LQ. Effects of germination and aeration treatment following segmented moisture conditioning on the  $\gamma$ -aminobutyric acid accumulation in germinated brown rice. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 2020; 13(5): 234–240. doi: 10.25165/j.ijabe.20201305.5538
94. Wang L, Liu M, Lv YG, Zhang H. Purification of calmodulin from rice bran and activation of glutamate decarboxylase by  $\text{Ca}_2^+$ /calmodulin. *Journal of Science Food and Agriculture* 2010; 90(4): 669–675. doi:



- 10.1002/jsfa.3866
95. Zhang H, Yao H, Chen F, Wang X. Purification and characterization of glutamate decarboxylase from rice germ. *Food Chemistry* 2007; 101(4): 1670–1676. doi: 10.1016/j.foodchem.2006.04.027
  96. Seo MJ, Nam YD, Lee SY, et al. Expression and characterization of a glutamate decarboxylase from *Lactobacillus brevis* 877G producing  $\gamma$ -aminobutyric acid. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* 2013; 77(4): 853–856. doi: 10.1271/bbb.120785
  97. Li H, Qiu T, Gao D, Cao Y. Medium optimization for production of gamma-aminobutyric acid by *Lactobacillus brevis* NCL912. *Amino Acids* 2010; 38(5): 1439–1445. doi: 10.1007/s00726-009-0355-3
  98. Park KB, Oh SH. Cloning, sequencing and expression of a novel glutamate decarboxylase gene from a newly isolated lactic acid bacterium, *Lactobacillus brevis* OPK-3. *Bioresource Technology* 2007; 98(2): 312–319. doi: 10.1016/j.biortech.2006.01.004
  99. Woraharn S, Lailerd N, Sivamaruthi BS, et al. Evaluation of factors that influence the L-glutamic and  $\gamma$ -aminobutyric acid production during *Hericium erinaceus* fermentation by lactic acid bacteria. *CyTA—Journal of Food* 2016; 14(1): 47–54. doi: 10.1080/19476337.2015.1042525
  100. Park SY, Lee JW, Lim SD. The probiotic characteristics and GABA production of *Lactobacillus plantarum* K154 isolated from kimchi. *Food Science and Biotechnology* 2014; 23(6): 1951–1957. doi: 10.1007/s10068-014-0266-2
  101. Wu CH, Hsueh YH, Kuo JM, Liu SJ. Characterization of a potential probiotic *Lactobacillus brevis* RK03 and efficient production of  $\gamma$ -aminobutyric acid in batch fermentation. *International Journal of Molecular Sciences* 2018; 19(1): 143. doi: 10.3390/ijms19010143
  102. Santos-Espinosa A, Beltrán-Barrientos LM, Reyes-Díaz R, et al. Gamma-aminobutyric acid (GABA) production in milk fermented by specific wild lactic acid bacteria strains isolated from artisanal Mexican cheeses. *Annals of Microbiology* 2020; 70(1): 1–11. doi: 10.1186/s13213-020-01542-3
  103. Chittrakhani C, Songsermpong S, Trevanich S, Sukor R. Effect of *Levilactobacillus brevis* TISTR 860 and *Lactiplantibacillus plantarum* TISTR 951 on gamma-aminobutyric acid content in fermented rice flour and rice noodles (Kanomjeen). *International Journal of Food Science & Technology* 2022; 57(6): 3410–3418. doi: 10.1111/ijfs.15664
  104. Luo H, Liu Z, Xie F, et al. Microbial production of gamma-aminobutyric acid: Applications, state-of-the-art achievements, and future perspectives. *Critical Reviews in Biotechnology* 2021; 41(4): 491–512. doi: 10.1080/07388551.2020.1869688
  105. Wu CH, Hsueh YH, Kuo JM, Liu SJ. Characterization of a potential probiotic *Lactobacillus brevis* RK03 and efficient production of  $\gamma$ -aminobutyric acid in batch fermentation. *International Journal of Molecular Sciences* 2018; 19(1): 143. doi: 10.3390/ijms19010143
  106. Lyu C, Zhao W, Peng C, et al. Exploring the contributions of two glutamate decarboxylase isozymes in *Lactobacillus brevis* to acid resistance and  $\gamma$ -aminobutyric acid production. *Microbial Cell Factories* 2018; 17(1): 180. doi: 10.1186/s12934-018-1029-1
  107. Venturi M, Galli V, Pini N, et al. Use of selected lactobacilli to increase  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) content in sourdough bread enriched with amaranth flour. *Foods* 2019; 8(6): 218. doi: 10.3390/foods8060218
  108. Lin Q, Li D, Qin H. Molecular cloning, expression, and immobilization of glutamate decarboxylase from *Lactobacillus fermentum* YS2. *Electronic Journal of Biotechnology* 2017; 27: 8–13. doi: 10.1016/j.ejbt.2017.03.002
  109. Nakatani Y, Fukaya T, Kishino S, Ogawa J. Production of GABA-enriched tomato juice by *Lactiplantibacillus plantarum* KB1253. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 2022; 134(5): 424–431. doi: 10.1016/j.jbiosc.2022.08.008
  110. Wang D, Wang Y, Lan H, et al. Enhanced production of  $\gamma$ -aminobutyric acid in litchi juice fermented by *Lactobacillus plantarum* HU-C2W. *Food Bioscience* 2021; 42: 101155. doi: 10.1016/j.fbio.2021.101155
  111. Verni M, Vekka A, Immonen M, et al. Biosynthesis of  $\gamma$ -aminobutyric acid by lactic acid bacteria in surplus bread and its use in bread making. *Journal of Applied Microbiology* 2022; 133(1): 76–90. doi: 10.1111/jam.15332
  112. Wan-Mohtar WAAQI, Sohedein MNA, Ibrahim MF, et al. Isolation, identification, and optimization of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA)-producing *Bacillus cereus* strain kbc from a commercial soy sauce moromi in submerged-liquid fermentation. *Processes* 2020; 8(6): 652. doi: 10.3390/pr8060652
  113. Sasagawa A, Naiki Y, Nagashima S, et al. Process for producing brown rice with increased accumulation of GABA using high-pressure treatment and properties of GABA-increased brown rice. *Journal of Applied Glycoscience* 2006; 53(1): 27–33. doi: 10.5458/jag.53.27
  114. Kim MY, Lee SH, Jang GY, et al. Influence of applied pressure on bioactive compounds of germinated rough rice (*Oryza sativa* L.). *Food and Bioprocess Technology* 2015; 8(10): 2176–2181. doi: 10.1007/s11947-015-1565-1
  115. Ueno S, Shigematsu T, Watanabe T, et al. Generation of free amino acids and gamma-aminobutyric acid in water-soaked soybean by high-hydrostatic pressure processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2010; 58(2): 1208–1213. doi: 10.1021/jf903102t
  116. Kinnersley AM, Turano FJ. Gamma aminobutyric acid (GABA) and plant responses to stress. *Critical Reviews in*

- Plant Sciences* 2000; 19(6): 479–509. doi: 10.1080/07352680091139277
117. Malone AS, Shellhammer TH, Courtney PD. Effects of high pressure on the viability, morphology, lysis, and cell wall hydrolase activity of *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*. *Applied Environmental Microbiology* 2002; 68(9): 4357–4363. doi: 10.1128/AEM.68.9.4357-4363.2002
  118. Oliveira SC, Figueiredo AB, Evtuguin DV, Saraiva JA. High pressure treatment as a tool for engineering of enzymatic reactions in cellulosic fibres. *Bioresource Technology* 2012; 107: 530–5304. doi: 10.1016/j.biortech.2011.12.093
  119. Ding J, Ulanov AV, Dong M, et al. Enhancement of gamma-aminobutyric acid (GABA) and other health-related metabolites in germinated red rice (*Oryza sativa* L.) by ultrasonication. *Ultrason Sonochem* 2018; 40: 791–797. doi: 10.1016/j.ultsonch.2017.08.029
  120. Yang H, Gao J, Yang A, Chen H. The ultrasound-treated soybean seeds improve edibility and nutritional quality of soybean sprouts. *Food Research International* 2015; 77: 704–710. doi: 10.1016/j.foodres.2015.01.011
  121. Sun Y, Ji D, Ma H, Chen X. Ultrasound accelerated  $\gamma$ -aminobutyric acid accumulation in coffee leaves through influencing the microstructure, enzyme activity, and metabolites. *Food Chemistry* 2022; 385: 132646. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.132646
  122. Zhang L, Li D, Yu M, Liu X. Optimization of pulsed light treatment on sterilization coupling  $\gamma$ -aminobutyric acid enrichment on germinated brown rice by double response values. *Food Research and Development* 2019; 40(19): 69–75.
  123. Wang B, Hui L, Liu H, et al. Effect of pulsed intense light on endogenous enzyme activity during brown rice germination (Chinese). *Science and Technology of Food Industry* 2014; 35(14): 118–122.
  124. Zhang L, Du L, Shi T, et al. Effects of pulsed light on germination and gamma-aminobutyric acid synthesis in brown rice. *Journal of Food Science* 2022; 87(4): 1601–1609. doi: 10.1111/1750-3841.16087
  125. Wang B, Jia C, Zhao S, et al. Effect of vacuum treatment on  $\gamma$ -aminobutyric acid content in germinated rice (Chinese). *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association* 2019, 34(4): 13–16.
  126. Jiang X, Zhang G, Zhang D. Study on process optimization of vacuum synergistic germination to enrich pea gamma-aminobutyric acid (Chinese). *Food Science and Technology* 2020; 45(5): 58–63.
  127. Zargarchi S, Saremnezhad S. Gamma-aminobutyric acid, phenolics and antioxidant capacity of germinated indica paddy rice as affected by low-pressure plasma treatment. *LWT* 2019; 102: 291–294. doi: 10.1016/j.lwt.2018.12.014
  128. Chen HH, Chang HC, Chen YK, et al. An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: Low-pressure plasma. *Food Chemistry* 2016; 191: 120–127. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.01.083
  129. Chen HH, Chen YK, Chang HC. Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice. *Food Chemistry* 2012; 135(1): 74–79. doi: 10.1016/j.foodchem.2012.04.092
  130. Shigematsu T, Murakami M, Nakajima K, et al. Bioconversion of glutamic acid to  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) in brown rice grains induced by high pressure treatment. *Japan Journal of Food Engineering* 2010; 11(4): 189–199.
  131. Yeap SK, Mohd Ali N, Mohd Yusof H, et al. Antihyperglycemic effects of fermented and nonfermented mung bean extracts on alloxan-induced-diabetic mice. *Journal of Biomedicine and Biotechnology* 2012; 2012: 285430. doi: 10.1155/2012/285430
  132. Chen L, Zhao H, Zhang C, et al.  $\gamma$ -aminobutyric acid-rich yogurt fermented by *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* fmb5 appars to have anti-diabetic effect on streptozotocin-induced diabetic mice. *Journal of Functional Foods* 2016; 20: 267–275. doi: 10.1016/j.jff.2015.10.030
  133. Shang W, Si X, Zhou Z, et al. Wheat bran with enriched gamma-aminobutyric acid attenuates glucose intolerance and hyperinsulinemia induced by a high-fat diet. *Food & Function* 2018; 9(5): 2820–2828. doi: 10.1039/c8fo00331a
  134. Chen G, Wang Y, Zhang M, et al. Cold atmospheric plasma treatment improves the  $\gamma$ -aminobutyric acid content of buckwheat seeds providing a new anti-hypertensive functional ingredient. *Food Chemistry* 2022; 388: 133064. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133064
  135. Nishimura M, Yoshida S, Haramoto M, et al. Effects of white rice containing enriched gamma-aminobutyric acid on blood pressure. *Journal of Traditional and Complementary Medicine* 2015; 6(1): 66–71. doi: 10.1016/j.jtcme.2014.11.022
  136. Li W, Wei M, Wu J, et al. Novel fermented chickpea milk with enhanced level of  $\gamma$ -aminobutyric acid and neuroprotective effect on PC12 cells. *PeerJ* 2016; 4: e2292. doi: 10.7717/peerj.2292
  137. Hinton T, Jelinek HF, Viengkhou V, et al. Effect of GABA-fortified oolong tea on reducing stress in a university student cohort. *Frontiers in Nutrition* 2019; 6: 27. doi: 10.3389/fnut.2019.00027
  138. Daglia M, Di Lorenzo A, Nabavi SF, et al. Improvement of antioxidant defences and mood status by oral GABA tea administration in a mouse model of post-stroke depression. *Nutrients* 2017; 9(5): 446. doi: 10.3390/nu9050446
  139. Di Lorenzo A, Nabavi SF, Sureda A, et al. Antidepressive-like effects and antioxidant activity of green tea and GABA green tea in a mouse model of post-stroke depression. *Molecular Nutrition & Food Research* 2016; 60(3): 566–579. doi: 10.1002/mnfr.201500567

140. Byun JI, Shin YY, Chung SE, Shin WC. Safety and efficacy of gamma-aminobutyric acid from fermented rice germ in patients with insomnia symptoms: A randomized, double-blind trial. *Journal of Clinical Neurology* 2018; 14(3): 291–295. doi: 10.3988/jcn.2018.14.3.291
141. Park NH, Lee SJ, Mechesso AF, et al. Hepatoprotective effects of gamma-aminobutyric acid-enriched fermented *Hovenia dulcis* extract on ethanol-induced liver injury in mice. *BMC Complementary Medicine and Therapies* 2020; 20(1): 75. doi: 10.1186/s12906-020-2866-0
142. Cataldo PG, Villena J, Elean M, et al. Immunomodulatory properties of a  $\gamma$ -aminobutyric acid-enriched strawberry juice produced by *Levilactobacillus brevis* CRL 2013. *Frontiers in Microbiology* 2020; 11: 610016. doi: 10.3389/fmicb.2020.610016
143. Scandolera A, Hubert J, Humeau A, et al. GABA and GABA-alanine from the red microalgae *rhodorus marinus* exhibit a significant neuro-soothing activity through inhibition of neuro-inflammation mediators and positive regulation of TRPV1-related skin sensitization. *Marine Drugs* 2018; 16(3): 96. doi: 10.3390/md16030096

---

**Research Article****Bioenrichment technology of  $\gamma$ -aminobutyric acid****Yun Li, Lei Zhao, Kai Wang, Zhuoyan Hu, Xuwei Liu\****Guangdong Provincial Key Laboratory of Food Quality and Safety, College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China***\* Corresponding author:** Xuwei Liu, xuwei.liu@scau.edu.cn

---

**Abstract:**  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA), a non-protein amino acid, plays an important role in the human nervous system. GABA has revealed numerous physiological benefits in the medical and pharmaceutical fields in humans. It is regarded as an edible alternative treatment for the prevention and treatment of many diseases. As a result, GABA-rich functional foods are highly favored by consumers. Therefore, in order to meet the demand for healthy food, the use of effective and safe enrichment methods to increase the content of GABA in food has received much attention. The content of GABA in natural foods, bioenrichment techniques, and the health benefits of GABA-rich foods are discussed. In addition, this paper also discusses the shortcomings and future challenges of GABA bioconcentration technology, in order to provide a new idea for the investigation of GABA enrichment technology.

**Keywords:** GABA; nutrition; processing; bioactive compound; functional food

---