

徐开媛, 王默涵, 郑晓阳, 等. 环境胁迫与发芽协同调控植物内源性 γ -氨基丁酸富集的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 361–370. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120292

XU Kaiyuan, WANG Mohan, ZHENG Xiaoyang, et al. Research Progress on Synergistic Regulation of Endogenous Gamma-aminobutyric Acid Enrichment in Plants by Environmental Stress and Germination[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 361–370. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120292

· 专题综述 ·

环境胁迫与发芽协同调控植物内源性 γ -氨基丁酸富集的研究进展

徐开媛¹, 王默涵², 郑晓阳², 李思楠¹, 王 佳¹, 张智慧¹, 徐炳政³, 柳 嘉², 王 颖^{1,4,*}, 张 璐^{2,*}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;

2. 中国食品发酵工业研究院有限公司, 功能主食创制与慢病营养干预北京市重点实验室, 北京 100015;

3. 青岛琅琊台集团股份有限公司, 山东青岛 266403;

4. 国家杂粮工程技术中心, 黑龙江大庆 163319)

摘要: γ -氨基丁酸 (γ -aminobutyric acid, GABA) 作为一种新型功能因子, 具有调节血压、缓解抑郁、治疗癫痫、延缓衰老和治疗糖尿病等功能, 广泛分布在植物体内。研究证明植物发芽是可以提高内源性 GABA 含量的有效方式, 结合不同的环境胁迫方式可以进一步促进发芽植物中 GABA 累积。本文主要阐述了植物富集 GABA 的代谢途径和影响因素, 以及环境胁迫与发芽协同对植物内源性 GABA 富集的协同效应, 以为富含 GABA 植物基食品的开发与应用提供参考。

关键词: γ -氨基丁酸, 植物发芽, 环境胁迫, GABA 富集, 协同效应

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)22-0361-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120292

本文网刊:



Research Progress on Synergistic Regulation of Endogenous Gamma-aminobutyric Acid Enrichment in Plants by Environmental Stress and Germination

XU Kaiyuan¹, WANG Mohan², ZHENG Xiaoyang², LI Sinan¹, WANG Jia¹, ZHANG Zhihui¹, XU Bingzheng³, LIU Jia², WANG Ying^{1,4,*}, ZHANG Lu^{2,*}

(1. College of Food, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. China National Research Institute of Food & Fermentation Industries Co., Ltd., Beijing Key Laboratory of the Innovative Development of Functional Staple and the Nutritional Intervention for Chronic Disease, Beijing 100015, China;

3. Qingdao Langyatai Co., Ltd., Qingdao 266403, China;

4. National Coarse Cereals Engineering Center, Daqing 163319, China)

Abstract: As a novel functional component, γ -aminobutyric acid (GABA) with many kinds of functions of regulating blood pressure, alleviating depression, treating epilepsy, delaying aging and treating diabetes, is widely distributed in a large variety of plants. It is reported that plant germination was recognized as an effective way to raise endogenous GABA levels, which in combination with several environmental stress modes could further promote GABA enrichment in germinating plants. This paper mainly discusses the metabolic pathways and influence factors of GABA enrichment in plants, as well as the synergistic effects of environmental stress and germination on endogenous GABA enrichment in plants, providing

收稿日期: 2023-12-27

作者简介: 徐开媛 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: xky000510@163.com。

* 通信作者: 王颖 (1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程及食品质量安全, E-mail: wychen156@163.com。

张璐 (1987-), 女, 博士, 高级工程师, 功能食品开发与精准营养及功效评价, E-mail: zhanglu8078@126.com。

references for the development and application of GABA-rich plant-based foods.

Key words: γ -aminobutyric acid; plant germination; environmental stress; GABA enrichment; synergistic effect

γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)化学式为 $C_4H_9NO_2$, 结构式见图 1, 是一种自由态非蛋白质氨基酸^[1], 属于次级代谢产物, 也是细胞内一种信号分子。1883 年 GABA 被首次合成, 并于 1949 年在马铃薯中首次发现^[2], 随后研究表明, GABA 主要存在于植物的胚芽中, 具有调节碳氮间平衡、抵御逆境胁迫和维持 pH 平衡等功能。1950 年, 研究发现 GABA 还存在于哺乳动物的神经系统中, 同时后续研究表明在哺乳动物的神经细胞中 GABA 是重要的抑制性神经递质^[3], 具有缓解焦虑、加快伤口愈合、调节内分泌和防止动脉硬化等功效^[4-5]。

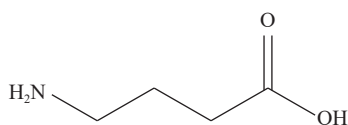


图 1 GABA 化学结构式

Fig.1 Chemical structure formula of GABA

虽然 GABA 具有良好的生理功能, 但人体内 GABA 含量较低, 需要从外界食物中获得以满足机体需求^[6]。2009 年我国将 GABA 认定为新食品原料^[7], 并允许在饮料、可可制品和巧克力等食品中添加(除婴儿食品外), 添加量不能超过 500 mg/d。因此, 通过日常膳食结构的优化来补充 GABA 有助于人体健康, 而如何提高食物中 GABA 含量以开发富含 GABA 的功能食品也逐步受到广泛关注。目前, 我国关于 GABA 食品大多以糙米、大豆、玉米和燕麦等粮食作物为原料, 通过 GABA 富集方式研制功能性食品和饮料。发芽是指植物种子吸水涨破后, 籽粒膨胀、软化, 呼吸和代谢作用增强, 根芽生长的过程^[8], 在发芽过程中植物籽粒中 GABA 等营养物质快速富集, 同时, 当受到外界环境刺激, 如低温、低氧、超声等非生物胁迫时, 植物会通过一系列生理代谢调节适应胁迫环境, 该过程也会促进 GABA 等营养物质富集^[9]。

本文将从 GABA 的制备、代谢途径、影响因素以及环境胁迫对植物发芽富集内源性 GABA 的协同效应进行分析总结, 旨在为富含 GABA 的功能性食品开发与研究提供理论依据。

1 GABA 的制备

目前, GABA 的制备方法主要有化学合成法、植物富集法和微生物发酵(表 1)。

1.1 化学合成法

化学合成法主要有四种方法, 分别为 γ -氯丁腈法、 α -吡咯烷酮开环法、丁酸和氨水法以及 γ -丁内酯和亚硫酸氯法。其中, γ -氯丁腈具有成本低廉的特点, 但由于工艺条件过于复杂, 且易存在化学物质残留被限制推广使用。 α -吡咯烷酮开环法具有温和、安全的特点, 但所得产物并非天然产物, 故而不能用于食品添加。 γ -丁内酯和亚硫酸氯法虽然具有产率高的优势, 但生产成本过高且有化学残留^[13], 目前该方法主要应用在化工和医药领域, 暂未在食品领域应用。

1.2 微生物发酵法

微生物发酵法早期以大肠杆菌为主要菌种, 但因大肠杆菌在食品开发上仍存在安全问题, 现在大多选择使用安全、有益的酵母菌和乳酸菌等菌种进行 GABA 的富集。夏亚男等^[14]对高产 GABA 的菌株进行筛选, 发现存在 3 株高产 GABA 菌株 SMN10-3、SMN12-7、SMN15-6。邢宏博等^[15]采用红曲霉固态发酵的方式对生产 GABA 的发酵工艺条件进行优化研究发现, 在加水量 30 mL、接种量 25%、培养温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 、发酵培养 8 d 条件下, GABA 含量为 655 mg/100 g, 为优化前的 1.90 倍。另外, 有研究者对发酵培养基 pH、组成成分^[16]等培养条件进行优化, 说明微生物发酵法富集 GABA 受多种条件影响。

1.3 植物富集法

植物在受到外界环境刺激时会引起 GABA 的富集。郭芳^[17]对燕麦进行发芽处理, 发现在 25 $^{\circ}\text{C}$ 浸泡 8 h、发芽 16 h 时, GABA 含量为 253.55 mg/100 g, 为原料的 12.34 倍。童晓萌等^[18]研究发现在 20 $^{\circ}\text{C}$ 浸泡 8 h、发芽 98 h 时, 苦荞籽粒的 GABA 含量为 286 mg/100 g, 为原料的 1.17 倍。王淑芳等^[19]发现发芽大豆在培养液 pH5.0、发芽温度 30 $^{\circ}\text{C}$ 、低氧胁迫 48 h 条件下, GABA 含量可达到 197 mg/100 g, 为原料的 1.56 倍。研究发现不同胁迫方式对植物富集 GABA 效果有较大差异, 本文将着重对不

表 1 GABA 的制备

Table 1 Preparation of GABA

方法	定义	特点
化学合成法	化学合成法是利用化学物质反应合成 GABA。	该方法具有反应迅速、得率高的优势, 但由于该方法反应过于剧烈, 有化学物质残留且成本较高 ^[10] 。
微生物发酵法	微生物发酵法是利用菌种对底物物质进行发酵产生 GABA。	该方法具有成本低、转化率高等优点 ^[11] 。
植物富集法	植物富集法是利用植物组织细胞在受到外界刺激时产生的应激代谢来富集 GABA。	该方法具有安全、环保等特点, 可以大大提高食品原料营养价值 ^[12] 。

同胁迫方式对植物发芽过程中内源性 GABA 富集的影响效果进行探究。

2 植物富集 GABA 的代谢途径及其影响因素

GABA 在植物体内的代谢途径主要包括 GABA 支路和多胺降解途径。其中 GABA 支路为主要代谢途径, 对 GABA 支路的贡献率可达 70% 左右, 而多胺降解途径在植物体内的贡献率为 30% 左右^[6]。在 GABA 支路中, 植物 GAD 活性主要表现在 pH 依赖性和 Ca^{2+} 依赖性两种调节水平^[20], 通过调节 GAD 活性来影响 GABA 的富集。另外还可通过添加 GABA 支路和多胺降解途径相关底物物质来提高 GABA 的富集效果。

2.1 GABA 的代谢途径

2.1.1 GABA 支路 在植物体内, GABA 支路(图 2)^[21]是指 L-Glu 在谷氨酸脱羧酶(Glutamate decarboxylase, GAD)催化下生成的 GABA 从细胞质转到线粒体后, 在 GABA 转氨酶(GABA transaminase, GABA-T)催化下生成琥珀酸半醛(Succinic acid, SSA), 再经琥珀酸半醛脱氢酶(Succinic semialdehyde dehydrogenase, SSADH)的催化作用转化为琥珀酸进入三羧酸循环的代谢过程^[22-24]。其中, L-Glu 能够参与碳氮平衡的协调, 连接 GABA 支路和 TCA 循环, 为 GABA 合成提供碳骨架和 α -氨基, L-Glu 的合成主要依赖谷氨酸合成酶(Glutamate synthetase, GOGAT)和谷氨酸脱氢酶(Glutamate dehydrogenase, GDH)的催化作用, 其在 GABA 代谢途径

中起重要作用^[25]。GABA 支路对细胞质内 pH 的调节、氧化应激保护、信号传导、氮代谢和渗透调节等生理反应均有影响^[26]。

2.1.2 多胺降解途径 多胺(Polyamines, PAs)是一种多聚阳离子, 主要分布在植物的细胞壁以及液泡内, 在植物中多以游离、不溶性束缚和可溶性结合三种形态存在。多胺降解途径合成 GABA 的限速酶为由相同亚基构成的二聚体二胺氧化酶(Diamine oxidase, DAO)和单体酶多胺氧化酶(Polyamine oxidase, PAO)。如图 2 所示^[21], 精胺(Spermine, Spm)在 PAO 催化作用下生成 1,3-二氨基丙烷和 1-(3-氨基丙基)-2-吡哆啉, 亚精胺(Spermidine, Spd)在 PAO 催化下生成 4-氨基丁醛和 1,3-二氨基丙烷, 腐胺(Putrescine, Put)在 DAO 催化下生成 4-氨基丁醛, 三种多胺物质生成的 4-氨基丁醛后经氨基醛脱氢酶(Aminoaldehyde dehydrogenase, AMADH)催化产生 GABA。

2.2 植物内源性 GABA 富集的影响因素

2.2.1 环境 pH 植物体内 GAD 活性最适 pH 在 5.5~6.0 左右^[27], 植物在受到机械损伤、低氧胁迫和酸处理等情况时, 胞质内 H^+ 浓度增加, 胞质发生酸化, GAD 被激活, GABA 含量提高。同时, GABA 在合成过程中会消耗一定量的 H^+ , 引起胞内 pH 的增加(图 3)^[28]。李楠等^[29]研究发现玉米胚中 GAD 的最适 pH 为 5.7, 在 pH4.5~7.5 时 GAD 酶活可维持在 80% 以上。魏彤^[30]发现绿豆 GAD1 和 GAD2

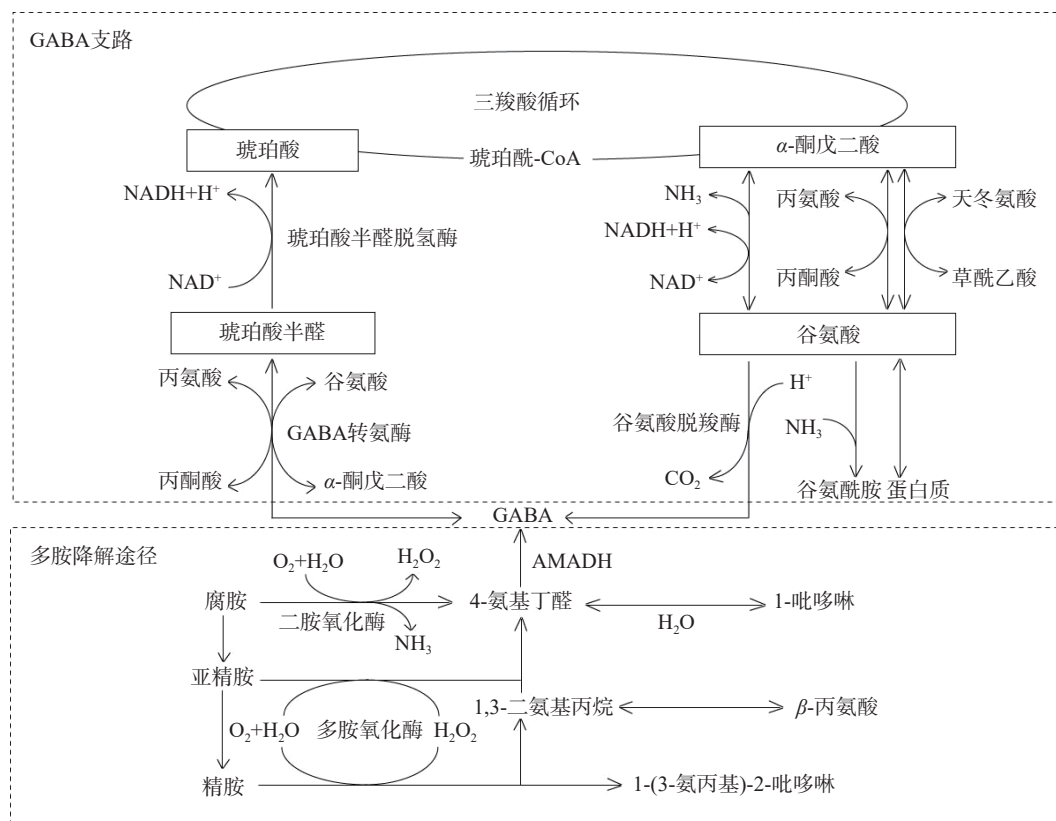


图 2 GABA 代谢途径

Fig.2 Metabolic pathway of GABA

在强酸和中性环境中稳定性较差,在弱酸环境中稳定性较高。张晖等^[31]发现在 pH 为 8.0 的微碱性环境下,米胚 GAD 蛋白的微环境构象和酶活无明显变化,但在 pH 为 3.0 的酸性环境中,酶蛋白构象发生改变并导致 GAD 失活,说明在适宜的 pH 环境有利于 GAD 活性表达。

2.2.2 Ca^{2+} 浓度 植物 GAD 是一种钙调素协调蛋白(Calmodulin, CaM),可以与 Ca^{2+} 结合形成 Ca^{2+} /CaM 复合物^[32]。GAD 氨基酸 C 末端的 22~25 个氨基酸残基组成的空间结构起到保证植物 GAD 与 Ca^{2+} /CaM 结合的作用,能够激发 GAD 活性并提高 GABA 含量(图 3)^[28],但 Ca^{2+} 和 CaM 独立存在时并不能激发 GAD 活性,必须是二者的复合物才能激发 GAD 活性^[33]。植物在受到如低温、高温、机械损伤等外界刺激时,会引起细胞质内 Ca^{2+} 浓度的增加,进而提高 GABA 含量。程建军等^[34]研究发现发芽小米在 CaCl_2 浓度 3.5 mmol/L、浸泡温度 35 ℃、浸泡时间 13 h、发芽时间 48 h、发芽温度 31 ℃ 条件下, GABA 含量为 251.46 mg/100 g,为原料的 2.90 倍。

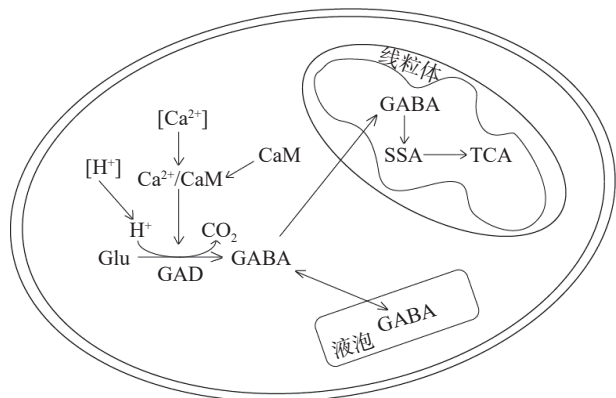


图 3 H^+ 和 Ca^{2+} 浓度对 GABA 富集的影响
Fig.3 Effects of H^+ and Ca^{2+} concentrations on GABA enrichment

2.2.3 底物水平提高 在植物富集 GABA 的代谢途径中, GABA 支路虽仍占据主要地位,除胁迫方式外,目前大多采用添加 GABA 支路相关底物来促进 GABA 的累积(表 2),但多胺降解途径对 GABA 的富集仍有一定的贡献率。Spd 为植物体内多胺降解途径的前体物质之一,在 PAO 催化下可以生成氨

基丁醛进而生成 GABA^[35]。DAO 对二胺类物质具有底物专一性,对 Put 有催化作用,当添加外源 Put 时,底物增加可以促进 DAO 的催化作用,提高 GABA 含量^[36]。何根生等^[37]研究发现 0.5 mmol/L 的 Put 可以提高发芽豇豆胚芽和子叶 PAO 活性,但当 Put 浓度过高时会抑制 PAO 活性。在 GABA 支路中, L-Glu 是 GAD 唯一底物,外源添加 L-Glu 可以促进 GABA 的累积^[38]。GAD 以磷酸吡哆醛(Pyridoxal-5-phosphate, PLP)为辅酶专一性催化 L-Glu 脱羧,导致 GABA 累积,同时维生素 B_6 因其与 PLP 具有相似的结构,是 PLP 的前体物质,故而亦可作为底物物质外源添加来富集 GABA^[39]。

3 环境胁迫对植物发芽富集 GABA 的影响及其作用机制

常见的胁迫方式包括超声胁迫、低温胁迫、低氧胁迫、盐胁迫、微酸性处理水以及高静水压技术等。不同环境胁迫方式对 GABA 富集效果不同,其富集机理也有所不同。

3.1 超声胁迫

超声是一种频率高于 20 kHz 的机械声波^[47],可以通过改变植物种子内部 GAD 酶的构象变化来改变酶的活性,从而加速酶的催化速率,同时能够增加细胞膜的通透性,提高胞内 Ca^{2+} 和 H^+ 浓度,激活 GAD 活性,提高 GABA 含量^[48-49]。张伟等^[50]发现糙米在 30 kHz 频率下超声 15 min,发芽 16 h 时, GABA 含量为 85.36 mg/100 g,为原料的 2.7 倍。Ding 等^[51]对燕麦进行超声协同发芽处理 72 h 后, GABA 含量为原料的 32.7 倍,为仅发芽处理燕麦的 1.12 倍,进一步代谢产物分析表明,超声波胁迫可能通过影响细胞质 Ca^{2+} 水平和 GAD 结构来提高 GAD 活性。Ding 等^[52]在红米萌发 72 h 后对其进行超声处理,通过代谢组学分析发现 GABA 含量显著提高。单迪^[53]研究发现在超声功率 225 W、超声时间 28 min、超声温度 38 ℃ 条件下,发芽粟米 GABA 含量为 389 mg/100 g,为仅发芽粟米的 1.83 倍。超声是采用水为介质进行的非接触式胁迫处理,具有耗时短、耗能低、产热少、可操作性强和无需生物或化学试剂等优点,但目前使用该胁迫方式进行 GABA 富集的相关研究较少^[54]。

表 2 底物对植物发芽 GABA 含量影响

Table 2 Effects of different substrates on GABA enrichment during plant germination

相关代谢合成途径	原料	底物物质	GABA 含量
GABA 支路	大豆 ^[40]	Spd	117.1 mg/100 g, 为原料的 2.26 倍
	大豆 ^[41]	NaCl、Spd	161 mg/100 g, 为原料的 1.97 倍
	大豆 ^[42]	NaCl、 CaCl_2 、PLP、MSG	269.93 mg/100 g, 为原料的 10 倍
	蚕豆 ^[43]	CaCl_2 、 VB_6 、MSG	198 mg/100 g, 为原料的 1.83 倍
多胺降解途径	豇豆 ^[44]	VB_6	96.66 mg/100 g, 为原料的 1.5 倍
	绿豆 ^[45]	Glu	0.467 mg/mL, 为原料的 1.145 倍
	南瓜籽 ^[46]	CaCl_2 、 VB_6 、MSG	36.1 mg/100 g, 为原料的 5.18 倍

3.2 低温胁迫

植物种子萌发过程中,低温胁迫是一种重要的胁迫方式^[55]。低温胁迫分为冻害和冷害处理,冻害指 0℃ 下产生的损害,会使植物的细胞结构破坏,回温后受害部位无法恢复,冷害的温度则在 0℃ 以上,一般不会严重破坏植物细胞结构,只对其生长发育产生影响,回温后可通过救治使其恢复生命活动^[56]。不同程度的低温胁迫会破坏植物细胞结构,增加 H^+ 浓度,激发 GAD 活性,同时抑制 GABA-T 的活性,达到富集 GABA 的目的。低温处理通过破坏细胞膜完整性提高胞质内 Ca^{2+} 浓度^[57],形成 Ca^{2+}/CaM 复合体,激发 GAD 活性,诱导 GABA 的累积。Yang 等^[58]研究发现在缺氧处理后,将发芽大豆在 -18℃ 冷冻 12 h 后,置于 25℃ 解冻 6 h 可使 GABA 发生累积,GABA 含量为非冻融处理的 7.21 倍。孙威等^[59]研究发现在冷冻胁迫 2 h、浸泡 6 h、培养 24 h 时,发芽小麦中 GABA 含量为 139.83 mg/100 g,比未发芽和发芽的小麦高出 93.5% 和 29.3%。尹永琪等^[60]将经低氧处理的发芽玉米进行低温处理,发现在 -18℃ 冷冻 8 h 后解冻 4 h 时 GABA 含量最高,推测解冻期是 GABA 累积的主要阶段,可能是因为冷冻使胞内的冰晶结构对细胞膜造成破坏,解冻时冰晶消失细胞液恢复成流动状态使 Ca^{2+} 和 H^+ 进入胞质。Yu 等^[61]对冷胁迫协同发芽处理黑米的工艺条件进行优化,发现在 0℃ 处理 1 h、萌发 72 h 时,GABA 含量为 195.64 mg/100 g,比发芽黑米 GABA 含量高 51.54%,该过程中 Ca^{2+} 浓度增加导致 GAD 活性提高,而 AMADH 活性降低,使 GABA 得到累积。在低温条件下,发芽植物体内 GABA 大量累积,但不同植物对低温的耐受性存在差异,同时低温处理的温度、时间等因素均会对 GABA 含量产生较大影响,故而对于不同的植物原料的低温处理条件需重新进行探究。

3.3 低氧胁迫

植物在低氧胁迫环境下,体内电子传递链受到抑制,糖类物质易经过糖酵解途径产生丙酮酸,进而分解生成乙醇和乳酸,使胞质内 pH 升高,GAD 在酸性环境中被激活,催化 L-Glu 进行脱羧反应生成 GABA^[62-63]。另外,低氧胁迫能够抑制植物种子有氧呼吸作用,使 GABA-T 活性被抑制,促进 GABA 的累积^[64]。丁俊青等^[65]采用不同气体对发芽糙米进行厌氧胁迫,发现糙米在发芽 66 h 后持续通入 6 h CO_2 时,GABA 含量为 965.44 mg/g,为原料的 1.91 倍,同时发现 CO_2 的 GABA 富集效果优于 N_2 ,可能是因为 CO_2 溶于水引起 pH 的降低或 CO_2 参与发芽过程中的碳代谢活动。为了提高 GABA 含量,目前许多研究利用低氧胁迫协同其他胁迫的方式富集 GABA。周新勇等^[66]通过对发芽大麦进行低氧联合酸胁迫发现在柠檬酸缓冲液 pH4.0、通氧量为 4.5 L/min、发芽 111 h 时,GABA 含量可达到

0.335 mg/g,与原料比提高了 33.6 倍。朱云辉等^[67]在低氧胁迫时添加 10 mmol/L NaCl 进行盐胁迫,GABA 含量为仅低氧胁迫的 1.1 倍。综上所述,低氧胁迫能够使植物 GABA 富集,具有成本低,操作简单等特点,但对不同的植物原料 GABA 富集效果有较大差异。

3.4 盐胁迫

盐胁迫会导致植物的生理性干旱,此时细胞需从细胞膜外吸收大量离子,其中 Ca^{2+} 与 CaM 结合,激发 GAD 活性,同时植物体内的 PAO、DAO 和 AMADH 活性也会随之增加,说明盐胁迫条件下植物体内两条代谢途径均有参与^[68]。Al-Quraan 等^[69]利用 qRT-PCR 技术研究发现,盐胁迫处理小麦萌发后 GABA 累积和 GAD 表达均显著提高,表明在盐和渗透胁迫下 GAD 均被激活。陈春旭等^[70]将糙米置于 NaCl 培养液中进行发芽处理,发芽 3 d 后 GABA 含量为 121.714 mg/100 g、GAD 活性为 5.7845 U/g,分别为未胁迫处理的 1.12 和 1.24 倍,同时对蛋白组成分析发现,盐胁迫处理后大分子蛋白组分会降解成小分子组分,而醇溶蛋白在该胁迫过程中未被利用。由于盐胁迫对植物生长有抑制作用,所以在进行盐胁迫处理时,大多选择加入外源添加物来缓解这一现象。郭元新等^[8]发现,单纯低氧胁迫与低氧联合盐胁迫相比,GAD 和 DAO 活性均提高,说明该种联合胁迫方式对两条代谢途径均有提高作用。盐胁迫是 GABA 富集的有效方式之一,但研究表明同一植物的不同器官感受盐胁迫的强度不同,GABA 含量存在差异^[71]。

3.5 微酸性电解水

微酸性电解水(SAEW)是在电解装置中电解稀盐或稀盐酸溶液生成的 pH5.0~6.5 的水溶液^[72],有效氯成分主要是次氯酸(HClO),作为杀菌剂在食品中广泛应用。微酸性电解水的瞬时杀菌效果良好,可迅速夺取细菌电子点位,短时间内快速杀死细菌^[73]。研究发现微酸性电解水对植物种子发芽具有诱导作用,可以促进植物体内营养物质的富集^[74]。Hao 等^[75]将荞麦放入 pH5.83,有效氯 20.3 mg/L 的微酸性电解水中浸泡后进行发芽,发现在发芽 6 d 时 GABA 含量达到最大值 143.20 mg/100 g,为原料的 14.3 倍,同时 GAD 活性显著提高。华建业等^[76]对发芽小米进行微酸性电解水处理,发现在有效氯浓度 24 mg/L、浸泡 10.5 h、温度 29℃、发芽时间 40.5 h 时,GABA 含量为 109.72 mg/100 g,为原料的 1.7 倍。Li 等^[77]研究发现在微酸性电解质水中加入 15 mg/mL 或 30 mg/mL 有效氯处理发芽粟谷,可促进 GABA 累积,较原料增加 21%。微酸性电解水作为一种新型非热杀菌技术,具有绿色经济、无毒无害和光谱抑菌性等优点,目前主要集中在食品杀菌、保鲜、营养物质富集等方面。

3.6 高静水压技术

高静水压技术(High hydrostatic pressure, HHP)是指在一个密闭容器中以水为压力传递介质对其中物料进行均衡压力的施加^[78]的技术。HPP 会破坏植物体内细胞结构,加速植物细胞内物质运输速度,可以通过酶促反应诱导 L-Glu 转化为 GABA。HHP 可以破坏该分子物质结构,引起大分子物质改性,但对小分子物质影响变小。在研究过程中可以通过改变温度、压力和时间等相关工艺参数来影响植物体内化学反应及酶反应速率。Kim 等^[79]研究发现将发芽与 HHP 处理结合可以显著促进生理代谢物质的生物合成,加快酶促反应速率,提高 GABA 和总阿拉伯木聚糖等功能性化合物含量,发芽 2 d 的糙米在 50 MPa 压强环境下继续发芽 24 h 后, GABA 含量为 111.4 mg/100 g,为原料的 1.76 倍。高静水压技术作为一种非热物理改性技术,对食品本身的营养成分损害较小,能够最大程度保持食品本身的色、香、味和营养成分,具有纯天然、绿色、无公害的优点,但目前高静水压技术的相关研究仍比较欠缺^[80]。

3.7 其他胁迫方式

除常见胁迫方式外,紫外光照^[81]、等离子体处理^[82]、高压灭菌^[82]、等方式也可起到富集 GABA 的目的。紫外线波长能通过破坏生物体内 DNA 物质导致细菌死亡从而起到杀菌作用。范军等^[83]研究发现将发芽 24 h 糙米置于距离紫外光线 25 cm 处,每隔 6 h 进行 3 min 紫外照射, GABA 含量可达到 55.7 mg/100 g,与未进行紫外处理的相比增加了 1.11 倍。冷等离子体(Cold Plasma, CP)是指在各类激发能激发作用下,能够提高气态分子、原子的动能,从低能态激发到高能态产生的等离子体,是一新型的非加热杀菌技术^[84]。Chen 等^[85]研究发现对发芽荞麦进行冷等离子体胁迫处理时, GABA 含量为 222 mg/100 g,为原料的 2.64 倍。脉冲强光处理后植物体内的 GAD 活性增加,可通过三羧酸循环来提高 GABA 含量^[86]。张良晨等^[87]研究发现发芽糙米在照射距离 9.0 cm、光照强度 450 J、照射次数 395 次时 GABA 含量可达到 170.10 mg/100 g,为原料的 3.7 倍。

4 结论和展望

GABA 作为一种具有缓解焦虑、促进睡眠、降低血糖等多种生理功能的新型功能因子,在我国食品科学基础研究及应用研究领域逐渐引起关注。现阶段对于 GABA 的研究大多集中在 GABA 生理功能机制研究以及食物原料富集 GABA 的多元化途径探究,多以评估盐胁迫、低氧胁迫、超声胁迫等常见的胁迫方式对 GABA 富集的影响,具有一定的局限性,缺乏对新型胁迫方式的探索研究以及不同胁迫方式作用机制的深度挖掘,同时,不同食物原料 GABA 富集效果的差异化机制还有待探讨。此外,市售产品所用食品原料单一,大多以发芽糙米或大豆为主,从口

感风味、营养组成、健康功效等方面存在局限性,故而在保证食品本身营养价值和安全品质的前提下,开发更多高含量 GABA 且营养均衡的健康产品是实现 GABA 产业发展的前提。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] WANG Y S, LIU C Q, MA T Y, et al. Physicochemical and functional properties of gamma-aminobutyric acid-treated soy proteins[J]. *Food Chemistry*, 2019, 295: 267-273.
- [2] 王雨清, 杨春会, 王雷, 等. 糙米发芽过程中 γ -氨基丁酸(GABA)富集工艺的研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(S1): 11-16. [WANG Y Q, YANG C H, WANG L, et al. Research progress of γ -aminobutyric acid (GABA) enrichment process in brown rice germination[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(S1): 11-16.]
- [3] KIM K, YOON H. Gamma-aminobutyric acid signaling in damage response, metabolism, and disease[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(5): 36902014.
- [4] 马嘉欣, 杜怀东, 刘海成, 等. 水稻籽粒中 γ -氨基丁酸的研究进展[J]. *杂交水稻*, 2022, 37(6): 6-14. [MA J X, DU H D, LIU H C, et al. Research progress of γ -aminobutyric acid in rice grains[J]. *Hybrid Rice*, 2022, 37(6): 6-14.]
- [5] HOUD Z, TANG J, FENG Q Q, et al. Gamma-aminobutyric acid (GABA): A comprehensive review of dietary sources, enrichment technologies, processing effects, health benefits, and its applications[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023: 21-23.
- [6] 李海峰, 李冰冰, 石硕硕, 等. γ -氨基丁酸在食品中的应用研究进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(1): 117-125. [LI H F, LI B B, SHI S S, et al. Research progress on the application of γ -aminobutyric acid in food[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 44(1): 117-125.]
- [7] 马燕, 段双梅, 赵明. 富含 γ -氨基丁酸食品的研究进展[J]. *氨基酸和生物资源*, 2016, 38(3): 1-6. [MA Y, DUAN S M, ZHAO M. Research progress of foods rich in gamma-aminobutyric acid[J]. *Amino Acids and Biotic Resources*, 2016, 38(3): 1-6.]
- [8] 郭元新. 盐和低氧胁迫下发芽大豆 γ -氨基丁酸富集与调控机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. [GUO Y X. Accumulation of γ -aminobutyric acid and its regulation mechanisms under NaCl and hypoxia stress in germinated soybean[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.]
- [9] 王婷婷, 刘嘉坤, 李岩. 发芽处理对蚕豆主要成分和 γ -氨基丁酸的影响[J]. *食品研究与开发*, 2017, 8(1): 6-9. [WANG T T, LIU J K, LI Y. Effects of germination on major components and GABA road bean[J]. *Food Research and Development*, 2017, 8(1): 6-9.]
- [10] 李伊昕. 基于米糠发酵的富 γ -氨基丁酸黄酒的制备及品质分析[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021. [LI Y X. Reproduction and quality analysis of γ -aminobutyric acid-rich rice wine based on rice bran fermentation[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021.]

- [11] 纪大乙. 超声胁迫咖啡叶 γ -氨基丁酸的积累及其机理初探[D]. 南京: 江苏大学, 2021. [JI D Y. Investigation into the accumulation of γ -aminobutyric acid in coffee leaves and the associated mechanism in response to ultrasound stress[D]. Nanjing: Jiangsu University, 2021.]
- [12] 林金新, 黄平, 蔡少丽. γ -氨基丁酸的应用及生产前景展望[J]. 化工设计通讯, 2021, 47(5): 136–137. [LIN J X, HUANG P, CAI S L. The application and production prospect of γ -aminobutyric acid[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2021, 47(5): 136–137.]
- [13] HELI Z, HONGYU C, DAPENG B, et al. Recent advances of gamma-aminobutyric acid: Physiological and immunity function, enrichment, and metabolic pathway[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1076223.
- [14] 夏亚男, 冯晨晨, 韩荣, 等. 高产 γ -氨基丁酸乳酸菌的筛选、鉴定及其益生特性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(2): 14–20. [XIA Y N, FENG C C, HAN R, et al. Screening, identification and prebiotic characteristics of high-yielding γ -aminobutyric acid lactic acid bacteria[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(2): 14–20.]
- [15] 邢宏博, 许贇荣, 倪冬蛟, 等. 响应面法优化红曲菌固态发酵产 γ -氨基丁酸的研究[J]. 饲料研究, 2021, 44(20): 64–69. [XING H B, XU G R, NI D J, et al. Response surface methodology in optimization of γ -aminobutyric acid fermentation conditions by *Monascus*[J]. Feed Research, 2021, 44(20): 64–69.]
- [16] 郭兴燃. 细胞融合选育高产 γ -氨基丁酸菌株关键技术及发酵培养基条件优化研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2022. [GUO X R. Study on the key technology of breeding high-yield GABA strain by cell fusion and optimization of fermentation medium conditions[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2022.]
- [17] 郭芳. 富含 γ -氨基丁酸燕麦发芽条件的优化[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(7): 35–38. [GUO F. Optimization of germination conditions of the oat rich in γ -aminobutyric acid[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(7): 35–38.]
- [18] 童晓萌, 柴春祥, 王永强. 萌发对苦荞籽粒品质的影响及工艺优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 176–183. [TONG X M, CAI C X, WANG Y Q. Effect of germination on grain quality of tartary buckwheat and optimization of technology[J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 176–183.]
- [19] 王淑芳, 杨润强, 顾振新. 低氧胁迫下大豆发芽富集 γ -氨基丁酸品种筛选及培养条件优化[J]. 食品科学, 2014, 35(21): 159–163. [WANG S F, YANG R Q, GU Z X. Cultivar selection and culture condition optimization for γ -amino butyric acid (GABA) accumulation in germinating soybean under hypoxia stress[J]. Food Science, 2014, 35(21): 159–163.]
- [20] GUT H, DOMINICI P, PILATI S, et al. A common structural basis for pH and calmodulin-mediated regulation in plant glutamate decarboxylase[J]. *Journal of Molecular Biology*, 2009, 392(2): 334–351.
- [21] 尹永祺. NaCl 及其联合 Ca^{2+} 变化与 GABA 富集调控机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2014. [YIN Y Q. Study on physiological change and the regulation mechanism of GABA accumulation in germinating soybean under NaCl and NaCl- Ca^{2+} treatment[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.]
- [22] SUN Y, MEHMOOD A, BATTINO M, et al. Enrichment of gamma-aminobutyric acid in foods: From conventional methods to innovative technologies[J]. *Food Research International*, 2022, 162 (Pt A): 111801.
- [23] 朱莉. 苏云金芽胞杆菌 γ -氨基丁酸代谢旁路相关基因簇的结构与功能研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007. [ZHU L. Structure and function of gene clusters related to gamma-aminobutyric acid metabolic bypass in *Bacillus thuringiensis*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.]
- [24] LI L, DOU N, ZHANG H, et al. The versatile GABA in plants[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2021, 16(3): 1862565.
- [25] 李文新, 王乐, 马燕, 等. 植物中 L-谷氨酸代谢与信号转导研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(14): 45–51. [LI W X, WANG L, MA Y, et al. Advances in L-glutamic acid metabolism and signal transduction in plants[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(14): 45–51.]
- [26] PODLESAKOVA K, UGENA L, SPICHAL L, et al. Phytohormones and polyamines regulate plant stress responses by altering GABA pathway[J]. *Nature Biotechnology*, 2019, 48: 53–65.
- [27] 孙磊, 王苑, 柏映国, 等. 谷氨酸脱羧酶结构及催化机制的研究概述[J]. 微生物学通报, 2020, 47(7): 2236–2244. [SUN L, WANG Y, BAI Y G, et al. Structure and catalytic mechanism of glutamate decarboxylase: A review[J]. 2020, 47(7): 2236–2244.]
- [28] 余南静. 大豆籽粒中 γ -氨基丁酸富集技术及其胚芽豆乳开发研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. [YU N J. Accumulation technology of γ -aminobutyric acid in soybean seed and development of soybean milk[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.]
- [29] 李楠, 王玲玲, 吴子健, 等. 玉米胚谷氨酸脱羧酶的性质[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(7): 34–38. [LI N, WANG L L, WU Z J, et al. Properties of glutamate decarboxylase in maize embryo[J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(7): 34–38.]
- [30] 魏彤. 绿豆中谷氨酸脱羧酶的性质及结构研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020. [WEI T. Master dissertation study on the properties and structure of glutamate decarboxylase in mung bean [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020.]
- [31] 张晖, 姚惠源. 稻米胚芽谷氨酸脱羧酶的光谱分析[J]. 分析化学, 2006(5): 647–650. [ZHANG H, YAO H Y. Spectral analysis of glutamate decarboxylase in rice germ[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2006(5): 647–650.]
- [32] MAZZUCOTELLI E, TARTARI A, CATTIVELLI L, et al. Metabolism of gamma-aminobutyric acid during cold acclimation and freezing and its relationship to frost tolerance in barley and wheat[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(14): 3755–3766.
- [33] SNEDDEN W A, ARAZI T, FROMM H, et al. Calcium/calmodulin activation of soybean glutamate decarboxylase[J]. *Plant Physiology*, 1995, 108(2): 543–549.
- [34] 程建军, 徐丽, 欧才智, 等. 优化催芽温度及 CaCl_2 溶液浓度提高发芽小米中 γ -氨基丁酸含量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 301–308. [CHENG J J, XU L, OU C Z, et al. The content of gamma-aminobutyric acid in germinated millet was increased by optimizing the germination temperature and CaCl_2 solution concentration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(3): 301–308.]
- [35] FANG W M, QI F, YIN Y Q, et al. Exogenous spermidine promotes gamma-aminobutyric acid accumulation and alleviates the negative effect of NaCl stress in germinating soybean (*Glycine max* L.)[J]. *Foods*, 2020, 9(3).
- [36] 周沫霖. 低温和二氧化碳胁迫下龙眼 γ -氨基丁酸富集与机

- 理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017. [ZHOU M L. Study on γ -aminobutyric acid (GABA) accumulation and regulation mechanism in longan (*Dimocarpus longan* Lour.) fruit in response to cold stress and CO₂ stress[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017.]
- [37] 何生根, 黄学林, 傅家瑞. 豇豆种子萌发过程中多胺氧化酶活性的变化及其影响因素[J]. 园艺学报, 2002(2): 153-157. [HE S G, HUANG X L, FU J R. Change of polyamine oxidase activity during cowpea seed germination and its influencing factors[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2002(2): 153-157.]
- [38] 吕秋洁. 富营养紫糙米发芽工艺及紫米花色苷抗氧化活性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2020. [LÜ Q J. Study on the processing technology of nutritious germinating purple brown rice and antioxidant activity of anthocyanins in purple rice[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020.]
- [39] 陈雅芝, 罗鑫, 姚芙蓉, 等. 发芽黑小麦富集 γ -氨基丁酸的培养组分优化[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 114-118. [CHEN Y Z, LUO X, YAO F R, et al. Optimization of medium composition for γ -aminobutyric acid accumulation in germinated black wheat[J]. The Food Industry, 2021, 42(6): 114-118.]
- [40] 何旭东, 徐佳宁, 方维明, 等. 亚精胺促进发芽大豆 γ -氨基丁酸富集的工艺研究[J]. 现代食品, 2021(20): 115-118. [HE X D, XU J N, FANG W M, et al. Study on the enrichment of γ -aminobutyric acid in germinated soybean by spermidine[J]. Modern Food, 2021(20): 115-118.]
- [41] 周新勇, 齐菲, 尹永祺, 等. NaCl 胁迫下外源亚精胺对发芽大豆生理生化及 γ -氨基丁酸代谢的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2020, 41(2): 107-112. [ZHOU X Y, QI F, YIN Y Q, et al. Exogenous spermidine regulating the main physiological and the GABA accumulation in germinating soybean under NaCl stress[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2020, 41(2): 107-112.]
- [42] 曾晴, 谢菲, 尹京苑, 等. 大豆发芽富集 γ -氨基丁酸的培养液组分优化及盐胁迫下的富集机理[J]. 食品科学, 2017, 38(12): 96-103. [ZENG Q, XIE F, YIN J Y, et al. Optimization of medium composition for γ -aminobutyric acid accumulation in germinated soybean and mechanism of γ -aminobutyric acid accumulation under salt[J]. Food Science, 2017, 38(12): 96-103.]
- [43] 陈惠, 杨润强, 韩永斌, 等. 发芽蚕豆富集 γ -氨基丁酸的培养液组分优化[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(11): 27-31. [CHEN H, YANG R Q, HAN Y B, et al. Optimization of culture solution compositions for γ -aminobutyric acid accumulation in germinated fab beans (*Vicia faba* L.)[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(11): 27-31.]
- [44] 申迎宾, 范子剑, 王显生, 等. 萌芽时间、温度以及不同浸泡液对萌芽豇豆 γ -氨基丁酸含量的影响[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(4): 10-15. [SHEN Y B, FAN Z J, WANG X S, et al. Effects of germination time, temperature and different soaking solution on gamma-aminobutyric acid content in budding cowpea[J]. Food and Fermentation Industries, 2009, 35(4): 10-15.]
- [45] 石磊, 刘超, 周柏玲, 等. 萌发条件对绿豆芽中 γ -氨基丁酸含量的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(3): 50-53. [SHI L, LIU C, ZHOU B L, et al. Effects of germination conditions on the content of γ -aminobutyric acid in mung bean sprouts[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(3): 50-53.]
- [46] 白青云, 陈敏嫣, 张化贤, 等. 南瓜籽发芽富集 γ -氨基丁酸的培养条件优化[J]. 中国果菜, 2019, 39(5): 36-41. [BAI Q Y, CHEN M Y, ZHANG H X, et al. Optimization of culture conditions for γ -aminobutyric acid accumulation by germination of pumpkin seed[J]. China Fruit & Vegetable, 2019, 39(5): 36-41.]
- [47] ZENG Z, CHEN J Y, LIU X L, et al. Ultrasonic treatment alleviated cadmium stress in sugarcane via improving antioxidant activity and physiological and biochemical status[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 263: 115381.
- [48] WU Y N, HE S D, PAN T G, et al. Enhancement of gamma-aminobutyric acid and relevant metabolites in brown glutinous rice (*Oryza sativa* L.) through salt stress and low-frequency ultrasound treatments at pre-germination stage[J]. *Food Chemistry*, 2023, 410: 135362.
- [49] NAUMENKO N, POTOROKO I, KALININA I. Stimulation of antioxidant activity and gamma-aminobutyric acid synthesis in germinated wheat grain *Triticum aestivum* L. by ultrasound: Increasing the nutritional value of the product[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 86: 106000.
- [50] 张祎, 赵婷婷, 赵炳涵, 等. 发芽糙米富集 GABA 的超声波处理条件优化[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(11): 34-39. [ZHANG W, ZHAO T T, ZHAO B H, et al. Optimization of ultrasonic treatment for enriching gaba in germinated brown rice[J]. *Food Research and Development*, 2016, 37(11): 34-39.]
- [51] DING J, JOHNSON J, CHU Y F, et al. Enhancement of gamma-aminobutyric acid, avenanthramides, and other health-promoting metabolites in germinating oats (*Avena sativa* L.) treated with and without power ultrasound[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283: 239-247.
- [52] DING J, ULANOV A V, DONG M, et al. Enhancement of gamma-aminobutyric acid (GABA) and other health-related metabolites in germinated red rice (*Oryza sativa* L.) by ultrasonication[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40(Pt A): 791-797.
- [53] 单迪. 超声处理对发芽粟米及其酸奶制品生理活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023. [SHAN D. Effect of ultrasonic treatment on physiological activity of germinated millet and its yogurt products[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.]
- [54] 丁俊胃. 低氧胁迫与超声场激发对发芽糙米中 γ -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. [DING J Z. Effects of hypoxic stress and ultrasonic stimulation on the t-aminobutyric acid (GABA) accumulation in germinating dehulled rice and metabolomic mechanism[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.]
- [55] 夏军. 低温对棉种萌发过程中贮藏物质转化的影响及激素调控[D]. 石河子: 石河子大学, 2020. [XIA J. Effects of low temperature on storage substance transformation during cotton seed germination and hormone regulation[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.]
- [56] 李明远. 瓜类蔬菜的冷害与冻害及其应对策略[J]. 蔬菜, 2021(1): 81-83. [LI M Y. Cold damage and freezing damage of melon vegetables and their coping strategies[J]. Vegetables, 2021(1): 81-83.]
- [57] YANG R Q, HUI Q R, FENG X Y, et al. The mechanism of freeze-thawing induced accumulation of gamma-aminobutyric acid in germinated soybean[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(3): 1099-1105.
- [58] YANG R Q, FENG L, WANG S F, et al. Accumulation of gamma-aminobutyric acid in soybean by hypoxia germination and

- freeze-thawing incubation[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(6): 2090–2096.
- [59] 孙威, 徐颖, 李芳, 等. 冷冻胁迫对小麦萌发过程中的 γ -氨基丁酸含量的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(10): 170–174. [SUN W, XU Y, LI F, et al. Effect of refrigeration on the content of γ -aminobutyric acid in wheat during germination[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(10): 170–174.]
- [60] 尹永祺, 吴进贤, 刘春泉, 等. 低氧与低温胁迫对发芽玉米籽粒中 γ -氨基丁酸富集的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(1): 89–93. [YIN Y Q, WU J X, LIU C Q, et al. Effects of hypoxia and cold stress on γ -aminobutyric acid accumulation in germinating maize[J]. *Food Science*, 2015, 36(1): 89–93.]
- [61] 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[J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1290.
- [62] GREENWAY H, GIBBS J. Review: Mechanisms of anoxia tolerance in plants. II. Energy requirements for maintenance and energy distribution to essential processes[J]. *Functional Plant Biology*, 2003, 30(10): 999–1036.
- [63] KAMJIJAM 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[J]. *Food Chemistry*, 2021, 365: 130399.
- [64] 白青云. 低氧胁迫和盐胁迫下发芽粟谷 γ -氨基丁酸富集机理及抗氧化性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009. [BAI Q Y. Studies on mechanism of γ -aminobutyric acid accumulation and antioxidant activity in germinated foxtail millet under hypoxia stress and salt stress[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.]
- [65] 丁俊胄, 杨特武, 周强, 等. 厌氧胁迫对发芽糙米中 γ -氨基丁酸含量变化的影响[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(2): 6–10. [DING J Z, YANG T W, ZHOU Q, et al. Effects of anaerobic stress on gamma-aminobutyric acid content in germinated brown rice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(2): 6–10.]
- [66] 周新勇, 陆燕婷, 尹永祺, 等. 低氧联合酸胁迫富集大麦芽中 γ -氨基丁酸工艺优化[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(6): 144–150. [ZHOU X Y, LU Y T, YIN Y Q, et al. Optimization of enrichment process of γ -aminobutyric acid in barley malt by hypoxia combined with acid stress[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(6): 144–150.]
- [67] 朱云辉, 郭元新, 杜传来, 等. 低氧联合 NaCl 胁迫下外源 Ca^{2+} 对发芽苦荞 γ -氨基丁酸富集的影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(1): 17–23. [ZHU Y H, GUO Y X, DU Z L, et al. Effects of exogenous Ca^{2+} on γ -aminobutyric acid enrichment in sprouted tartary buckwheat under hypoxia combined with NaCl stress[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(1): 17–23.]
- [68] XIE C, SUN M, WANG P, et al. Interaction of Gamma-Aminobutyric Acid and Ca^{2+} on Phenolic Compounds Bioaccumulation in Soybean Sprouts under NaCl Stress[J]. *Plants (Basel)*, 2022, 11(24): 3503.
- [69] AL-QURAAAN N A, SARTAWA F A, QARYOUTI M M. Characterization of gamma-aminobutyric acid metabolism and oxidative damage in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings under salt and osmotic stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2013, 170(11): 1003–1009.
- [70] 陈春旭, 王利勤, 郭元新, 等. 盐胁迫对发芽糙米富集 γ -氨基丁酸及蛋白组分变化的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 87–92. [CHEN C X, WANG L Q, GUO Y X, et al. Effect of salt stress on γ -aminobutyric acid accumulation and protein composition in germinated brown rice[J]. *Food Science*, 2018, 39(5): 87–92.]
- [71] 尹永祺. NaCl 及其联合 Ca^{2+} 处理下发芽大豆生理变化与 GABA 富集调控机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2014. [YIN Y Q. Study on the physiological change and the regulation mechanism of GABA accumulation in germinating soybean under NaCl and NaCl and NaCl-Ca^{2+} treatment[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.]
- [72] 聂梅梅, 吴海虹, 李大靖, 等. 超声联合微酸性电解水去除蔬菜农药残留效果分析[J]. *食品与发酵科技*, 2023, 59(4): 85–91. [NEI M M, WU H H, LI D J, et al. Effect of ultrasonic combined with acidic electrolyzed water on removing pesticide residues in vegetables[J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2023, 59(4): 85–91.]
- [73] 张建中, 王芳, 彭云, 等. 微酸性电解水性能及其在消毒领域的应用价值[J]. *广州化工*, 2021, 49(7): 130–133. [ZHANG J Z, WANG F, PENG Y, et al. Performance of slightly acidic electrolyzed water and application value in disinfection field[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2021, 49(7): 130–133.]
- [74] 赵梓帆. 微酸性电解水和光质对豌豆芽苗菜生长及品质的影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022. [ZHAO Z F. The effect of slightly acidic electrolyzed water and light quality on the growth and quality of pea sprouts[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022.]
- [75] 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[J]. *Food Chemistry*, 2016, 201: 87–93.
- [76] 华建业, 饶欢, 马淑红, 等. 微酸性电解水富集发芽小米中 γ -氨基丁酸的条件优化[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(10): 17–21. [HUA J Y, RAO H, MA S H, et al. Optimization of enrichment conditions of γ -aminobutyric acid in germinated millet by slightly acidic electrolyzed water[J]. *Cereals & Oils*, 2022, 35(10): 17–21.]
- [77] LI X, HAO J, LIU X, et al. Effect of the treatment by slightly acidic electrolyzed water on the accumulation of gamma-aminobutyric acid in germinated brown millet[J]. *Food Chemistry*, 2015, 186: 249–255.
- [78] 段梦雯, 吴雪娥, 车黎明, 等. 高静水压处理技术及其在食品工业应用的研究进展[J]. *中国调味品*, 2022, 47(5): 215–220. [DUAN M W, WU X E, CHE L M, et al. Research progress of high hydrostatic pressure treatment technology and its application in food industry[J]. *China Condiment*, 2022, 47(5): 215–220.]
- [79] KIM M Y, LEE S H, JANG G Y, et al. Effects of high hydrostatic pressure treatment on the enhancement of functional components of germinated rough rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2015, 166: 86–92.
- [80] HUANG H W, HSU C P, WANG C Y. Healthy expectations of high hydrostatic pressure treatment in food processing industry[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2020, 28(1): 1–13.
- [81] YAN L, ZHENG H, LIU W, et al. UV-C treatment enhances organic acids and GABA accumulation in tomato fruits during storage[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 128126.

- [82] LIU H, ZHANG X, CUI Z, et al. Cold plasma effects on the nutrients and microbiological quality of sprouts[J]. *Food Research International*, 2022, 159: 111655.
- [83] 范军, 刘源, 李娟, 等. 采用紫外线照射控制发芽糙米细菌总数研究[J]. *粮食与油脂*, 2012, 25(9): 20–22. [FAN J, LIU Y, LI J, et al. The effect of ultraviolet radiation on bacterial counts in germinated brown rice[J]. *Cereals & Oils*, 2012, 25(9): 20–22.]
- [84] HEYDARI M, CARBONE K, GERVASI F, et al. Cold plasma-assisted extraction of phytochemicals: A review[J]. *Foods*, 2023, 12(17): 3181.
- [85] CHEN G Y, WANG Y S, ZHANG M Y, et al. Cold atmospheric plasma treatment improves the gamma-aminobutyric acid content of buckwheat seeds providing a new anti-hypertensive functional ingredient[J]. *Food Chemistry*, 2022, 388: 133064.
- [86] 王勃, 马涛, 惠丽娟, 等. 脉冲强光对糙米发芽过程积累 GABA 条件的优化[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(22): 281–285. [WANG B, MA T, HUI L J, et al. Optimization of pulsed light on the accumulation of GABA conditions in the process of brown rice germination[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(22): 281–285.]
- [87] 张良晨, 李东红, 于森, 等. 双响应值联合优化发芽糙米脉冲强光杀菌耦合 γ -氨基丁酸富集技术研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(19): 69–75. [ZHANG L C, LI D H, YU M, et al. Optimization of pulsed light treatment on sterilization coupling γ -aminobutyric acid enrichment on germinated brown rice by double response value[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(19): 69–75.]