DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260509001
引用格式: 张伟坚, 刘镇, 沈智峰, 等. 发酵食品 γ-氨基丁酸来源、代谢和功能特性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(17): 159–167.
Zhang Weijian, Liu Zhen, Shen Zhifeng, et al. Research progress on the sources, metabolism and functional characteristics of γ-aminobutyric acid in fermented foods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(17): 159–167. (in Chinese with English abstract).

发酵食品 γ-氨基丁酸来源、代谢和功能特性研究进展

张伟坚[1], 刘　镇[2], 沈智峰[1], 俞　洪[3], 姚　蕾[2], 朱军莉[1*]

(1. 浙江工商大学食品与生物工程学院, 杭州　310018; 2. 绍兴市食品药品检验研究院, 浙江传统绍兴黄酒科学研究院, 绍兴　312000; 3. 浙江中医药大学基础医学院, 杭州　310053)

摘　要: γ-氨基丁酸(γ-aminobutyric acid, GABA)作为一种重要的非蛋白质氨基酸, 可参与机体神经调节、血压调控与物质代谢等生理过程, 其健康价值正被不断验证。研究发现, 乳酸菌是食品发酵过程中 GABA 的重要来源, 谷氨酸脱羧酶是调控 GABA 合成关键生物酶。在神经、心血管、代谢等疾病干预方面具有积极作用。目前该方向的相关研究具有多学科交叉特征, 未来可结合合成生物学与精准营养技术, 推动 GABA 在功能性食品领域的应用。本文采用文献计量法, 梳理 2016—2025 年发酵食品中 GABA 的国内外研究现状, 总结其来源、代谢、生物活性及应用的研究结果, 旨在为发酵食品中挖掘产 GABA 微生物提供理论参考, 促进 GABA 在功能性食品领域的发展。

关键词: γ-氨基丁酸; 发酵食品; 文献计量学; 乳酸菌; 谷氨酸脱羧酶
中图分类号: TS201.4　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)17–0159–09

Research progress on the sources, metabolism and functional characteristics of γ-aminobutyric acid in fermented foods

ZHANG Wei-Jian[1], LIU Zhen[2], SHEN Zhi-Feng[1], YU Hong[3], YAO Lei[2], ZHU Jun-Li[1*]

(1. *College of Food and Biological Engineering*, *Zhejiang Gongshang University*, *Hangzhou* 310018, *China*; 2. *Shaoxing Institute of Food and Drug Inspection and Research*, *Zhejiang Traditional Shaoxing Huangjiu Science Research Institute*, *Shaoxin* 312000, *China*; 3. *School of Basic Medical Sciences*, *Zhejiang Chinese Medical University*, *Hangzhou* 310053, *China*)

ABSTRACT: γ-aminobutyric acid (GABA), an important non-protein amino acid, participates in multiple physiological processes including neural regulation, blood pressure modulation and substance metabolism in organisms, and its health-promoting values are continuously being validated. Studies have demonstrated that lactic acid bacteria serve as a major source of GABA during food fermentation, and glutamate decarboxylase acts as the key enzyme governing GABA

收稿日期: 2026-05-09
基金项目: 绍兴黄酒重大科技项目(2024SDXT001-7)
第一作者: 张伟坚(2002—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 979237692@qq.com
***通信作者:** 朱军莉(1979—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为发酵微生物与功能。E-mail: junlizhu0305@163.com

biosynthesis. GABA exerts beneficial effects in the intervention of neurological, cardiovascular and metabolic diseases. Current research in this field features multidisciplinary intersections. In the future, synthetic biology and precision nutrition technologies can be integrated to advance the application of GABA in functional foods. Using bibliometrics, this paper reviewed domestic and international research progress on GABA in fermented foods from 2016 to 2025, and summarized research findings concerning its sources, metabolism, bioactivities and applications. It aimed to provide theoretical references for screening GABA-producing microorganisms from fermented foods and facilitate the development of GABA-enriched functional foods.

KEY WORDS: γ-aminobutyric acid; fermented foods; bibliometrics; lactic acid bacteria; glutamate decarboxylase

0 引 言

γ-氨基丁酸(γ-aminobutyric acid, GABA)是一种典型的非蛋白质氨基酸, 在哺乳动物的中枢神经系统中, 作为抑制性神经递质调节神经元的兴奋性起到调节情绪、睡眠、血压等问题的重要作用。人体在慢性压力条件下形成内源性 GABA, 而通过膳食补充外源性 GABA 是一种重要的营养补充方式。相比于化学方法合成, 利用微生物在食品发酵过程中原位合成富集 GABA, 可以获得一种天然、安全、可与食品基质协同增效的食品添加剂。目前已筛选获得多株高产 GABA 的功能性乳酸菌[1], 随着由传统发酵法逐步发展至全细胞催化与代谢工程改造相结合的微生物合成技术, GABA 菌株的源头合成能力与产量得到显著提升[2]。

GABA 作为益生菌重要代谢活性产物, 兼具益生功能与生理调节作用, 因而在功能性食品和营养健康产品中得到日益广泛的开发与应用。GABA 功能研究从早期单纯聚焦神经调节功能, 逐渐拓展到缓解代谢性疾病(如糖尿病)、缓解机体热应激、调控中枢神经系统 GABA 转运体作用机制及与胰岛素样生长因子-1 (insulin-like growth factor 1, IGF-1)协同改善心血管风险[3]等多方面拓展。与此同时, GABA 定量检测方法的标准化, 进一步推动其成为功能性食品领域的研究热点和产业发展方向[4]。

文献计量学作为一种运用数学、统计学和大数据分析方法, 以学术文献、专利、期刊、作者等情报为研究对象, 揭示学科发展规律、研究热点、前沿趋势的交叉学科, 能够通过统计范围内文献的数量关系与网络结构进行可视化分析, 宏观揭示某学科领域的研究热点分布、合作网络、主题聚类及演进历程。近年来, GABA 发酵食品相关的研究文献呈指数增长, 研究维度横跨微生物学、食品工程、营养学与医学等多个领域。鉴于此, 本文旨在整合宏观的文献计量学洞察与聚焦的科学研究内容, 系统梳理 GABA 从来源、代谢、功能到应用的研究全景, 为该领域的理论深化与产品创新提供综合性参考。

1 发酵食品 GABA 研究的文献计量分析

1.1 数据来源与检索方式

研究检索时间范围为 2016 年至 2025 年。中文文献来源于中国学术期刊全文数据库(China National Knowledge Infrastructure, CNKI), 检索方式: 主题词检索, 检索词为: GABA。英文文献来源于 Web of Science 核心合集(Web of Science Core Collection, WOSCC)数据库, 检索方式: topic, 检索词为: γ-aminobutyric acid。

1.2 文献筛选

文献纳入标准: GABA 来源、代谢和功能特性的相关研究。中文文献类型以“学术期刊”与“学位论文”, 英文文献类型选择“Article”或“Review”。排除标准: (1)重复文献; (2)与 GABA 来源、代谢和功能特性研究不相关的文献; (3)文献格式为会议、书籍、报纸等; (4)关键内容缺失的文献。使用 Excel 进行数据去重处理。

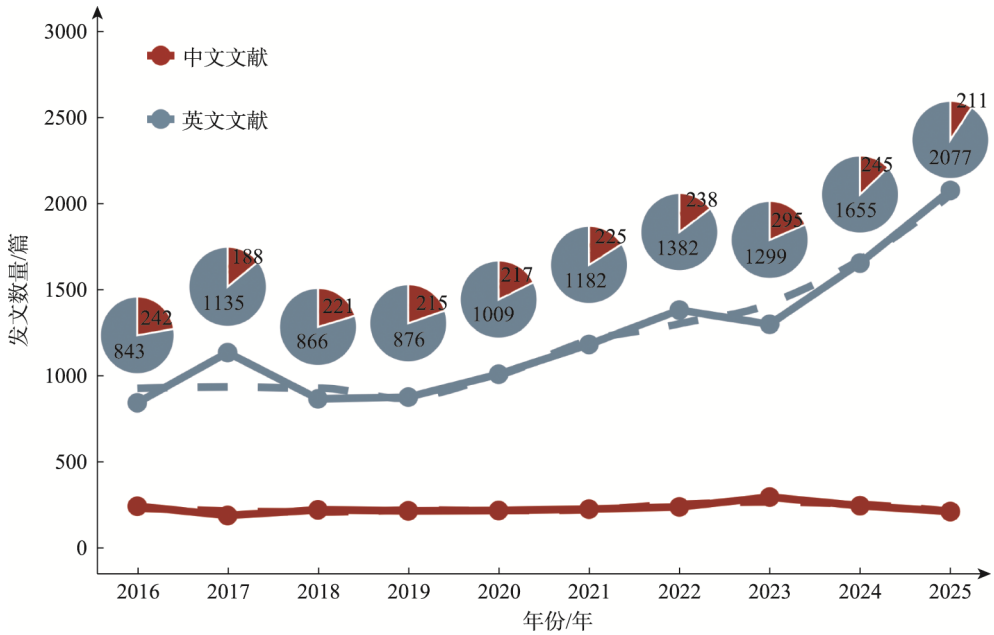
1.3 发文趋势分析

通过数据库检索最终获取相关中文文献 2297 篇, 英文文献 12254 篇。论文年度发文量统计见图 1, 英文文献发文量整体呈现波动上升的趋势, 2024—2025 年数量大幅上升; 中文文献整体发文量远低于英文文献。除 2023 年外, 中文文章的发文量均在 200 篇上下浮动, 研究热度相对稳定, 但规模较小。根据发文量变化趋势显示, 相关研究的整体关注度近年来显著提升, 年文献发文量超过 1000 篇且仍在不断上升, 可见 GABA 有优良的研究价值和应用前景。

1.4 基于 CNKI 的国内和 WOSCC 的国外研究现状及演化

通过对关键词共现与聚类分析呈现了 GABA 领域的研究热点与知识网络, 核心围绕 GABAA 受体、GABAB 受体与 GABA 本体三大关键主题展开。如图 2 所示, GABAA 受体相关研究聚焦于中枢神经调控, 关联抗抑郁药物、镇静催眠、睡眠、阿尔茨海默病、帕金森病等神经精神疾病, 同时涉及机器学习、分子对接等前沿技术应用。GABA 受体则以变构调节、动物模型、大鼠实验为核心, 延

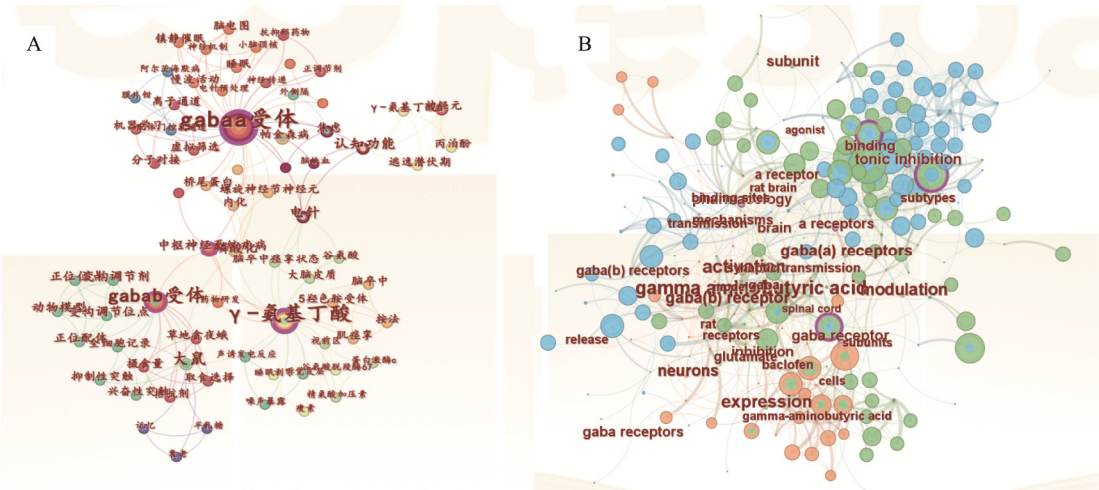
伸至摄食行为、突触传递、记忆与衰老等生理过程; GABA 本体研究串联电针、脑卒中等临床应用，以及 5 羟色胺受体、谷氨酸等神经递质互作，覆盖从基础机制到临床转化的全链条。整体网络清晰展现了 GABA 在神经科学、药理学、临床医学等多领域的交叉研究格局，为该方向的科研布局提供了直观参考。



注：饼图分别代表英文文献与中文文献数量。

图 1　2016—2025 年 GABA 研究文献发文量的变化

Fig.1　Changes in the number of publications on GABA research from 2016 to 2025



注: A. 中文文献-CNKI; B. 英文文献。

图 2　GABA 关键词再现

Fig.2　Keyword reproduction of GABA

2　GABA 的生物发酵来源

研究表明，发酵食品中 GABA 含量存在明显的差异。以发酵酒饮料为例: 在黄酒中 GABA 含量受大米原料影响，常见黄酒主要以糯米、精米、籼米 3 种大米作为酿酒原料，其中以糯米为原料酿制的黄酒 GABA 含量最高，达到 260.45 mg/L[5]。在其他含酒精饮品中，匈牙利红酒的 GABA 的含量为 6.9 mg/L，意大利维蒙蒂诺白葡萄酒中 GABA 的含量为 130 mg/L[6]。在奶制品中，使用嗜热链球菌发酵的乳品，在发酵 48 h 后可产生 2.8 g/L 的 GABA[7]，与鼠李糖乳杆菌共培养时，GABA 产量可提升至 8.3 g/L。以热杆菌 APC151 为初始接种基质进行酸奶发酵，可产生 2 mg/mL 的 GABA[8]。

2.1 天然产 GABA 微生物来源

2.1.1 乳酸菌

乳酸菌作为一种 GRAS 级的有优异发酵能力的菌株, 是发酵食品中生产 GABA 的主要优势菌种, 同时, 其产 GABA 效率也受到种属及环境等多因素调控。在乳制品中, 乳酸菌因其良好的食品适应性和独特的代谢特性, 成为 GABA 富集的关键菌群[9], 特别是植物乳杆菌。Ayağ 等[10]从土耳其传统奶酪样品中分离出携带谷氨酸脱羧酶(glutamic acid decarboxylase, GAD)基因的植物乳杆菌菌株, 具有产 GABA 的优势; 孙宇等[1]从传统发酵样品中分离出的植物乳杆菌 LS2 兼具高产 GABA 与高效降解亚硝酸盐能力, 通过发酵条件优化, 能显著提升其 GAD 活力和 GABA 产量。李豪倩等[11]通过优化发酵条件并改良 MRS 培养基, 使植物乳杆菌 Y-2 全菌种细胞中 GAD 活力提升 88.48%, GABA 产量提升至 2.27 g/L。除植物乳杆菌外, 从生牛乳自发发酵物中分离到高产 GABA 的乳酸乳球菌[12]; 肠道来源的双歧杆菌和拟杆菌在体外也能产 GABA[13]; 还有副干酪乳杆菌、短乳杆菌、瑞士乳杆菌等多种乳酸菌被鉴定出高效的产 GABA 能力[9]。

2.1.2 酿酒酵母和红曲霉

酒精饮料发酵过程中的某些真菌类微生物代谢活动也生成 GABA, 其中较为典型的是酿酒酵母和红曲霉[14]。酿酒酵母主要通过 GABA 支路合成, 该途径在氮饥饿条件下被显著激活, 编码谷氨酸脱羧酶 GAD1、编码 GABA 转氨酶 UGA1 和编码琥珀酸半醛脱氢酶 UGA2 基因表达上调, 将 GABA 转化为琥珀酸进入三羧酸(tricarboxylic acid, TCA)循环, 形成完整的 GABA 支路代谢网络, 既作为氮储存机制, 又参与氧化应激耐受性调控[15–16]。在葡萄酒发酵中, 酿酒酵母是麦汁中 GABA 积累的主要贡献者, 其 GABA 合成受碳源质量调控, UGA4 基因编码的 GABA 通透酶表达受 Uga3 和 Dal81 转录因子调控, 响应 GABA 诱导和碳氮源信号[16]。此外, 酿酒酵母在共发酵体系中可通过群体感应机制激活乳酸菌的 GABA 合成通路, 与屎肠球菌 AB157 以 4:1 比例共培养时, GABA 产量可达 6.57 g/L[17]。广东客家黄酒中红曲霉是红曲中的主要产 GABA 菌株, 液态发酵的产量显著高于同源酵母和植物乳杆菌[5], 并且这些真菌在黄酒发酵过程中协同提升 GABA 产量。红曲霉不仅能自身代谢产生 GABA, 还能通过糖化和酒化作用促进淀粉分解, 为其他菌群的代谢提供充足碳源, 促进其他微生物积累 GABA。从合成途径来看, 真菌主要通过两条途径合成 GABA: GABA 支路和腐胺途径[18]。腐胺途径是多胺代谢的重要分支, 真菌通过鸟氨酸脱羧酶催化鸟氨酸脱羧生成腐胺, 腐胺在二胺氧化酶作用下氧化产生 γ-氨基丁醛, 进一步氧化生成 GABA; 该途径在真菌中普遍存在, 与细胞壁完整性调控及逆境响应密切相关, 腐胺代谢产生的 GABA 可经琥珀酸半醛进入 TCA 循环, 实现碳氮资源的循环利用[19–20], 红曲霉主要通过 GAD 途径合成 GABA, TCA 循环产生的 α-酮戊二酸经谷氨酸脱氢酶催化生成 *L*-谷氨酸, 再经 GAD 催化发生不可逆的脱羧反应生成 GABA。Diez-Gutierrez 等[14]揭示红曲霉产 GABA 依赖于胞内谷氨酸在酸性诱导下经 GAD 催化脱羧, 并由反向转运蛋白将脱羧后产物排出胞内以缓解酸胁迫。可见, 红曲霉是酒发酵中产 GABA 的重要真菌, 其合成效率受到菌群间的协同作用及自身 GAD 途径的代谢调控, 而并非完全由自身因素影响。

2.2 代谢工程改造拓展的微生物来源

除发酵微生物产天然 GABA 外, 通过代谢工程、全细胞催化等现代生物技术改造菌株, 也被广泛应用于发酵食品 GABA 工业化生产, 成为新型生物来源。谷氨酸棒杆菌采用细胞表面展示方式将谷氨酸脱羧酶表达于细胞表面, 使其在适宜胞外酸性环境下催化 *L*-谷氨酸生成 GABA, 并通过基因编辑敲除 GABA 渗透酶基因, 阻断其再摄取, 配合发酵 pH 调控可显著提高 GABA 产量[11]。邹陈悦等[18]基于微生物源 GABA 的合成途径, 通过代谢工程改造谷氨酸棒杆菌、大肠杆菌等底盘微生物, 可显著提高微生物的 GABA 合成效率。全细胞催化法和微生物从头发酵法是目前合成 GABA 的两种新型合成方法, 全细胞催化法以表达 GAD 的完整细胞作为生物催化剂, 通过定向进化获得 pH 适应性突变体, 结合辅酶 PLP 自供系统构建和 GABA 分解代谢基因敲除, 以 *L*-谷氨酸或谷氨酸钠为底物进行高密度催化, GABA 产量可达 829.08 g/L, 生产强度达 40.94 $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$[21–23]。从头发酵法则通过系统代谢工程改造底盘微生物, 强化 TCA 循环中 α-酮戊二酸向谷氨酸的碳流, 阻断琥珀酸竞争通路, 并表达 pH 中性活性 GAD 突变体, 实现以葡萄糖等廉价碳源直接合成 GABA, 避免外源添加谷氨酸前体[24–25]。可见, GABA 生产已从自然发酵阶段向精准设计合成生物学过渡, 扩展了其工业化生产的生物来源。

上述天然发酵食品中已经分离得到大量产 GABA 野生菌株, 不同食品基质、菌株类型对应的 GABA 积累水平差异明显, 代表性优势菌株及其产量汇总见表 1。

表 1 发酵食品中分离出的优势菌株及其 GABA 产量

Table 1 Dominant strains isolated from fermented beverages and their GABA production

食品类型	发酵菌株	GABA 含量	参考文献
中国白酒	希氏乳杆菌	239.00 mg/L	[26]
广东客家红曲黄酒	红曲霉	41.87 mg/L	[5]
韩国米酒	乳酸杆菌	15.90 g/L	[27]
发酵羊奶	乳酸菌	200.00 mg/L	[28]
西班牙奶酪乳清发酵饮品	短乳杆菌	290.00 mg/L	[29]
共发酵葡萄酒/果酒	屎肠球菌+酿酒酵母	6570.00 mg/L	[17]
发酵橙汁	鼠李糖乳杆菌	700.00 mg/L	[30]
酸奶	短乳杆菌	1473.60 mg/L	[31]

3　GABA 的合成和代谢

3.1　GABA 分流

GABA 的合成和代谢途径早在 1970 年的一项涉及豚鼠细胞的研究中被具体阐明，由于其绕过 TCA 循环的两个步骤，且与呼吸链中的电子传递有关，因此被称为“GABA 分流”(图 3)[32]。GABA 分流是原核生物和真核生物中与抗氧化反应相关的保守通路，同时作为机体的能量来源，起到重要的防御功效在呼吸和 TCA 循环活动受损、活性氧等氧化产物种类增多时，GABA 可参与线粒体电子传递链，并提供还原型辅酶 I (Nicotinamide adenine dinucleotide, NADH)和琥珀酸[33–34]。

GABA 分流涉及 3 种酶：细胞质 GAD、线粒体 GABA 转氨酶(γ-aminobutyrate transaminase, GABA-T)和琥珀酸半醛脱氢酶(succinic semialdehyde dehydrogenase, SSADH)[35]。GABA 合成的第一步是谷氨酸脱氢酶催化 α-酮戊二酸进行转氨基反应，生成谷氨酸。第二步是由 GAD 催化的谷氨酸不可逆脱羧转化为 GABA，GAD 消耗质子并释放 CO_2。GABA 的分解始于 GABA-T 催化 GABA 转化为琥珀酸半醛(succinic semialdehyde, SSA)。SSA 随后被 SSADH 氧化，以琥珀酸的形式进入 TCA 循环，琥珀酸作为线粒体电子传递链的电子供体，是 TCA 循环中的关键物质。在植物、动物及微生物体内，γ-羟基丁酸脱氢酶，可将琥珀酸半醛转化为 γ-羟基丁酸[36]，该途径是 GABA 分流的保守分支，广泛存在于原核和真核生物中。

3.2　GAD 系统与代谢反应

在微生物细胞内，GABA 的合成主要依赖 GAD 系统。该系统是以乳酸菌为代表的微生物应对酸性环境的关键防御机制，受 *gadB*(编码胞内 GAD)和 *gadC*(编码谷氨酸/GABA 逆向转运蛋白)基因组成的操纵子调控。低 pH 是激活 GAD 系统最强、最特异的信号——当环境 pH 下降，细菌通过双组分信号转导系统感知酸胁迫，显著上调 *gad* 基因表达，在酶催化反应和转运蛋白跨膜运输两个层面协同作用，完成 GABA 合成与酸性胁迫防御，实现胞内外稳态调节[10,12]。

GAD 是以磷酸吡哆醛(pyridoxal phosphate, PLP)为辅酶的裂合酶，最适 pH 为 4.0~5.0，与乳酸发酵自然产酸过程相契合。其催化的不可逆 α-脱羧反应(L-谷氨酸 $+H^+ \rightarrow GABA+CO_2$)每消耗一个质子即可提高环境 pH，直接延缓胞内酸中毒，是微生物重要的酸耐受策略[10,12]。王世依等[2]报道，大肠杆菌、短乳杆菌等细菌源 GAD 对底物 L-谷氨酸的亲和性显著高于动植物来源，且最适 pH 偏酸性，这一特性使其在发酵体系中作用更高效。通过蛋白质工程改造 GAD 羧基端结构可使其最适 pH 向中性偏移，从而解决菌体生长与 GAD 酶活 pH 需求不匹配的问题。

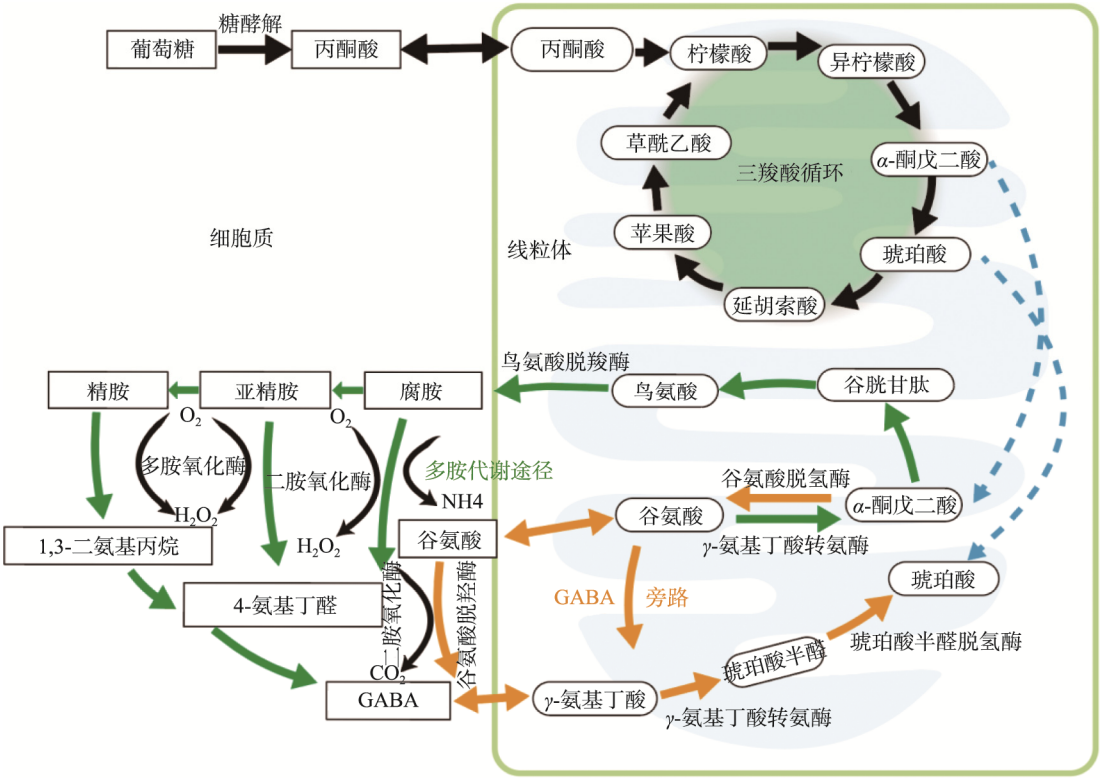


图 3　GABA 的分流通路图[32]

Fig.3　Diagram of GABA shunt pathway[32]

此外, GABA 的生物活性不仅限于 GAD 系统, 还涉及 GABA 旁路与 TCA 循环的耦合。植物和微生物可通过 GABA 转氨酶和琥珀酸半醛脱氢酶将 GABA 转化为琥珀酸进入 TCA 循环, 参与能量代谢并调节碳氮平衡[10,37]。微生物源 GABA 的合成受 GAD 酶、转运系统和全局调节因子等多层代谢调控[18]。

3.3 新型 GABA 合成代谢途径

研究已表明, 植物体内的腐胺等生物胺降解后生成的 4-氨基丁醛可以被氨基丁醛脱氢酶(aminobutyral dehydrogenase, AMADH)转化为 GABA。GABA 可以通过 GABA-T 和 SSADH 进入 TCA 循环[38], 这类代谢途径在生物学中通常被称为“多胺降解途径”或“GABA 支路的替代途径”, 它是继传统的 GAD 途径之外, 另一条重要的 GABA 生物合成途径。

GABA 的合成代谢还具有微生物共代谢介导的 GABA 合成新通路。Tan 等[17]发现乳酸菌能够将谷氨酰胺转化为谷氨酸, 而酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)或其他真菌(如红曲霉)通过膜结合型转氨酶(可能是 GABA-T 或其他特定转氨酶)将谷氨酸转化为 GABA。在此过程中, 酿酒酵母产生的乙醇作为信号分子, 能够改变乳酸菌细胞膜的流动性, 促进谷氨酸等底物的跨膜转运, 从而提高 GABA 的合成效率。该共代谢途径在传统混合发酵食品中广泛存在, 是天然发酵体系中 GABA 富集的重要机制。

此外, GABA 的合成代谢还存在利用非常规碳源的合成途径, Wei 等[39]利用甘油作为唯一碳源, 通过阻断 GABA 降解途径, 抑制乙酰辅酶 A 合成酶活性和琥珀酸转运蛋白表达, 并引入外源性的 GABA 合成酶(*gadB*), 来实现工程菌株 G7-1 的 GABA 富集量为 45.6 g/L, GABA 产率达到 0.4 g/g 甘油, 这是已报道低值甘油中的最高 GABA 含量。通过代谢工程将甘油直接转化为 GABA, 避免了对谷氨酸的依赖。该途径为工业发酵中利用低成本原料高效生产 GABA 提供了新方向, 已在功能性发酵饮品的工业化试制中得到应用。

4 GABA 的功能特性

GABA 作为发酵饮品中核心的生物活性物质, 具有神经调节与缓解应激、保护心血管、调节免疫与代谢等功能, 是当前功能性发酵食品的重要研究方向之一。

4.1 神经调节与应激缓解功能

GABA 核心功能是调节神经和环境应激。GABA 神经调节功能表现为缩短入睡时间、改善睡眠质量、并增加脑电图 α 波活性[40], 提示其良好的放松情绪和缓解压力作用。当食用含有 GABA 的发酵食品或提取物后, 体内表现显著的抗焦虑、抗抑郁的活性。近期开展的高质量随机对照试验已报道, GABA 在改善失眠、缓解焦虑方面确有积极作用[41–42]。另外, GABA 作用机制的研究已从最初的阻断血脑屏障, 转变为“肠-脑轴”间接性结构调节, 即膳食 GABA 可通过肠道神经系统将变化肠道菌群、免疫与炎症等调节信号传达给大脑, 进而调控情绪和应激反应。此外, 谢广发等[43]报道黄酒中 GABA 能提高葡萄糖磷酸酯酶的活力, 促进脑组织的新陈代谢并恢复脑细胞功能, 改善神经机能。

在畜禽养殖中, 夏天发生热应激会导致畜禽采食量减少、免疫力下降和生产性能降低。外源添加 GABA 可以有效改善热应激的影响, 与其调节下丘脑-垂体-肾上腺轴、降低血清皮质醇水平、调节血液生化指标、增强黏膜免疫等方式有关[44], 这也揭示了 GABA 跨物种的神经性应激管理普适性潜力。

4.2 心血管保护功能

研究已证实 GABA 具有降血压的作用[45], 与血管紧张素转换酶(angiotensin converting enzyme, ACE)有关。ACE 是血管紧张素系统中的关键酶, 可将无活性的血管紧张素 I 转化为具有强烈收缩血管的血管紧张素 II。GABA 能显著抑制 ACE 的活性, 可阻断血管紧张素 II 的生成, 从而防止血管收缩, 降低血压。一项随机双盲安慰剂对照试验研究显示, 轻度高血压患者每天食用 GABA 富集的白米 150 g, 持续 8 周, 其晨间收缩压较安慰剂组有明显改善[46]。丁一等[40]也证实连续 12 周每天摄入 20~120 mg GABA 可使临界高血压或轻度高血压患者血管收缩压降低。在老年糖尿病前期患者的研究中, 发现 GABA 与 IGF-1 具有协同交互关系, 当两者共同低表达时, 显著提高患者心血管发生的风险[3]。谢广发等[43]报道 GABA 作用于脊髓的血管运动中枢, 有效促进血管扩张, 并能抑制血管紧张素转化酶活力, 起到降低血压的作用。可见, GABA 并不是独立发挥心血管保护作用, 需要与其他内源性保护因子共同构成防御网络。

4.3 免疫与代谢调节

研究发现, GABA 不仅调节中枢神经系统, 也由胰岛 β 细胞合成和分解, 并通过自分泌和旁分泌方式, 发挥多重保护作用。GABA 能促进 β 细胞增殖、抑制细胞因子或药物诱导的 β 细胞凋亡、抑制胰高血糖素分泌, 同时调节 T 细胞的免疫反应, 从而在I型和II型糖尿病模型中显示出治疗功效, 这为开发基于 GABA 营养干预的糖尿病辅助治疗提供了一种新思路[18]。近年来还广泛关注 GABA 调控肝脏糖脂代谢。动物实验表明, GABA 可通过激活 PI3K/AKT 信号通路, 增加 AKT 磷酸化水平, 从而抑制糖异生关键酶的基因表达(如磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶 PEPCK), 降低肝脏葡萄糖输出, 改善胰岛素抵抗状态[47]。在脂质代谢方面, GABA 能够下调脂肪酸合成相关转录因子 FoxO1 的表达, 减少肝脏脂质沉积, 对非酒精性脂肪肝的预防和治疗显示

出潜在价值[47]。此外, GABA 与肠道菌群的互作关系成为代谢调节研究的新热点[48]。乳酸杆菌、双歧杆菌等肠道菌群能合成 GABA 的能力, 可通过肠-脑轴调节中枢神经系统功能, 膳食补充 GABA 可显著改变肠道菌群组成, 促进短链脂肪酸等代谢产物的生成[49]。这些短链脂肪酸可通过激活 G 蛋白偶联受体和抑制组蛋白去乙酰化酶等途径, 调节宿主能量代谢和免疫稳态[50]。这种“GABA-肠道菌群-宿主代谢”的三方互作机制, 为理解发酵食品中 GABA 的健康效应提供了全新的视角。

4.4　抗氧化与抗炎

GABA 还具有抗氧化、抗炎的潜力, 能够清除自由基并影响炎症信号通路。如, 在断奶仔猪日粮中添加 60 mg/kg GABA, 可显著提高血清超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性, 降低丙二醛浓度, 改善机体抗氧化状态[51]。同时 GABA 属于非密码氨基酸, 与牛磺酸、茶氨酸等相似, 即不参与蛋白质合成的氨基酸, 但具备神经调节、抗疲劳等作用[52]。有研究表明, GABA 能够抑制活性氧的产生, 清除自由基, 降低丙二醛浓度, 从而减轻氧化应激损伤[53]。在镉胁迫条件下, 外源 GABA 处理可通过调节抗氧化酶活性, 激活植物抗氧化防御系统[54]。GABA 的抗氧化机制涉及调控糖原合成酶激酶-3β 和核因子 E2 相关因子 2, 有助于维持细胞氧化还原稳态。在神经保护方面, GABA 能够调节巨噬细胞和小胶质细胞, 抑制 NF-κB 等炎症信号通路的激活, 减少炎症因子的释放, 从而发挥神经保护作用[53]。另外, 长期 GABA 补充可通过调节补体和神经炎症通路缓解焦虑, 显著逆转慢性应激诱导的白介素-10 和转化生长因子-β1 下降, 纠正炎症状态的失衡[55]。然而, 相比神经和心血管功能, GABA 在代谢性疾病及免疫调节方面的人体临床证据仍相对薄弱, 这也是未来需要重点研究方向。

5　GABA 的应用领域

5.1　功能性发酵食品开发

天然富集 GABA 的发酵食品是膳食补充 GABA 的重要载体。黄酒、米酒等传统发酵酒精饮品因富含 GABA 而备受关注, 谢广发等[43]报道黄酒中 GABA 具有改善神经机能的作用。在乳制品中, GABA 富集酸奶、奶酪等产品已实现商业化开发, Ushidee-Radzi 等[31]系统综述了 GABA 强化酸奶及冷冻酸奶的微生物合成、功能特性与健康效应。此外, 以乳酸菌发酵果蔬汁制备 GABA 功能性饮品也成为研究热点, 如植物乳杆菌发酵荔枝汁[56]GABA 含量可达 134 mg/100 mL, 酿酒酵母与植物乳杆菌共发酵桑葚饮料 GABA 产率达 2.42 g/L[57]。近年来, 功能性巧克力[58]等新型 GABA 富集食品的开发进一步拓展了发酵食品的应用边界。

5.2　食品添加剂与膳食补充剂

微生物发酵法生产的 GABA 已获批作为新食品原料或食品添加剂应用于各类产品中。通过代谢工程改造的谷氨酸棒杆菌、大肠杆菌等可实现高密度全细胞催化生产 GABA, 产量可达 829.08 g/L[24,39], 为工业化生产食品级 GABA 提供了技术支撑。Fashogbon 等[59]综述了微生物 GABA 合成在功能性食品和制药应用中的前景, 指出微生物 GABA 生产具有成本效益、可持续性和原位生产潜力等优势。

5.3　畜禽养殖与饲料工业

GABA 作为饲料添加剂在缓解畜禽热应激、改善生产性能方面具有重要应用价值。在奶牛日粮中添加瘤胃保护型 GABA, 可在热应激条件下降低直肠温度、提高产奶量、改善乳蛋白和乳糖含量[60]。在猪、鸡等畜禽日粮中添加 GABA, 可通过调节下丘脑-垂体-肾上腺轴、降低血清皮质醇水平, 有效缓解夏季热应激导致的采食量下降和免疫力降低问题[44]。此外, GABA 还可提高断奶仔猪血清超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性, 改善机体抗氧化状态, 在畜牧业中具有广阔的推广应用前景[50]。

6　结束语

基于文献计量学方法系统分析 2016—2025 年发酵食品中 GABA 研究成果, 阐明了其生物来源、代谢途径与功能特性, 揭示该领域的新发现与现存问题。目前国际上对发酵食品 GABA 关注度持续攀升, 近 10 年英文文献发文量大幅增长, 微生物学、食品工程与营养学学科间的交叉融合成为该领域核心发展趋势。

发酵食品中 GABA 生物来源已形成多元体系, 乳酸菌和红曲霉是产 GABA 的主导菌群, 代谢工程改造的谷氨酸棒杆菌等微生物则拓展了工业化生产的生物来源。GABA 合成代谢以 GAD 系统为核心, GABA 分流通路、微生物共代谢等新途径的发现, 丰富了 GABA 代谢调控的认知。发酵源 GABA 的功能从神经调节拓展至心血管保护、免疫与代谢调节等领域, 在改善睡眠、降血压、调节糖代谢等方面展现出显著潜力。

该领域虽已构建起完整的知识体系, 但基于现有文献分析, GABA 在检测方法统一性、肠道-系统作用机制深度、大规模人体临床验证方面、发酵富集效率待提升等方面仍有深化空间。未来研究需以跨学科融合为核心, 结合合成生物学与精准营养策略, 加快建立 GABA 检测标准, 深入解析其作用机制; 通过基因编辑优化高产菌株, 通过优化高效发酵工艺提升 GABA 富集效率; 同时开展大样本人体临床研究, 验证不同场景下的功能效果, 开发个性化功能性食品。

参考文献

[1] 孙宇, 辛明, 王燕, 等. 产 γ-氨基丁酸且具有降解亚硝酸盐能力的乳酸菌筛选及益生特性评价[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(8): 200–209.
Sun Yu, Xin Ming, Wang Yan, et al. Screening of lactic acid bacteria capable of producing γ-aminobutyric acid and degrading nitrite, and evaluation of their probiotic properties [J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(8): 200–209.

[2] 王世依, 赵毅雯, 贾田丽, 等. 微生物法合成 γ-氨基丁酸的研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(4): 94–101.
Wang Shiyi, Zhao Yiwen, Jia Tianli, et al. Progress in microbial synthesis of gamma-aminobutyric acid [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(4): 94–101.

[3] 赵玉玲, 黄婧, 叶文春. 血清 γ-氨基丁酸、胰岛素样生长因子-1 对老年糖尿病前期病人心血管事件风险的交互作用分析[J]. 实用老年医学, 2024, 38(8): 816–820.
Zhao Yuling, Huang Jing, Ye Wenchun. Interaction effects of serum levels of γ-aminobutyric acid and insulin-like growth factor-1 on cardiovascular event risk in elderly patients with prediabetes [J]. Practical Geriatrics, 2024, 38(8): 816–820.

[4] 许芮菁, 姜铖, 刘明川, 等. γ-氨基丁酸的检测方法及其功能性食品研究进展[J]. 食品工业, 2025, 46(2): 150–155.
Xu Ruijing, Jiang Cheng, Liu Mingchuan, et al. Research progress on detection method and functional food of y-aminobutyric acid [J]. The Food Industry, 2025, 46(2): 150–155.

[5] 黄敏欣. 广东客家黄酒产 γ-氨基丁酸的影响因素及代谢调控研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2016: 4.
Huang Minxin. Factors affecting γ-aminobutyric acid and its metabolic control in Guangdong *Hakka* rice wine [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2016: 4.

[6] Tuberoso C I G, Congiu F, Serreli G, et al. Determination of dansylated amino acids and biogenic amines in Cannonau and Vermentino wines by HPLC-FLD [J]. Food Chemistry, 2015, 175: 29–35.

[7] Han Mei, Liao Wenyan, Wu Shenmao, et al. Use of *Streptococcus thermophilus* for the *in situ* production of γ-aminobutyric acid-enriched fermented milk [J]. Journal of Dairy Science, 2020, 103(1): 98–105.

[8] Linares D M, O'Callaghan T F, O'Connor P M, et al. *Streptococcus thermophilus* APC151 strain is suitable for the manufacture of naturally GABA-enriched bioactive yogurt [J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 1876.

[9] Jena R, Choudhury P K. Lactic acid bacteria in fermented dairy foods: gamma-aminobutyric acid (GABA) production and its therapeutic implications [J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105276.

[10] Ayağ N, Dağdemir E, Çetin B, et al. Isolation and identification of lactic acid bacteria from artisanal Turkish cheeses, and evaluation of γ-aminobutyric acid (GABA) production potential [J]. International Dairy Journal, 2025, 161: 106132.

[11] 李豪倩, 史锋. 谷氨酸棒杆菌表面展示与代谢工程生产 γ-氨基丁酸[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(3): 65–74.
Li Haoqian, Shi Feng. Production of γ-aminobutyric acid by cell surface display and metabolic engineering of *Corynebacterium glutamicum* [J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(3): 65–74.

[12] Galli V, Venturi M, Mari E, et al. Gamma-aminobutyric acid (GABA) production in fermented milk by lactic acid bacteria isolated from spontaneous raw milk fermentation [J]. International Dairy Journal, 2022, 127: 105284.

[13] Feng Yao, Zhang Yu, Liu Caiyun, et al. Metabolism, application in the food industry, and enrichment strategies of gamma-aminobutyric acid [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 154: 104773.

[14] Diez-Gutiérrez L, San Vicente L, R Barrón L J, et al. Gamma-aminobutyric acid and probiotics: multiple health benefits and their future in the global functional food and nutraceuticals market [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103669.

[15] Wang Xiuwen, Mohamed H, Liu Qing, et al. The nitrogen regulator *AreA* modulates lipid metabolism through uga2 in *Mucor circinelloides* [J]. Fungal Biology, 2025, 129(6): 101616.

[16] Levi C E, Cardillo S B, Bertotti S, et al. GABA induction of the *Saccharomyces cerevisiae UGA4* gene depends on the quality of the carbon source: role of the key transcription factors acting in this process [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2012, 421(3): 572–577.

[17] Tan Xiao, Zhang Qing, Liu Jiali, et al. Enhanced γ-aminobutyric acid production by co-culture fermentation with *Enterococcus faecium* AB157 and *Saccharomyces cerevisiae* SC125 [J]. LWT, 2024, 208: 116739.

[18] 邹陈悦, 李滢, 刘书香, 等. 微生物源 γ-氨基丁酸生物合成及其代谢调控研究进展[J]. 微生物学报, 2026, 66(5): 2103–2116.
Zou Chenyue, Li Ying, Liu Shuxiang, et al. Research progress in the biosynthesis and metabolic regulation of microbial-derived γ-aminobutyric acid [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2026, 66(5): 2103–2116.

[19] Zhang Chong, Zhen Yongkang, Weng Yunan, et al. Research progress on the microbial metabolism and transport of polyamines and their roles in animal gut homeostasis [J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2025, 16(1): 57.

[20] Yi Qi, Park M J, Vo K T X, et al. Polyamines in plant-pathogen interactions: roles in defense mechanisms and pathogenicity with applications in fungicide development [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(20): 10927.

[21] Ke Chongrong, Yang Xinwei, Rao Huanxin, et al. Whole-cell conversion of l-glutamic acid into gamma-aminobutyric acid by metabolically engineered *Escherichia coli* [J]. SpringerPlus, 2016, 5(1): 591.

[22] Yang Xinwei, Huo Xiaojing, Tang Yaqian, et al. Integrating enzyme evolution and metabolic engineering to improve the productivity of *Γ*-aminobutyric acid by whole-cell biosynthesis in *Escherichia coli* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(11): 4656–4664.

[23] Song Chenshuo, Luo Jie, Qiao Jun, et al. pH-adaptive evolution of glutamate decarboxylase enables gamma-aminobutyric acid biosynthesis without pH control [J]. Bioresource Technology, 2026, 440: 133432.

[24] Park J Y, Park Y L, Choi T R, et al. Production of γ-aminobutyric acid from monosodium glutamate using *Escherichia coli* whole-cell biocatalysis with glutamate decarboxylase from *Lactobacillus brevis* KCTC 3498 [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2020, 37(12): 2225–2231.

[25] Sommer A, Pauli S, Kohlstedt M, et al. Metabolic engineering of *Corynebacterium glutamicum* for high-yield *de novo* biosynthesis of 5-aminovaleramide, a promising bio-based monomer [J]. Microbial Cell Factories, 2026, 25(1): 54.

[26] Hernandez-Tenorio F, Mejía-Rúa M, Marín-Palacio L D, et al. Advances in biotechnological GABA production: exploring microbial diversity, novel food substrates, and emerging market opportunities [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 27(1): 306.

[27] Choe J Y, Lim J S, Lee S P. Increased production of GABA in non-alcoholic Makgeolli by optimization of lactic acid fermentation using *Lactobacillus plantarum* [J]. Korean Journal of Food Preservation, 2019, 26(2): 157–164.

[28] Ramos I M, Poveda J M. Fermented sheep's milk enriched in gamma-amino butyric acid (GABA) by the addition of lactobacilli strains isolated from different food environments [J]. LWT, 2022, 163: 113581.

[29] Edalatian Dovom M R, Habibi Najafi M B, Rahnama Vosough P, et al. Screening of lactic acid bacteria strains isolated from Iranian traditional dairy products for GABA production and optimization by response surface methodology [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 440.

[30] Yin Shufeng, Wang Yiyao, Zhao Ruixue, et al. Screening of lactic acid bacteria and RSM-based optimization for enhancing γ-aminobutyric acid (GABA) accumulation in orange juice [J]. Foods, 2025, 15(1): 71.

[31] Ushidee-Radzi M A, Shin Yee C, Raja-Razali R B, et al. Advances in GABA-enriched yogurt and frozen yogurt: microbial biosynthesis, functional properties, and health perspectives-a comprehensive review [J]. Foods, 2025, 14(24): 4254.

[32] Zhang Qingli, Zhu Lei, Li Hailong, et al. Insights and progress on the biosynthesis, metabolism, and physiological functions of gamma-aminobutyric acid (GABA): a review [J]. PeerJ, 2024, 12: e18712.

[33] Carillo P. GABA shunt in durum wheat [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 100.

[34] Carillo P, Arena C, Modarelli G C, et al. Photosynthesis in *Ranunculus asiaticus* L. : the influence of the hybrid and the preparation procedure of tuberous roots [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 241.

[35] Li Juan, Chen Luting, Guo Feng, et al. The effects of GABAergic system under cerebral ischemia: spotlight on cognitive function [J]. Neural Plasticity, 2020, 2020: 8856722.

[36] Sarasa S B, Mahendran R, Muthusamy G, et al. A brief review on the non-protein amino acid, gamma-amino butyric acid (GABA): its production and role in microbes [J]. Current Microbiology, 2020, 77(4): 534–544.

[37] Puttegowda D, Jayaram L, Firdose N, et al. Plant-derived gamma-aminobutyric acid (GABA): role in stress responses, growth, metabolism, and therapeutic potential for neuropsychiatric disorders [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2025, 139: 102807.

[38] Hu Yixuan, Huang Xin, Xiao Qinglai, et al. Advances in plant GABA research: biological functions, synthesis mechanisms and regulatory pathways [J]. Plants, 2024, 13(20): 2891.

[39] Wei Liang, Zhao Jinhua, wang Yiran, et al. Engineering of *Corynebacterium glutamicum* for high-level γ-aminobutyric acid production from glycerol by dynamic metabolic control [J]. Metabolic Engineering, 2022, 69: 134–146.

[40] 丁一, 王佳宁, 丁海涛, 等. 食源性 γ-氨基丁酸与促进慢病人群健康研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(22): 30–42.
Ding Yi, Wang Jianing, Ding Haitao, et al. Health promotion of γ-aminobutyric acid supplements in chronic disease population [J]. Science & Technology Review, 2024, 42(22): 30–42.

[41] Guimarães A P, Seidel H, de Medeiros Pires L V, et al. GABA supplementation, increased heart-rate variability, emotional response, sleep efficiency and reduced depression in sedentary overweight women undergoing physical exercise: placebo-controlled, randomized clinical trial [J]. Journal of Dietary Supplements, 2024, 21(4): 512–526.

[42] Yoon S, Byun J I, Shin W C. Efficacy and safety of low-dose gamma-aminobutyric acid from unpolished rice germ as a health functional food for promoting sleep: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. Journal of Clinical Neurology, 2022, 18(4): 478–480.

[43] 谢广发, 张波, 王兰, 等. 中国黄酒中功能因子研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(14): 364–370.
Xie Guangfa, Zhang Bo, Wang Lan, et al. Research progress in functional factors in Huangjiu [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(14): 364–370.

[44] 袁志平, 罗军荣. γ-氨基丁酸在动物生产中抗热应激研究进展[J]. 畜牧与兽医, 2016, 48(6): 137–141.
Yuan Zhiping, Luo Junrong. Research progress of γ-aminobutyric acid in heat stress resistance of animal production [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2016, 48(6): 137–141.

[45] 林智, 大森正司. γ-氨基丁酸茶成分对大鼠血管紧张素 I 转换酶(ACE)活性的影响[J]. 茶叶科学, 2002, 22(1): 43–46.
Lin Zhi, Da Senzhengsi. Effects of gabaron tea components on angiotensioni-converting enzyme activity in rat [J]. Journal of Tea Science, 2002, 22(1): 43–46.

[46] Nishimura M, Yoshida S I, Haramoto M, et al. Effects of white rice containing enriched gamma-aminobutyric acid on blood pressure [J]. Journal of Traditional and Complementary Medicine, 2016, 6(1): 66–71.

[47] Chen Qi, Gao Yuanyuan, Yang Fengying, et al. Angiotensin-converting enzyme 2 improves hepatic insulin resistance by regulating GABAergic signaling in the liver [J]. Journal of Biological Chemistry, 2022, 298(12): 102603.

[48] Reynolds A, Glenn E, Lavoie B, et al. Plant-derived bioactives, the gut-brain axis, and neurodegenerative diseases: mechanistic roles of diet-microbiota interactions [J]. Frontiers in Neuroscience, 2026, 20: 1815972.

[49] Bian Jing, Bai Jinzhu. The bridging role of gut microbiota-derived metabolites in neuropathic pain comorbid with anxiety [J]. Frontiers in Neuroscience, 2026, 20: 1752839.

[50] Feng Shuo, Wang Jiangyan, Si Xinyu, et al. Washed microbiota transplantation: candidates for a novel strategy for ameliorating autism spectrum disorder [J]. Frontiers in Microbiology, 2025, 16: 1688325.

[51] 杨兵, 夏先林, 胡忠泽, 等. γ-氨基丁酸对断奶仔猪抗氧化性能、 养分代谢和免疫功能的影响[J]. 饲料工业, 2022, 43(19): 36–40.
Yang Bing, Xia Xianlin, Hu Zhongze, et al. Effects of γ-aminobutyric acid on antioxidant properties, nutrients metabolism and immunity in weaned piglets [J]. Feed Industry, 2022, 43(19): 36–40.

[52] 楼秀余. 几种具有神经调节作用的“非密码”氨基酸[J]. 中国生化药物杂志, 2012, 32(2): 202–204.
Lou Xiuyu. Noncoded amino acids in neural regulation [J]. Chinese Journal of Biochemical Pharmaceutics, 2012, 32(2): 202–204.

[53] Tang Zhenjie, Huang Gangliang, Huang Hualiang. Ultrasonic-assisted extraction, analysis and properties of purple mangosteen scarfskin polysaccharide and its acetylated derivative [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 109: 107010.

[54] Geng Wan, Zhang Yangyang, Li Caihua, et al. Effect of exogenous γ-aminobutyric acid (GABA) on the growth, photosynthetic pigment, antioxidant and GABA metabolism of *Festuca arundinacea* (tall fescues) under cadmium stress [J]. Plants, 2025, 14(3): 383.

[55] Xu Jiyi, Ge Ziyu, Wang Han, et al. Long-term GABA supplementation mitigates anxiety by modulating complement and neuroinflammatory pathways [J]. npj Science of Food, 2025, 9: 60.

[56] Wang Dongwei, Wang Yao, Lan Haibo, et al. Enhanced production of γ-aminobutyric acid in *Litchi* juice fermented by *Lactobacillus plantarum* HU-C2W [J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101155.

[57] Zhang Qing, Sun Qing, Tan Xiao, 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, 2020, 129(4): 447–453.

[58] Ozer M, Ozturk B, Hayaloglu A A, et al. Development of a functional chocolate using gamma-amino butyric acid producer Lacticaseibacillus rhamnosus NRRL B-442 [J]. Food Bioscience, 2022, 47: 101678.

[59] Fashogbon R O, Samson O J, Awotundun T A, et al. Microbial gamma-aminobutyric acid synthesis: a promising approach for functional food and pharmaceutical applications [J]. Letters in Applied Microbiology, 2024, 77(12): ovae122.

[60] Luo Hongzhen, Liu Zheng, Xie Fang, et al. Microbial production of gamma-aminobutyric acid: applications, state-of-the-art achievements, and future perspectives [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2021, 41(4): 491–512.

(责任编辑: 曹岱琳 蔡世佳)