

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025341

引用格式: 宁亚维, 马梦戈, 杨正, 等. γ -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 γ -aminobutyric acid[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 238-247.

γ -氨基丁酸的制备方法及其功能食品研究进展

宁亚维¹, 马梦戈¹, 杨正¹, 侯琳琳¹, 赵忠情¹, 陈艺¹, 王志新¹, 贾英民^{2*}

1(河北科技大学 食品与生物学院, 河北 石家庄, 050018) 2(北京工商大学 食品与健康学院, 北京, 100048)

摘要 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)是一种天然的、四碳非蛋白氨基酸, 由于具有降血压、抗抑郁、抗焦虑、改善脑机能等多种生理功能而得到广泛关注。动植物体中天然存在的 GABA 含量较低导致生产成本较高, 因此需要开发 GABA 的高效生产方法。目前 GABA 制备方法以植物源富集法和微生物合成法为主。生产的 GABA 可用于开发富含 GABA 的粮食制品、乳制品和肉制品, 以满足人们日益增长的对健康饮食的需求。文章综述了 GABA 的合成机制、制备方法以及 GABA 功能性食品的研究现状, 旨在为 GABA 的富集及其功能性食品的开发提供理论参考。

关键词 γ -氨基丁酸; 生理功能; 植物源富集法; 微生物合成法; 功能性食品

Research progress in the enrichment process and functional foods of γ -aminobutyric acid

NING Yawei¹, MA Mengge¹, YANG Zheng¹, HOU Linlin¹, ZHAO Zhongqing¹, CHEN Yi¹, WANG Zhixin¹, JIA Yingmin^{2*}

1(College of Food Science and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

2(School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

ABSTRACT γ -aminobutyric acid (GABA), a natural four-carbon non-protein amino acids, has gained increasing attention due to the beneficial physiological functions, such as anti-hypertension, anti-depression, anti-anxiety, improving brain function. The natural content of GABA in plants and animals is low, leading to high production cost. Therefore, an efficient production method for GABA needs to be developed. The enrichment for GABA mainly includes plant enrichment and microbial synthesis. The enriched GABA can be used for the development of various food rich in GABA (such as grain products, dairy products, meat products) to meet people's requirement for healthy food. Therefore, the synthesis mechanism, enrichment technology of GABA, and the development status of GABA functional food were briefly introduced, aiming to provide theoretical reference for the enrichment of GABA and the development of functional food.

Key words γ -aminobutyric acid; physiological function; plant enrichment; microbial synthesis; functional food

γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA), 也称 γ -氨基酪酸, 分子式为 $C_4H_9NO_2$, 相对分子质量为 103.12, 由谷氨酸(glutamic acid, Glu)经谷氨酸脱羧酶(glutamic acid decarboxylase, GAD)催化而来。GA-

BA 作为一种抑制性神经递质在神经系统中发挥重要作用, 如与 GABA-A 受体结合可以扩张血管降低血压^[1]; 可以增加神经元细胞膜对 Cl^- 的通透性, 引起细胞超极化, 产生突触后抑制效应, 达到镇静神经的

第一作者: 博士, 副教授(贾英民教授为通讯作者, E-mail: jiayingmin@btbu.edu.cn)

基金项目: 河北省重点研发项目(20327125D); 河北省青年拔尖人才项目

收稿日期: 2020-08-12, 改回日期: 2020-09-10

效果。GABA 通过促进 GABA 神经递质的释放,增加 GABA 能神经元细胞数目,缓解因 GABA 神经元细胞减少导致的小鼠抑郁^[2]。此外,GABA 还可以调节 β -淀粉样蛋白相关的功能活性,缓和阿尔兹海默症^[3]。近来发现 GABA 还具有抑制肿瘤细胞增殖、改善脑血栓、降低 1 型糖尿病等功能^[4]。尽管 GABA 具有诸多功能性,但是人体内 GABA 含量会随着人的年龄以及外界环境压力的增加而日益减少,因此在日常饮食中补充 GABA 对改善人体健康具有重要意义。

食品中的 GABA 可通过食品原料富集和外源添加 2 种方式强化。食品原料富集是指对含有 GABA 的食用性植物原料通过胁迫处理增加其体内 GABA 合成量,即植物源富集法。外源添加分为微生物合成法和化学合成法。微生物合成法包括直接发酵生产法和全细胞转化法。化学合成法是以吡咯烷酮、丁内酯、氯化亚砷等为原料通过化学反应开环制得 GABA。但是由于化学法存在成本因素限制、副反应多及环境污染等局限性,因此目前主要通过绿色、安全的植物源富集法和微生物合成法制备 GABA。随着科技的发展,近来新兴非加热技术在植物源 GABA 富集方面也表现出较好的应用前景。本文简要概述了 GABA 的生物合成机制,对 GABA 制备方法及其功能性食品的开发现状进行了综述,并对其未来研究方向进行了展望。

1 植物源 GABA 合成机制及富集方法

GABA 广泛分布于小麦、大豆、发芽糙米等多种植物中,但含量较低。通常植物受到外界因素刺激时,机体启动自我防御机制,体内 GABA 水平增加,以利于植物适应外界环境变化,因此可以通过胁迫的方式提高植物原料中 GABA 的水平。

1.1 植物富集 GABA 的内在机制

高等植物中 GABA 的富集主要包括 2 条途径(如图 1 所示)^[5],第一条是植物体内 GAD 催化 L-谷氨酸生成 GABA,生成的 GABA 经 GABA 转氨酶(GABA transaminase, GABA-T)、琥珀酸半醛脱氢酶(succinate semialdehyde dehydrogenase, SSADH)催化生成进入 TCA 循环的琥珀酸半醛(succinate semialdehyde, SSA)、琥珀酸,这些反应和 GAD 催化反应一起构成 GABA 支路。其中,GAD、GABA-T 和 SSADH 是该途径重要的调控酶,激活 GAD 或抑制 GABA-T、SSADH 可提高 GABA 富集量。目前的研究多通过激

活 GAD 富集 GABA。第二条途径是由二胺氧化酶(diamine oxidase, DAO)和多胺氧化酶(polyamine oxidase, PAO)降解多胺中间产物(腐胺、亚精胺)生成,与第一条途径相比,该途径生成 GABA 较少,不是 GABA 富集生产的主要途径。

高等植物体在生长过程中通过合成 GABA 来抵御盐碱胁迫、缺氧、机械刺激等逆境环境。比如盐胁迫下植物体 GAD 活性提高,GABA 含量显著增加以适应胁迫。缺氧和机械刺激导致植物体胞内 H^+ 积累,胞内 pH 降低,激活 GAD 促进植物体 GABA 的合成;同时该 GABA 合成过程消耗了增加的质子,因此能够发挥稳定植物细胞内 pH 的作用。由此可见,在植物生长过程中逆境环境会胁迫体内合成 GABA。

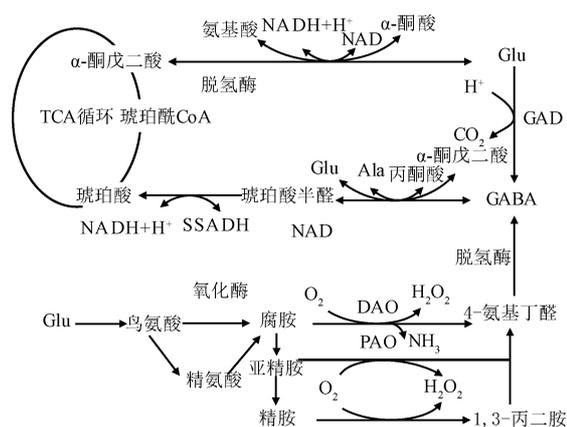


图 1 GABA 支路及多胺降解生成 GABA 途径

Fig. 1 The pathway of GABA formation by GABA branch and polyamine degradation

1.2 植物种子发芽胁迫法富集 GABA

植物体内的 GABA 本身含量较低,但经浸泡发芽处理后 GAD、蛋白酶等内源酶被激活,因此 GABA 得到富集。谷类种子如糙米、小麦、荞麦等,豆类中大豆、绿豆、蚕豆等都可用于发芽富集 GABA。适宜的温度、时间浸泡发芽处理可以激活种子中的蛋白酶促进蛋白质分解增加 Glu 含量,Glu 进一步由激活的 GAD 催化生成 GABA。SOMBOON 等^[6]在 35 °C 浸泡 3 h 籼稻糙米再使其发芽 21 h,GABA 含量达(44.89 ± 7.81) mg/100 g,是不发芽组的 15.5 倍。WANG 等^[7]发现,25 °C 浸泡 6 h 的小麦在发芽 12 h 时 GABA 增加了 50.7%。TRUONG 等^[8]测得 35 °C 浸泡 8 h 的绿豆发芽 12 h 后,GABA 含量约为 108 mg/100 g,显著高于原绿豆中 GABA 含量。XU 等^[9]在 25 °C 浸泡大豆 Jindou 25.5 h 后,于 19、25 和 32 °C 3 个不同温度下萌发 102 h,测其 GAD 活力均增加,其中以 32 °C 增

等^[17]以 200 MPa 的压力处理大豆,贮存 3 d 时测其 GABA 量是未经高压处理组的 1.35 倍。UENO 等^[18]发现,浸泡 15 h 的大豆在 200 MPa 处理 10 min 时 GABA 生成速率为 21 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{min})$,而在 300 MPa 处理相同时间时为 74 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{min})$,表明在 300 MPa 处理 10 min 的压力-时间组合下 GABA 产量更高。超声波可以通过降解发芽糙米细胞壁周围物质增加细胞内 Ca^{2+} 和 H^{+} 浓度有效激活 GAD^[19]。张祎等^[20]利用超声波处理发芽糙米富集 GABA 时发现,样品以 30 kHz 频率处理 15 min 时 GABA 积累量达到最大,而增加频率 GABA 含量下降,表明在相同时间处理情况下低频超声波处理对 GABA 的积累优于高频。DING 等^[21]以 25 kHz 的频率超声波处理 30 min 发芽小麦 GABA 含量增加了 30.69%。电解水作为一种胁迫处理不仅可以提高 GAD 的活性,在促进谷物发芽方面还可以发挥抑菌防霉作用,且制备方便成本低廉,因此在富集 GABA 方面受到关注。HAO 等^[22]发现微酸性电解水(有效氯含量 20.3 mg/L)可使得发芽荞麦中 GABA 的积累达到 143.20 mg/100 g。LIU 等^[23]也发现中等有效氯质量浓度为 17.76 mg/L 的强酸性电解水可使发芽糙米 GABA 富集量达到最大值 24.36 mg/100 g。低压等离子体技术也可以激活糙米中 GAD 活性,将糙米置于 3 kV 的低压等离子体中处理 10 min 后发芽 24 h, GABA 由初始的 7.5 mg/100 g 显著增加到 28 mg/100 g^[24]。可见,新技术在富集 GABA 方面也得到广泛应用。

2 微生物源 GABA 合成机制及生产工艺

微生物合成法包括发酵法和全细胞转化法,前者指微生物直接发酵基质中的 *L*-谷氨酸/钠盐生成 GABA,发酵液为成分复杂的多相体系,GABA 分离提纯难度较大。后者是指先发酵培养出含 GAD 的微生物,再分离出细胞作为催化剂催化 *L*-谷氨酸/钠盐生产 GABA,转化液成分简单,GABA 提纯简便、得率高。

2.1 生产 GABA 的微生物源及合成机制

生产 GABA 的菌株来源广泛且种类多样(表 2),其合成机制主要是通过微生物体内 GAD 催化 *L*-谷氨酸脱羧形成 GABA。而对于耐酸性细菌,其 GABA 合成还依靠于一种特有的 GAD 抗酸系统,该系统中存在负责 Glu 和 GABA 转运的 Glu-GABA (Glu-GABA antiporter) 蛋白,当细胞处于酸性环境中时,该蛋白可将 Glu 转运至细胞内消耗 H^{+} 合成 GABA^[30],由于

H^{+} 的消耗形成了质子电化学梯度,膜上质子泵 $\text{F}_0\text{F}_1\text{-ATPase}$ 将胞外 H^{+} 转至胞内并生成 ATP 为细胞生长提供能量。即耐酸性细菌在维持胞内外 pH 平衡过程中也会生成 GABA。

2.2 发酵法生产 GABA

2.2.1 乳酸菌发酵法

发酵法中以公认安全且具有多种益生功能的乳酸菌研究最多,其 GABA 的合成依赖于不同菌种、菌株及培养条件的差异,对于产 GABA 的菌株通过优化其培养条件可以提高 GABA 产量。RIBEIRO 等^[31]从奶酪中分离出植物乳杆菌、副干酪乳杆菌、肠系膜明串珠菌、乳酸乳球菌等多种产 GABA 的乳酸菌,在添加 30 mg/L 谷氨酸钠的 MRS 肉汤中 30 $^{\circ}\text{C}$ 培养 48 h 后,植物乳杆菌产 GABA 量最多(937 mg/L),分别是其他菌株的 1.6、19.1 和 15.1 倍。RAFFAELLA 等^[32]利用植物乳杆菌 DSM 19463 于添加 20 mmol/L 谷氨酸钠、1% 葡萄汁(质量分数)的 MRS 肉汤中 30 $^{\circ}\text{C}$ 发酵 72 h, GABA 生成量为 498.1 mg/L。LIM 等^[33]从泡菜中筛选出 1 株短乳杆菌 HYE1,在含质量分数 1% 谷氨酸的 MRS 培养基中 30 $^{\circ}\text{C}$ 培养 48 h 后得到 1 509.68 mg/L GABA,在 2.14% 麦芽糖、4.01% 胰蛋白酶、2.38% 谷氨酸(均为质量分数)、初始 pH 为 4.74 优化条件下同等温度、时间培养后 GABA 增加 28%。此外,混合乳酸菌发酵也能显著增加 GABA 的产量。KIM 等^[34]在含有 3% *L*-谷氨酸、10% 冷冻天麻粉(均为质量分数)的培养基中添加 0.5% 的短乳杆菌 GABA 100 与双歧杆菌 BGN4 菌液,30 $^{\circ}\text{C}$ 条件下联合发酵 6 d 后 GABA 产量为 1.26×10^4 mg/L,显著高于短乳杆菌 GABA 100 单独发酵时的产量。HAN 等^[35]选用 1 株产 GABA 的嗜热链球菌与鼠李糖乳杆菌 1:1(接种量皆为 10^6 CFU/mL)共接种于含有 15 g/L 谷氨酸钠和质量分数 10% 脱脂乳粉的培养基中 37 $^{\circ}\text{C}$ 发酵 48 h 后时产生的 GABA 质量浓度达 8 300 mg/L,是其单独培养时(2 800 mg/L)的 2.96 倍。总之,产 GABA 的乳酸菌以乳杆菌的报道最多,通过优化其工艺条件或与混合菌株共培养可有效提高发酵效率,但大部分菌种发酵产量较低,因此筛选高产 GABA 的协同发酵菌株或开发高效 GABA 发酵工艺尤为重要。

2.2.2 酵母菌发酵法

近来发现酵母菌具有大量氨基酸和较高的 GAD 酶活性,且安全性高,也被用来发酵生产 GABA。但酵母菌 GABA 合成效率低于乳酸菌,工业上较少单

独使用酵母菌发酵生产 GABA,而是通常将其与乳酸菌联用来增加 GABA 产量。如范媛媛等^[36]在添加 60 g/L 的 *L*-谷氨酸钠、50 g/L 葡萄糖发芽糙米培养基中接种体积分数 4% 的复合菌(短乳杆菌 L2: 卡斯酒香酵母 ZSM-001 体积比为 2:1),于 30 °C 培养 90 h 后将发酵液纯化浓缩,测得 GABA 含量达 3.33×10^4 mg/L,比单用卡斯酒香酵母 ZSM-001 菌发酵提高了 50.8%。ZHANG 等^[37]用植物乳杆菌 BC114 和酿酒酵母菌 SC125 共接种于 100 mL 含有 5 g/L *L*-谷氨酸的灭菌桑葚培养基中,在 30 °C 孵育 72 h 后得到 2 420 mg/L 的 GABA,是单独用酵母菌培养时的 2.35 倍。可见,将产 GABA 的酵母菌与乳酸菌协同发酵可提高 GABA 产率,且酵母菌安全性高,是复合菌种发酵法制备 GABA 的理想选择菌株。

2.2.3 霉菌发酵法

霉菌作为发酵工业中的重要菌也可用于发酵制备 GABA,但霉菌发酵时间长、效率低,单独用霉菌发酵制备 GABA 不仅耗时且产量低,而将其与乳酸菌共培养或通过优化发酵条件可以提高 GABA 产量。如边鑫等^[38]对 8 株霉菌培养至稳定期后进行接种发酵筛选高产 GABA 的霉菌菌株,观察到发酵 36 h 时黑曲霉 B 的 GABA 产量首先到达最大,为 346 mg/L,而米曲霉 3.800 发酵到 48 h 左右时才达到最大 GABA 值,也仅为 674 mg/L。刘志强等^[39]将红曲霉 SM048 和植物乳杆菌 Lac. 1 共同接种于 TYG 培养基中,在 pH 4~4.5、30 °C 的条件下进行分段发酵,GABA 产量为 520 mg/L,比红曲霉 SM048 单独发酵时提高了 147.62%。张庆庆等^[40]将红曲霉接种在添加 61.4% 干豆渣、38.6% 大米粉、0.45% 谷氨酸钠、0.20% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、0.23% MgSO_4 、0.37% KH_2PO_4 、0.25% CaCl_2 (均为质量分数)优化的固态培养基中,并在优化的 32 °C 下培养 12 h,GABA 产量为 41.7 mg/100 g,比优化前提高 13.4%。霉菌发酵速度慢、产量低,虽然对其进行工艺优化后产 GABA 量有所提升但产量仍较低,效率不及乳酸菌和酵母菌。

2.3 全细胞转化法富集 GABA

全细胞转化法是利用菌体细胞作为酶源,先培养细胞生长到一定的浓度,之后将收集、洗涤培养的细胞加入底物反应体系中,再经细胞内的 GAD 作用催化底物脱羧生成 GABA。具有周期短、生产成本低、工业化生产潜力高等优点。常用的微生物类型包括野生菌株和基因工程菌株。

2.3.1 野生菌株转化法

野生菌株转化生产 GABA 的反应条件温和、所产 GABA 易于分离纯化,具有较好地工业化应用前景。目前野生菌株转化法所用微生物以乳酸菌研究报道居多。张术聪等^[41]制备了植物乳杆菌 GB01-21 的转化液,测得 GABA 的含量为 139.2 g/L,转化率为 99.3%。孙丽慧等^[42]以短乳杆菌 DLF-19076 全细胞作为催化剂,通过 3 次补料后以 87.84% 的转化率获得 85.71 g/L 的 GABA。除乳酸菌外,也有霉菌转化生产 GABA 的研究。田东亮^[43]筛选出 1 株横梗霉,在最优条件下转化 12 h 后 GABA 产量达到 3.79 g/L,转化率达到 36.8%。王志超^[44]以霉菌 MQ-9 为出发菌株,先对其进行紫外-LiCl 复合诱变处理,之后优化条件并固定菌体,最终 GABA 转化率达到 33.98%。虽然研究表明优化条件后利用霉菌产 GABA 的转化率有所提高,但与多数乳酸菌生产 GABA 的转化率(90% 以上)相比,霉菌的转化率仍相对较低,因此利用霉菌转化生产 GABA 的研究少于乳酸菌。

2.3.2 基因工程菌株转化法

基因工程菌株因具备表达水平高、生产效率高等优势,在 GABA 全细胞转化方面具有较高的工业化生产潜力,已报道的利用基因工程技术改造细胞作为催化剂富集 GABA 的菌株种类多样,有乳酸菌、大肠杆菌、芽孢杆菌等,其中研究较多的是乳酸菌和大肠杆菌。乳酸菌产 GABA 得率高、安全度高,是转化生产 GABA 的理想菌种。大肠杆菌具有目标基因表达水平高、易于培养、成本低、GAD 活性普遍很高等优点,因此常以大肠杆菌作为重组微生物的宿主菌,异源表达产 GABA 乳酸菌的 GAD 构建基因工程菌作为生产 GABA 的细胞催化剂。KE 等^[45]以大肠杆菌 BW25113 为宿主菌,异源表达乳酸乳球菌的 GABD 基因,之后以构建的基因工程菌作为全细胞生物催化剂在转化 12 h 时 GABA 产量为 308.96 g/L,转化率为 99.9%。田灵芝等^[46]从 1 株具有较高 GAD 活力的植物乳杆菌扩增获得 GAD 基因 *lpgad*,构建了重组质粒 pET-28a-*lpgad*,并在大肠杆菌 BL21(DE3)中高效诱导其表达,然后将培养至 14 h 的菌体离心收集、洗涤,以 6.2 g/L 的菌浓转化 *L*-谷氨酸底物 24 h 后 GABA 产量可达 143.5 g/L,转化率为 97.32%,是原始菌株的 2.19 倍。此外,芽孢杆菌也可经基因工程改造全细胞转化制备 GABA。如张六六等^[47]通过在枯草芽孢杆菌中优化 GAD 及辅因子磷酸吡哆醛再生基因的串联表达,构建了 1 株高产 *L*-谷氨酸脱羧酶

的重组枯草芽孢杆菌,通过全细胞催化底物 L-谷氨酸 24 h,GABA 产量可达 327 g/L。与发酵周期长、后处理过程繁琐的传统发酵法相比,全细胞转化法生产

GABA 周期短、收率高,且利用基因工程技术异源表达重组 GAD 进行定向改造能够进一步提高全细胞转化法生产 GABA 的效率。

表 2 产 GABA 的菌株及 GABA 产量

Table 2 GABA-producing strains and their GABA production

来源	产 GABA 的微生物	培养基与发酵条件	GABA 产量/(mg·L ⁻¹)	参考文献
酱油曲	<i>Aspergillus oryzae</i>	含 0.4% 谷氨酸钠的 MRS 肉汤培养基,发酵 5 d	73.13 ± 1.77	[48]
泡菜	<i>L. brevis</i>	1% 谷氨酸钠的 MRS 肉汤,30℃ 培养 48 h	1 059.68	[33]
	<i>L. brevis</i>	2.14% 麦芽糖 + 4.01% 胰蛋白酶 + 2.38% 谷氨酸钠,30℃ 培养 48 h	1 934.53	
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> + <i>L. plantarum</i>	5 g/L 谷氨酸的桑葚饮料,30℃ 培养 72 h	2 420	[37]
奶酪	<i>L. paracasei</i>	30 mg/mL 谷氨酸钠 + MRS 肉汤,30℃ 培养 48 h	584	[31]
	<i>L. plantarum</i>	30 mg/mL 谷氨酸钠 + MRS 肉汤,30℃ 培养 48 h	937	
	<i>L. mesenteroides</i>	30 mg/mL 谷氨酸钠 + MRS 肉汤,30℃ 培养 48 h	49	
	<i>L. lactis</i>	30 mg/mL 谷氨酸钠 + MRS 肉汤,30℃ 培养 48 h	62	
	<i>Enterococcus faecalis</i>	30 mg/mL 谷氨酸钠 + MRS 肉汤,30℃ 培养 48 h	48	
酸面团	<i>Weissella paramesenteroides</i>	53 mmol/L 谷氨酸钠 + MRS 培养基,30℃ 下培养 96 h	1 900.5 ± 2.06	[49]
	<i>L. plantarum</i>	53 mmol/L 谷氨酸钠 + MRS 培养基,30℃ 下培养 96 h	1 595.27 ± 5.16	
	<i>L. mesenteroides</i>	53 mmol/L 谷氨酸钠的 MRS 培养基,30℃ 下培养 96 h	1 566.39 ± 3.09	
泰式肉	<i>Pediococcus pentosaceus</i>	0.5% 谷氨酸钠 + MRS 肉汤,30℃ 培养 24 h	9 060	[50]
日本发酵食品	<i>L. namurensis</i>	0.5% 谷氨酸钠 + MRS 肉汤,30℃ 培养 24 h	7 339	[51]
	<i>L. buchneri</i>	1% 谷氨酸 + MRS 培养基,35℃ 培养 72 h	6 650 ± 270	
泰国发酵蔬菜	<i>Weissella hellenica</i>	1% 谷氨酸 + MRS 培养基,35℃ 培养 72 h	7 690 ± 210	
火龙果表面	<i>Candida</i>	基础发酵培养基,26℃ 下静置发酵 2 d	2 500	[52]
	<i>Candida</i>	23 g/L 蔗糖 + 65 g/L 麸皮 + 6 g/L L-谷氨酸 + 0.5 mmol/L 磷酸吡哆醛,28℃ 发酵 3.5 d	4 300	
酸马奶	<i>Streptococcus thermophilus</i>	15 g/L 谷氨酸钠 + 脱脂乳(10% 脱脂奶粉) + 1 g/L 酪蛋白水解物,37℃ 培养 48 h	5 400	[35]
	<i>S. thermophilus</i> + <i>L. rhamnosu</i>	15 g/L 谷氨酸钠 + 脱脂乳(10% 脱脂奶粉),37℃ 培养 48 h	8 300	

注:% 均为质量分数

3 GABA 功能性食品开发现状

大健康背景下人们对生活质量的追求提高,功能性食品的开发能够满足人们对传统食品提出的深层次要求,GABA 作为一种功能性因子,在功能性食品生产中的应用越来越广泛。

3.1 GABA 粮食制品的开发

粮食食品是人类生存与发展的基本条件,采用浸泡、发芽等方法加工粮食作物可以开发出多种富含 GABA 的粮食制品,使得人们能够在日常的膳食饮食中摄入所需的 GABA。米类中以发芽糙米为研究热点,在日本已经获得了产业化生产,其 GABA 含量比普通白米高 7 倍。以发芽糙米为原料进行再加工可以制得丰富的 GABA 糙米食品。最为简单的是 GABA 营养粉,如孙雨茜等^[53]挤压膨化发芽糙米,进行超微粉碎后添加玉米粉、麦芽糊精等辅料得到 GABA 含量 16.63 mg/100 g 的风味营养粉,高于未发芽的

营养粉产品近 3 倍。发芽糙米也被用于烘焙、饮料和酒类食品的加工,生产富含 GABA 的糙米面包、饼干、糙米乳酸菌饮料、糙米白酒等^[54]。麦类胚芽中含有较高的 Glu 含量,是用于生产 GABA 食品的优良原料。以发芽小麦为原料可以制备出 GABA 饮料、麦茶,进行磨粉后用于生产富含 GABA 的馒头、面包等主食。柴美清等^[55]以 46℃ 水浴保温孵育 1.5 h 的麦胚为原料制备了一种 GABA 含量为 82 mg/100 mL 的麦胚饮料,是普通麦胚饮料 GABA 含量的 4.56 倍。尹永祺等^[56]对发芽后的小麦进行炒制焙香,制得一种麦芽茶,其 GABA 含量为 20 mg/100 g。王沛等^[57]以小麦为原料先制得富含 GABA 的芽麦全粉,再添加酵母、水等辅料生产富含 GABA 的全芽麦馒头,含量在 200 ~ 280 mg/100 g,是一种新型功能性全麦食品。对豆类进行发芽发酵不仅可以提高 GABA 含量,还可以改善其营养组分、降低抗营养因子,从而提高其利用价值。其中最简单的形式是豆芽食品,以豆

类原料直接胁迫发芽制得。另外较为常见是豆乳食品,如吴嘉琪等^[58]以富含 GABA 的发芽大豆为主要原料,制作了一种 GABA 含量为 18.56 mg/100 mL 的谷芽豆乳。此外还有富含 GABA 的豆奶、豆酱、豆豉等豆类制品^[59]。粮食作物种类丰富且发芽生长快、周期短,易于实现工业化生产,目前以开发出的富含 GABA 的粮食制品形式最为多样。随着食品加工技术的快速发展,GABA 食品种类会更加多元化。

3.2 GABA 乳制品的开发

乳酸菌发酵制得的乳制品由于口感好而广受消费者青睐,因此以发酵乳制品为载体开发 GABA 功能性食品具有较好的市场前景,同时也符合国家乳业振兴促进乳制品创新升级的国家政策。GABA 乳制品通常是以高产 GABA 的乳酸菌为发酵剂生产富含 GABA 的奶酪、酸奶、发酵乳。此外在发酵过程中添加一定量的谷氨酸盐或辅酶磷酸吡哆醛进行优化可以提高产品中 GABA 产量。CARAFA 等^[60]利用产 GABA 嗜热链球菌 84C (10^6 CFU/mL) 和短乳杆菌 DSM 32386 (10^6 CFU/mL) 混合发酵制备奶酪,在成熟 20 d 时得到 GABA 含量 (9.1 ± 2.2) mg/100 g 的奶酪,高于嗜热链球菌 84C 单独发酵时 (7.1 ± 2.1) mg/100 g,为利用共培养物开发功能性奶酪提供了思路。EL-FATTAH 等^[61]利用浓缩乳清蛋白强化的脱脂乳粉发酵酸奶,在发酵剂中添加能赋予酸奶高粘特性和产 GABA 混合菌后发现,酸奶中 GABA 含量达 1.64 mg/100 mL,是相应只添加具有高粘性菌株处理组的 4.56 倍。韩啸^[62]以 1 株产 GABA 的短乳杆菌 DL1-11 制备了一种功能性发酵乳,在添加 0.15% 的 L-谷氨酸钠进行优化后产品中 GABA 含量达 (101.20 ± 2.48) mg/100 g,是优化前的 2.37 倍。总之,通过高产 GABA 乳酸菌的筛选及乳品配料的改良,如添加谷氨酸钠等物质,能够显著提高乳制品中 GABA 产量,但由于谷氨酸钠在乳制品中应用较少,因此筛选或培育高产 GABA 的乳酸菌可行性更好。

3.3 GABA 肉制品的开发

GABA 肉制品的开发研究与粮食制品和乳制品相比较少,主要报道的是用乳酸菌添加于发酵剂中制备富含 GABA 的肉制品。在乳酸菌发酵 4 个月和 12 个月的日本发酵鱼制品 aji-no-susu 中分别检测到 150 和 140 mg/100 g 的 GABA,并从中分离出 2 株产 GABA 的蛋白酶乳杆菌 KN1 和 KN2,表明产 GABA 的乳酸菌可用于发酵生产含 GABA 的肉制品^[63]。KAN-TACHOTE 等^[64]将高产 GABA 的菌株用于发酵香肠

的制作,以产 GABA 的戊糖片球菌 HN8 和那慕尔乳杆菌 NH2 为混合发酵剂(接种量各为 6 lg CFU/g)发酵猪肉香肠,得到的产品中 GABA 含量达 396.2 mg/100 g。RATANABUREE 等^[65]使用同样的 2 株菌用于一种泰式“Nham”香肠的制作,在发酵剂中添加质量分数 0.5% 谷氨酸钠后其 GABA 含量为 405.1 mg/100 g,大约高出市面上普通“Nham”香肠的 8 倍。目前 GABA 肉制品的开发报道较少,通常能在发酵肉中存活的细菌需要很强的耐受力,因此需要筛选高产 GABA 且高耐受力的乳酸菌以更好地应用于 GABA 肉制品的开发。

4 展望

GABA 作为一种对人体有多种生理功能的生物活性物质,已受到国内外研究学者的广泛关注。近来蛋白质组学、分子生物学等领域的发展及不断提高的生活健康水平为 GABA 的研究提供了更为广阔的研究空间,未来 GABA 资源的开发方向之一是可以深入了解 GAD 的催化机制,利用组学等知识对该酶进行蛋白质结构改良以获得高转化效率的 GAD,从而提高 GABA 合成量。另一开发方向是有针对性地开发适合不同人群的富含 GABA 的食品,如开发适合中老年人群的 GABA 主食类产品(馒头、面包、发芽糙米等)、开发适合中青年人群的便携式休闲化 GABA 食品(饼干、发酵奶片等)以及适合大众人群的 GABA 酸奶等乳酸菌发酵食品,以期通过在日常生活中摄入这些富含 GABA 的食品来改善现代人因生活节奏快、压力大等因素导致的焦虑、失眠等亚健康状况。

参 考 文 献

- [1] NGO D-H, VO T S, TORRES M D, et al. An updated review on pharmaceutical properties of gamma-aminobutyric acid [J]. *Molecules*, 2019, 24 (15): 1-23.
- [2] VEERAIHAH P, NORONHA J M, MAITRA S, et al. Dysfunctional glutamatergic and γ -aminobutyric acidergic activities in prefrontal cortex of mice in social defeat model of depression [J]. *Biological Psychiatry*, 2014, 76 (3): 231-238.
- [3] CHRISTOPHE S, ANETTE K. The users of novel psychoactive substances: Online survey about their characteristics, attitudes and motivations [J]. *The International Journal on Drug Policy*, 2016, 32: 1-33.
- [4] AMRO A, HEBA A, ETARERI E S, et al. Screening potential probiotic characteristics of *Lactobacillus brevis* strains *in vitro* and intervention effect on type I diabetes *in vivo* [J]. *Bio Med Research International*, 2018, 2018: 1-20.
- [5] 王斌, 丁俊肖, 贾才华, 等. 环境胁迫植物富集 γ -氨基丁酸的研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39 (18): 342-346; 352.

- WANG B, DING J Z, JIA C H, et al. Research progress on enrichment of γ -aminobutyric acid in plants under environmental stress [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39 (18): 342 - 346; 352.
- [6] SOMBOON T, SUWIMON K, ATHIP B. Enhancing gamma-aminobutyric acid content in germinated brown rice by repeated treatment of soaking and incubation [J]. Food Science and Technology International, 2013, 19(1): 25 - 33.
- [7] WANG P, LIU K X, GU ZH X, et al. Enhanced γ -aminobutyric acid accumulation, alleviated compositional deterioration and technofunctionality loss of germinated wheat by hypoxia stress [J]. Food Chemistry, 2018, 269: 1 - 36.
- [8] TRUONG T N, DANH N T, DAO D T A. Effects of pH soaking solutions and hypoxia/anaerobic treatment on gaba accumulation in germinated mung bean (*Vigna radiata* L.) [J]. Vietnam Journal of Science and Technology, 2017, 55(2): 150 - 160.
- [9] XU J G, HU Q P. Changes in γ -aminobutyric acid content and related enzyme activities in Jindou 25 soybean (*Glycine max* L.) seeds during germination [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(1): 341 - 346.
- [10] CHEN J, WU J, LIN K, et al. Optimization of culture conditions and culture solution compositions for γ -aminobutyric acid accumulation in germinating Mung Bean (*Vigna radiata* L.) [J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2018, 12(1): 115 - 121.
- [11] 王凯凯, 孙朦, 宋佳敏, 等. γ -氨基丁酸 (GABA) 形成机理及富集方法的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2018, 39 (14): 323 - 329.
- WANG K K, SUN M, SONG J M, et al. Research progress in the formation mechanism and accumulation methods of γ -aminobutyric acid (GABA) [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(14): 323 - 329.
- [12] OH S-J, KIM H S, LIM S-T, et al. Enhanced accumulation of gamma-aminobutyric acid in rice bran using anaerobic incubation with various additives [J]. Food Chemistry, 2019, 271: 187 - 192.
- [13] 朱云辉, 郭元新. 响应面法优化盐胁迫发芽苦荞富集 γ -氨基丁酸的培养条件 [J]. 食品科学, 2015, 36(19): 96 - 100.
- ZHU Y H, GUO Y X. Optimization of culture conditions for accumulating γ -aminobutyric acid (GABA) in germinated tartary buckwheat under salt stress by response surface methodology [J]. Food Science, 2015, 36(19): 96 - 100.
- [14] 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.
- [15] 张颖, 何健, 王涛, 等. 通气 and 金属离子双重胁迫对糙米萌发富集 γ -氨基丁酸的影响 [J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 55 - 60; 77.
- ZHANG Y, HE J, WANG T, et al. Effects of coercion germination with aeration and metal ions on the enrichment of γ -aminobutyric acid in germinated brown rice [J]. Food and Machinery, 2019, 35(5): 55 - 60; 77.
- [16] XIA Q, WANG L, XU C, et al. Effects of germination and high hydrostatic pressure processing on mineral elements, amino acids and antioxidants *in vitro* bioaccessibility, as well as starch digestibility in brown rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Food Chemistry, 2017, 214: 533 - 542.
- [17] SHIGEAKI U, TAKUMI K, TAKAE W, et al. Enzymatic production of γ -aminobutyric acid in soybeans using high hydrostatic pressure and precursor feeding [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2013, 77(4): 706 - 713.
- [18] UENO S, KAWAGUCHI Y, OSHIKIRI Y, et al. Enrichment of free amino acid content and reduction of astringent taste compounds in soybean by high hydrostatic pressure [J]. High Pressure Research, 2019, 39(2): 398 - 407.
- [19] 张祎, 赵婷婷, 申娟利, 等. 超声波处理对发芽糙米 GABA 积累及抗氧化能力影响的研究 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(2): 130 - 133; 137.
- ZHANG Y, ZHAO T T, SHEN J L, et al. Study on effect of ultrasonic treatment on GABA accumulation and antioxidant capacity in germinated brown rice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(2): 130 - 133; 137.
- [20] 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.
- [21] DING J Z, HOU G G, NEMZER V N, et al. Effects of controlled germination on selected physicochemical and functional properties of whole-wheat flour and enhanced γ -aminobutyric acid accumulation by ultrasonication [J]. Food Chemistry, 2018, 243: 1 - 34.
- [22] HAO J X, WU T J, LI H Y, et al. Dual effects of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) treatment on the accumulation of γ -aminobutyric acid (GABA) and rutin in germinated buckwheat [J]. Food Chemistry, 2016, 201: 87 - 93.
- [23] LIU R, HE X, SHI J, et al. The effect of electrolyzed water on decontamination, germination and γ -aminobutyric acid accumulation of brown rice [J]. Food control, 2013, 33(1): 1 - 5.
- [24] CHEN H H, CHANG H C, CHEN Y K, et al. An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: Low-pressure plasma [J]. Food Chemistry, 2016, 191: 120 - 127.
- [25] 张亮, 静恩岳, 孙宇, 等. NaCl 胁迫联合 Ca^{2+} 调控糙米发芽富集 GABA 的工艺优化 [J]. 食品研究与开发, 2018, 39(21): 7 - 14.
- ZHANG L, JING E Y, SUN Y, et al. Optimization of GABA accumulation in brown rice under NaCl stress and Calcium regulation [J]. Food Research and Development, 2018, 39(21): 7 - 14.
- [26] 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]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 301 - 308.
- CHENG J J, XU L, OU C Z, et al. Optimization of germination temperature and $CaCl_2$ concentration to improve γ -aminobutyric acid content in germination millet [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 301 - 308.
- [27] BAI Q Y, YANG R Q, ZHANG L X, et al. Salt stress induces accumulation of γ -aminobutyric acid in germinated foxtail millet (*Setaria italica* L.) [J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(2): 145 - 149.
- [28] YANG H, GAO J Y, YANG A S, et al. The ultrasound-treated soybean seeds improve edibility and nutritional quality of soybean sprouts [J]. Food Research International, 2015, 77: 704 - 710.
- [29] FU W, LV X L, SUN Y M. Study on content changes of γ -aminobu-

- tyric acid and mineral element during the processing of black rice germination[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(9): 178 - 180.
- [30] 赵伟睿. 微生物细胞催化合成 γ -氨基丁酸效能强化的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- ZHAO W R. Improvement of γ -aminobutyric acid biosynthesis ability of microbial cells[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [31] RIBEIRO S C, DOMINGOS-LOPES M F, STANTON C, et al. Production of γ -aminobutyric acid (GABA) by *Lactobacillus otakiensis* and other *Lactobacillus* sp. isolated from traditional Pico cheese[J]. International Journal of Dairy Technology, 2018, 71(4): 1 012 - 1 017.
- [32] RAFFAELLA D C, FRANCESCO M, GIUSEPPE R C, et al. Synthesis of gamma-aminobutyric acid (GABA) by *Lactobacillus plantarum* DSM19463: functional grape must beverage and dermatological applications[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 86(2): 731 - 741.
- [33] LIM H S, CHA I-T, ROH S W, et al. Enhanced production of gamma-aminobutyric acid by optimizing culture conditions of *Lactobacillus brevis* HYE1 isolated from kimchi, a Korean fermented food[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2017, 27(3): 450 - 459.
- [34] KIM J A, PARK M S, KANG S A, et al. Production of γ -aminobutyric acid during fermentation of *Gastrodia elata* Bl. by co-culture of *Lactobacillus brevis* GABA 100 with *Bifidobacterium bifidum* BGN4[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(2): 459 - 466.
- [35] HAN M, LIAO W Y, WU S M, et al. Use of *Streptococcus thermophilus* for the in situ production of γ -aminobutyric acid-enriched fermented milk[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 103(1): 1 - 8.
- [36] 范媛媛, 丁俊青, 熊善柏, 等. 复合菌种发酵法提高发芽糙米中 γ -氨基丁酸[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(3): 1 - 6.
- FAN Y Y, DING J Z, XIONG S B, et al. Increasing γ -aminobutyric acid in germinated brown rice by synergistic fermentation[J]. Journal of Chinese Journal of Cereals and Oils Association, 2019, 34(3): 1 - 6.
- [37] ZHANG Q, SUN Q, TAN X, et al. Characterization of γ -aminobutyric acid (GABA)-producing *Saccharomyces cerevisiae* and coculture with *Lactobacillus plantarum* for mulberry beverage brewing[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2019, 1 - 7.
- [38] 边鑫, 吴非. 高产 γ -氨基丁酸霉菌菌株的筛选及诱变育种[J]. 食品科学, 2012, 33(21): 213 - 216.
- BIAN X, WU F. Screening and mutation breeding of a high-yield γ -aminobutyric acid (GABA) mould strain[J]. Food Science, 2012, 33(21): 213 - 216.
- [39] 刘志强, 肖翔, 周立平. 红曲霉与乳酸菌混合发酵产 γ -氨基丁酸工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2011(3): 112 - 117.
- LIU Z Q, XIA X, ZHOU L P. Study on production of γ -aminobutyric acid by mixed culture fermentation of *Monascus* and *Lactobacillus plantarum*[J]. China Food Additives, 2011(3): 112 - 117.
- [40] 张庆庆, 吕闻闻, 汤文晶, 等. 红曲霉 ZL307 固态发酵豆渣产 γ -氨基丁酸的工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(1): 96 - 100.
- ZHANG Q Q, LV W W, TANG W J, et al. Optimization of solid-state fermentation conditions for production of γ -aminobutyric acid by *Monascus* ZL307[J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(1): 96 - 100.
- [41] 张术聪, 刘婷婷, 杨套伟, 等. 从植物乳杆菌全细胞转化液中分离纯化 γ -氨基丁酸的工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(11): 1 - 5.
- ZHANG S C, LIU T T, YANG T W, et al. Study on separation and purification technology of γ -aminobutyric acid by whole-cell bio-conversion[J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(11): 1 - 5.
- [42] 孙丽慧, 李胜男, 宫宇晴, 等. 短乳杆菌 DLF-19076 全细胞催化合成 γ -氨基丁酸[J]. 食品科技, 2019, 44(8): 31 - 36.
- SUN L H, LI S N, GONG Y Q, et al. Synthesis of γ -aminobutyric acid by whole cells of *Lactobacillus brevis* DLF-19076[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(8): 31 - 36.
- [43] 田东亮. 转化法合成 γ -氨基丁酸的霉菌筛选及条件优化[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2013.
- TIAN D L. Screening of γ -aminobutyric acid produced molds by biotransformation and optimizing of technology conditions[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2013.
- [44] 王志超. 霉菌转化法合成 γ -氨基丁酸的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2016.
- WANG Z C. The research of γ -aminobutyric acid synthesized by mold transformation[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2016.
- [45] KE C R, YANG X W, RAO H X, et al. Whole-cell conversion of L-glutamic acid into gamma-aminobutyric acid by metabolically engineered *Escherichia coli*[J]. Springerplus, 2016, 5(1): 591 - 598.
- [46] 田灵芝, 徐美娟, 饶志明. 一株重组大肠杆菌/pET-28a-lpgad 的构建及其高效生产 γ -氨基丁酸转化条件的优化[J]. 生物工程学报, 2012, 28(1): 65 - 75.
- TIAN L Z, XU M J, RAO Z M. Construction of a recombinant *Escherichia coli* BL21/pET-28a-lpgad and the optimization of transformation conditions for the efficient production of γ -aminobutyric acid[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2012, 28(1): 65 - 75.
- [47] 张六六, 毛连山. 利用重组枯草芽孢杆菌生产 γ -氨基丁酸的研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(9): 171 - 173; 176.
- ZHANG L L, MAO L S. Study on utilizing a recombinant *B. subtilis* 168/pHT01-gadA-pdxH for synthesis of γ -aminobutyric acid[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(9): 171 - 173; 176.
- [48] AB KADIR S, WAN W A A Q I, MOHAMMAD R, et al. Evaluation of commercial soy sauce koji strains of *Aspergillus oryzae* for γ -aminobutyric acid (GABA) production[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2016, 43(10): 1 387 - 1 395.
- [49] DEMIRBAŞ F, İSPIRLİ H, KURNAZ A A, et al. Antimicrobial and functional properties of lactic acid bacteria isolated from sourdoughs[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 361 - 366.
- [50] RATANABUREE A, KANTACHOTE D, CHARERNJIRATRAKUL W, et al. Selection of γ -aminobutyric acid-producing lactic acid bacteria and their potential as probiotics for use as starter cultures in Thai fermented sausages (Nham)[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(7): 1 371 - 1 382.
- [51] BARLA F, KOYANAGI T, TOKUDA N, et al. The γ -aminobutyric acid-producing ability under low pH conditions of lactic acid bacteria isolated from traditional fermented foods of Ishikawa Prefecture, Japan, with a strong ability to produce ACE-inhibitory peptides[J]. Biotechnology Reports, 2016, 10: 105 - 110.
- [52] 郑鸿雁, 赵炜彤, 吕妍希. 响应面法优化假丝酵母 Y6 产 γ -氨基

- 丁酸发酵工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(9): 130 - 135.
- ZHENG H Y, ZHAO W T, CHANG Y X. Optimization of medium components and culture conditions for enhanced yield of γ -aminobutyric acid by *Candida* sp. Y6 by response surface methodology [J]. Food Science, 2015, 36(9): 130 - 135.
- [53] 孙雨茜, 杨润强, 尹永祺, 等. 高 γ -氨基丁酸发芽营养粉的研制 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(21): 238 - 241 + 247.
- SUN Y X, YANG R Q, YIN Y Q, et al. Development of germinated nutritional grain powder with high γ -Aminobutyric acid [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(21): 238 - 241; 247.
- [54] 马先红, 刘景圣, 陈翔宇. 粮食发芽富集 GABA 及食品开发研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2015, 36(21): 198 - 200.
- MA X H, LIU J S, CHEN X Y. Research progress on enrichment of γ -aminobutyric acid in germinated grain and function food [J]. Food Research and Development, 2015, 36(21): 198 - 200.
- [55] 柴美清, 徐倩, 杨庭, 等. 富含 γ -氨基丁酸的麦胚饮料的研制 [J]. 食品研究与开发, 2012, 33(11): 126 - 129.
- CHAI M Q, XU Q, YANG T, et al. Preparation of enriched γ -aminobutyric acid wheat germ beverage [J]. Food Research and Development, 2012, 33(11): 126 - 129.
- [56] 尹永祺, 陆燕婷, 宋雨翔, 等. 一种富含 γ -氨基丁酸的小麦芽茶的生产方法: 中国, 201710312019. 3 [P]. 2020 - 03 - 06.
- YIN Y Q, LU Y T, SONG Y X, et al. Production method for enriched γ -aminobutyric acid malt tea: China, 201710312019. 3 [P]. 2020 - 03 - 06.
- [57] 王沛, 刘可欣, 杨润强, 等. 一种富含 γ -氨基丁酸的全芽麦馒头生产技术: 中国, 201811078361. 2 [P]. 2020 - 03 - 17.
- WANG P, LIU K X, YANG R Q, et al. Production technology of enriched γ -aminobutyric acid whole bud wheat steamed bread: China, 201811078361. 2 [P]. 2020 - 03 - 17.
- [58] 吴嘉琪, 王沛, 王红霞, 等. 富含 γ -氨基丁酸谷芽豆乳生产技术研究 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 182 - 185.
- WU J Q, WANG P, WANG H X, et al. Research on the production technology of enriched γ -aminobutyric acid soybean milk [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(6): 182 - 185.
- [59] SONG H Y, YU R C. Optimization of culture conditions for gamma-aminobutyric acid production in fermented adzuki bean milk [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2018, 26(1): 74 - 81.
- [60] CARAFA I, STOCCO G, NARDIN T, et al. Production of naturally γ -aminobutyric acid-enriched cheese using the dairy strains *Streptococcus thermophilus* 84C and *Lactobacillus brevis* DSM 32386 [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1 - 11.
- [61] EL-FATTAH A A, SAKR S, EL-DIEB S, et al. Developing functional yogurt rich in bioactive peptides and gamma-aminobutyric acid related to cardiovascular health [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 98: 390 - 397.
- [62] 韩啸. 乳杆菌产 γ -氨基丁酸能力分析及其发酵乳改善睡眠效果评价 [D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- HAN X. The discrepancy analysis on γ -aminobutyric acid production ability among *Lactobacillus* and its fermented milk used in sleep improvement [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [63] KUDA T, TANIBE R, MORI M, et al. Microbial and chemical properties of *aji-no-susu*, a traditional fermented fish with rice product in the Noto Peninsula, Japan [J]. Fisheries Science, 2009, 75(6): 1 499 - 1 506.
- [64] KANTACHOTE D, RATANABUREE A, SUKHOM A, et al. Use of γ -aminobutyric acid producing lactic acid bacteria as starters to reduce biogenic amines and cholesterol in Thai fermented pork sausage (Nham) and their distribution during fermentation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 70(2): 171 - 177.
- [65] RATANABUREE A, KANTACHOTE D, CHARERNJIRAKUL W, et al. Enhancement of γ -aminobutyric acid (GABA) in Nham (Thai fermented pork sausage) using starter cultures of *Lactobacillus namurensis* NH2 and *Pediococcus pentosaceus* HN8 [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 167(2): 1 - 33.