DOI:10.12441/spyswjs.20241209001 [文章编号] 1673-1689(2025)06-0153-09

富含γ-氨基丁酸的乳酸菌发酵乳的制备及其抗运动性疲劳效果研究

刘 冬[1] 杨雨宁[2] 窦芳菲[2] 李玉星[2] 鞠明海[1*]

(1.绥化学院体育学院,黑龙江 绥化 152001;2.东北农业大学乳品科学教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:【目的】制备富含γ-氨基丁酸(GABA)的乳酸菌发酵乳并探究其抗运动性疲劳效果。**【方法】**筛选高产GABA乳酸菌,将其与商业发酵剂共同发酵酸奶。通过4周的力竭游泳训练建立运动性疲劳小鼠模型,4周后检测各组小鼠力竭游泳时间、血清生化指标、抗氧化指标以及储能物质含量,对数据进行处理分析。**【结果】**筛选出植物乳植杆菌LP-5为酸奶发酵所用菌株,其GABA产量可达到(1.340±0.003) g/L。所得发酵乳成品滴定酸度为(46.29±2.01) ºT,菌落浓度为2.18×10^9 CFU/mL,GABA质量浓度为(1.780±0.011) g/L。与发酵初始相比,多种游离氨基酸质量分数显著升高(P<0.05)。对照组与模型组疲劳相关各项指标差异极显著(P<0.01)。与模型组相比,商业发酵剂组和商业发酵剂+植物乳植杆菌LP-5小鼠的小鼠力竭游泳时间极显著增加(P<0.01),血清中的肌酸激酶(CK)、乳酸脱氢酶(LDH)的酶活力、血乳酸(BLA)的质量浓度以及血尿素氮(BUN)的浓度极显著下降(P<0.01),抗氧化物质超氧化物歧化酶(SOD)酶活力极显著上升(P<0.01)、过氧化产物丙二醛(MDA)的浓度极显著下降(P<0.01),储能物质肝、肌糖原质量分数极显著上升(P<0.01),且市售酸奶发酵剂+植物乳植杆菌LP-5组抗疲劳效果更好。**【结论】**制备富含GABA的乳酸菌发酵乳对运动性疲劳模型小鼠具有显著的抗疲劳效果,其中市售酸奶发酵剂+植物乳植杆菌LP-5组效果最显著。

关键词:γ-氨基丁酸;乳酸菌;发酵乳;运动性疲劳

Preparation and Anti-exercise Fatigue Effect Evaluation of γ-Aminobutyric Acid-enriched Milk Fermented with Lactic Acid Bacteria

LIU Dong[1] *YANG Yuning*[2] *DOU Fangfei*[2] *LI Yuxing*[2] *JU Minghai*[1*]

(1. Physical Education College, Suihua University, Suihua 152001, China; 2. Key Laboratory of Dairy Science, Ministry of Education, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to prepare γ-aminobutyric acid (GABA)-enriched milk fermented with lactic acid bacteria and evaluate its anti-exercise fatigue effect. [**Method**] High GABA-producing lactic acid bacteria were selected and used to ferment milk with a commercial starter culture. A mouse model of exercise fatigue was established by four weeks of exhaustive swimming training. After four weeks, the exhaustive swimming time, serum biochemical indicators, antioxidant indicators, and energy storage substance levels were measured and analyzed. [**Result**] *Lactobacillus plantarum* (*L. plantarum*) LP-5 was selected as the strain for fermentation, and its GABA yield reached (1.340±0.003) g/L. The fermented milk showed the titratable acidity of (46.29±2.01) ºT, the colony count of 2.18×10^9 CFU/mL, and the GABA mass concentration of (1.780±0.011) g/L. Compared with that at the initial fermentation, the fermented milk showed increased content of various free amino acids (P<0.05). Differences were observed in the fatigue-related indicators between the control and model groups (P<0.01).

基金项目:黑龙江省教育科学规划重点项目(GJB1320435)。

通信作者:鞠明海(1977—),男,硕士,教授,硕士研究生导师,主要从事运动表现方面研究。E-mail: juminghai@163.com

收稿日期:2024-12-09 **修回日期:**2025-04-02

Compared with the model group, the commercial starter culture group and the commercial starter culture + *L. plantarum* LP-5 group exhibited increases in swimming exhaustion time (P<0.01) and decreases in activities of creatine kinase and lactate dehydrogenase in the serum, mass concentration of blood lactate, and concentration of blood urea nitrogen (P<0.01). In addition, the two groups showcased increased activity of superoxide dismutase (P<0.01), decreased concentration of malondialdehyde (P<0.01), and increased mass fractions of glycogen in the liver and muscle (P<0.01). Moreover, the commercial starter culture + *L. plantarum* LP-5 group showed better anti-fatigue effects. [**Conclusion**] The GABA-enriched milk fermented with lactic acid bacteria has significant anti-exercise fatigue effects in mice, with the commercial starter culture + *L. plantarum* LP-5 group showing the most significant effect.

Keywords: γ-aminobutyric acid; lactic acid bateria; fermented milk; exercise fatigue

运动常作为人们增强免疫力和延长寿命的手段，大量试验证明，运动可改善慢性疾病以及与免疫系统相关的疾病[1]。但高强度或长时间的运动易带来运动性疲劳，并伴随工作效率和运动表现的降低，尤其会对高体力需求群体的生活质量产生负面影响[2]。根据疲劳部位和产生疲劳的原因，可将运动性疲劳分为两类：中枢性疲劳和外周性疲劳。中枢性疲劳的引发机制相对复杂，Xu等[3]进行了小鼠行为学测试等试验，证明一种抗疲劳的中药煎剂是通过GABA/Glu通路发挥作用的。对于外周性疲劳，能量供应不足、代谢物积累和自由基攻击等是其主要作用机制[4-5]。虽然免疫刺激剂和抗组胺药等药物可缓解以及治疗与疲劳相关的疾病，但存在副作用大、有效时间短、依从性低等缺点[6]。因此，已有不少研究者开始研究利用天然来源的低毒性抗疲劳补充剂作为抗疲劳药物的替代品[7]。

GABA是广泛分布于动植物和微生物中的一种非蛋白质氨基酸[8-9]，具有改善失眠[10]和抑郁[11]、增强免疫力[12]、缓解焦虑和更年期综合征、调节血压、对抗肥胖、改善视觉皮质等功能[13]。近年来，GABA的抗疲劳作用逐渐受到研究者的关注。Chen等[14]从桑叶中分离出GABA，并证明了其可以显著提高小鼠的平均负重力竭游泳时间。顾坤[15]详细阐述了GABA与运动性疲劳之间的相关性。

微生物发酵是生产GABA的常用方式[16]，目前研究关注点多在如何提高乳酸菌GABA产量[17-18]，但GABA抗疲劳类功能型的发酵乳产品研究开发还较为少见。以高产GABA乳酸菌制备富含GABA发酵乳，可同时发挥益生菌本身及其代谢产物GABA对人体营养代谢和健康的双重有益作用[19]，具有一定的市场前景。

作者筛选出一株高产GABA的乳酸菌用于发酵脱脂乳来制备发酵乳，通过建立运动性疲劳小鼠模型，重点评价试验中小鼠力竭游泳时间、血清、肌肉和肝脏相关指标，探究富含GABA的发酵乳对小鼠运动性疲劳的缓解作用，以期为开发天然来源的抗疲劳补充剂提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

1.1.1 试验材料

菌株：由东北农业大学乳品重点实验室提供；YO-MIX 883直投式发酵剂（含有*Streptococcus thermophilus*和*Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus*）：Danisco有限公司；GABA标准品（纯度≥99%）：美国Sigma公司；甲醇：色谱级，山东禹王和天下新材料有限公司；乙腈：色谱级，德国默克公司；胰蛋白胨、蛋白胨、酵母浸粉、牛肉膏：分析纯，北京奥博星生物技术有限责任公司；乙酸钠、葡萄糖、吐温-80：分析纯，天津市瑞金特化学品有限公司；柠檬酸氢二铵：分析纯，天津市天力化学试剂有限公司；磷酸氢二钾、硫酸镁：分析纯，福晨（天津）化学试剂有限公司；琼脂粉：分析纯，北京兰杰柯科技有限公司；硫酸锰：分析纯，天津市天力化学试剂有限公司。CK、BLA、BUN、SOD、MDA、LDH含量测定试剂盒及肝、肌糖原检测试剂盒：生化级，广西南宁美智生物科技有限公司。

1.1.2 实验动物

SPF级雄性8周龄C57BL/6N小鼠：北京维通利华实验动物技术有限公司（生产许可证号：SCXK（京）2016-0006）。试验中所有动物操作均按照东北农业大学《实验动物管理条例》进行，经东北农业大学动物伦理委员会批准，动物伦理号：NEAUEC202404121。

1.2　主要仪器与设备

电子分析天平：SQP型，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；台式高速冷冻离心机：TGL-16M型，上海卢湘仪离心机仪器有限公司；超净工作台：BCN-1360B型，北京东联哈尔仪器公司；高压灭菌锅：MLS-3751L-PC型，日本HIRAYAMA公司；高效液相色谱仪（HPLC）：LC20型，日本Shimadzu（岛津）公司；pH计：S210型，美国Mettler Toledo公司；紫外可见分光光度计：UV-4802型，美国Molecular Devices公司；高效氨基酸分析仪：L-8900型，日本日立高新技术公司。

1.3　方法

1.3.1　菌株培养

试验菌株在MRS培养基中加入菌株并在37 ℃下厌氧培养18 h，试验之前进行传代培养2次。4 ℃下于6 000 *g*离心10 min，用无菌磷酸盐缓冲液（PBS）洗涤3次，以1×10^8 CFU/mL的菌落浓度重悬于PBS缓冲液中。

1.3.2　菌株产GABA能力测定

采用HPLC测定各菌株的产GABA能力[20-21]，参照马牧然[22]的试验方法及梯度洗脱条件。以GABA质量浓度为横坐标，峰面积为纵坐标，绘制标准曲线。分别配制流动相A、B、C、D溶液及140 g/L三乙胺乙腈溶液，将菌液于12 000 r/min离心3 min，取上清液200.0 μL，分别加入100.0 μL三乙胺乙腈溶液和100.0 μL PITC乙腈溶液，静置1 h后加入400.0 μL正己烷，混匀后静置10 min，取下层溶液过滤至进样瓶，加入超纯水至1.0 mL，测定结果。

1.3.3　富含GABA发酵乳制备及成品指标检测

脱脂乳粉与适量去离子水混匀，配制成100 g/L的乳液，加入30 g/L的葡萄糖，巴氏杀菌（95 ℃、10 min）后冷却备用。将活化的植物乳植杆菌LP-5菌液离心收集菌泥，并调整菌落浓度为5×10^8 CFU/mL备用。商业发酵剂组：接种体积分数为2%的商业发酵剂于脱脂乳；商业发酵剂组+植物乳植杆菌LP-5组：接种体积分数为2%的商业发酵剂和1%植物乳植杆菌LP-5（5×10^8 CFU/mL）于脱脂乳，置于37 ℃恒温发酵，每隔2.5 h取样，至发酵终点取出后置于4 ℃保存[23]。

发酵乳滴定酸度和菌落浓度的测定分别参照GB 5009.239—2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》[24]和GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》[25]。

对发酵乳进行预处理，取发酵好的发酵乳5 mL，12 000 r/min离心20 min，重复2次；吸出上清液，放到干净的EP管中，加入上清液一半体积的1 mol/L的醋酸锌溶液，振荡混匀1 min；再加入上清液一半体积的0.25 mol/L的亚铁氰化钾溶液，振荡混匀1 min；于10 000 r/min离心10 min；取上清液1 mL用0.45 μm的滤膜过滤，存于4 ℃待测。后续采用HPLC法检测GABA质量浓度，步骤参照Fu等[12]的方法。

参照Yang等[26]的方法，使用氨基酸分析仪对发酵乳成品中各类游离氨基酸质量分数进行检测。具体步骤如下：将2 mL待测样品与等体积的50 g/L磺基水杨酸振荡混匀，以1 500 r/min离心20 min。将上清液转移至新离心管中避光静置1 h，用0.22 μm滤膜过滤后备用。氨基酸分析仪色谱条件设置如下：离子交换色谱柱4.6 mm×60 mm，离子交换色谱柱柱温57 ℃，色谱柱温度保持在135 ℃，泵1与泵2的流量分别设定为0.45、0.35 mL/min，进样量为20 μL。紫外检测器设置如下：脯氨酸在440 nm处测吸光度，其他氨基酸在570 nm处测吸光度[27-28]，设置3组平行。游离氨基酸质量分数按照式（1）计算。

$$w=\frac{5\times10^{-6}\times C\times V\times F\times M}{m} \quad (1)$$

式中：

w——游离氨基酸质量分数，g/100 g；

C——游离氨基酸质量浓度，ng/mL；

V——样品体积，mL；

F——稀释倍数；

M——游离氨基酸摩尔质量，g/moL；

m——发酵乳质量，mg。

1.3.4　动物试验

试验前对所有小鼠进行游泳能力测试，将游泳能力不佳的小鼠排除在外[29]。将小鼠分为4组，分别为对照组、模型组、商业发酵剂组、商业发酵剂+植物乳植杆菌LP-5组，每组10只。试验前小鼠适应环境一周，环境中设置温度为（25±2）℃，光照/暗循环12 h，在此期间，小鼠可自由饮食与进水。试验步骤[30]如下：试验期间不对对照组小鼠进行疲

劳模型的诱导，非对照组小鼠在第一周进行3组30 min的游泳运动。将小鼠置于游泳池（0.5 m×0.5 m×0.4 m）中，允许其自由游泳。当小鼠无力，在水中自由漂浮时，休息15 s后，用玻璃棒搅拌水，督促小鼠继续游泳30 min，直至小鼠完全筋疲力尽，沉入水中，取出小鼠停止运动，并迅速擦干。第2~4周，游泳时间减少到10 min，每周3次，游泳过程中在老鼠尾巴上系一根相当于老鼠体质量5%的铅丝。在此期间，市售发酵剂组和市售酸奶发酵剂+植物乳植杆菌LP-5组每日分别灌胃0.5 mL的发酵乳，对照组和模型组每日灌胃相同剂量的生理盐水。第4周末在最后1次灌胃发酵乳后30 min，小鼠将进行力竭游泳试验。先给每只老鼠称体质量，然后将小鼠置于游泳池中进行游泳疲劳试验。当小鼠在水下停留至少10 s，记录到力尽时的总游泳时间。

游泳竭力试验结束后，小鼠腹腔注射20 g/L的戊巴比妥钠（40 mg/kg），完全麻醉后眼眶采血，4 ℃于4 000 r/min离心10 min，收集血清，−80 ℃保存备用。采集血液后，对小鼠实施安乐死并进行解剖，分别取肝脏和骨骼肌。

1.3.5 血清生化指标及肌、肝糖原质量分数的检测

按照检测试剂盒说明书进行规范操作，检测血清CK的酶活力、BLA质量浓度、LDH酶活力、BUN浓度、SOD酶活力以及MDA浓度。肝脏和骨骼肌用PBS缓冲液均质处理。13 000 r/min离心15 min，收集上清液，按照试剂盒说明书测定肝糖原和肌糖原质量分数[31]。

1.3.6 数据统计与分析

试验结果采用平均值±标准差表示，并采用IBM SPSS Statistics 26软件进行单因素方差分析，采用单因素ANOVA进行显著性差异分析。其中，$P<0.05$表示差异显著，$P<0.01$表示差异极显著。采用Graphpad Pism9.5软件作图。

2 结果与讨论

2.1 高产GABA乳酸菌筛选

从作者所在实验室保藏的14种菌株中筛选高产GABA乳酸菌，GABA产量见表1。菌株LP-5的GABA产量显著高于其他乳酸菌菌株，其GABA产量为（1.340±0.003）g/L，因此选择该菌株为后续发酵菌株。

表1 14株乳酸菌的GABA产量

Table 1 GABA yields of 14 strains of lactic acid bacteria

菌株	GABA质量浓度/（g/L）	菌株	GABA质量浓度/（g/L）
植物乳植杆菌LP-9	0.745±0.002^{e}	植物乳植杆菌LP-5	1.340±0.003^{a}
嗜酸乳杆菌LA-9	0.443±0.001^{g}	植物乳植杆菌LP-24	0.734±0.005^{e}
嗜酸乳杆菌LA10	0.342±0.001^{i}	嗜酸乳杆菌LA-32	0.735±0.003^{e}
嗜酸乳杆菌LA-5	0.702±0.002^{f}	植物乳植杆菌LP-21	0.772±0.003^{d}
粪肠球菌Y-91	0.941±0.001^{b}	植物乳植杆菌LP-44	0.328±0.004^{j}
粪肠球菌Y-32	0.339±0.001^{ij}	植物乳植杆菌LP-17	0.807±0.002^{c}
植物乳植杆菌v-20	0.741±0.003^{e}	植物乳植杆菌LP-8	0.411±0.011^{h}

注：不同字母代表组间差异显著，$P<0.05$。

2.2 发酵乳相关指标

发酵乳通过活菌对乳制品进行发酵和酸化制成，其酸度值、菌落浓度可直接影响发酵乳的品质与特性[32]。对制备的发酵乳酸度、菌落浓度以及GABA质量浓度进行测定，结果见表2。B组与A组相比，发酵乳的酸度显著升高（$P<0.05$），菌落浓度显著升高（$P<0.01$），表明在该发酵乳体系中，发酵剂菌株与植物乳植杆菌LP-5呈现良好的共生关系[33]。GABA质量浓度显著升高（$P<0.01$），表明植物乳植杆菌LP-5在该发酵乳体系具有良好的产GABA能力。

表2 发酵乳相关指标

Table 2 Indicators of fermented milk

组别	酸度/°T	菌落浓度/（CFU/mL）	GABA质量浓度/（g/L）
A	42.26±1.23^{b}	1.63×10^{8b}	0.541±0.003^{b}
B	46.29±2.01^{a}	2.18×10^{9a}	1.780±0.011^{a}

注：A为商业发酵剂组；B为商业发酵剂组+植物乳植杆菌LP-5组。同列不同字母表示组间差异显著，$P<0.05$。

发酵乳富含多种营养元素，以生物可利用的形式提供大量钙，同时是磷、钾、维生素A、维生素B_2和维生素B_{12}的良好来源[34]，并提供高生物价值的蛋白质和必需脂肪酸。因此，酸奶是一种营养丰富的食品，也是一种优良的益生菌载体[35]。

与牛奶中的蛋白质相比，酸奶中的蛋白质降解为氨基酸和肽[36-37]，更有利于宿主的消化和吸收。因此分别测定了发酵乳体系发酵初始与发酵结束时的游离氨基酸的质量分数并分析其变化，结果见表3。在发酵乳体系中共检测到17种游离

氨基酸，发酵结束时组氨酸等多种游离氨基酸质量分数与发酵组初始相比显著升高（P<0.05），这表明市售酸奶发酵剂+植物乳植杆菌LP-5发酵可提升发酵乳的营养价值。

表3　游离氨基酸质量分数变化

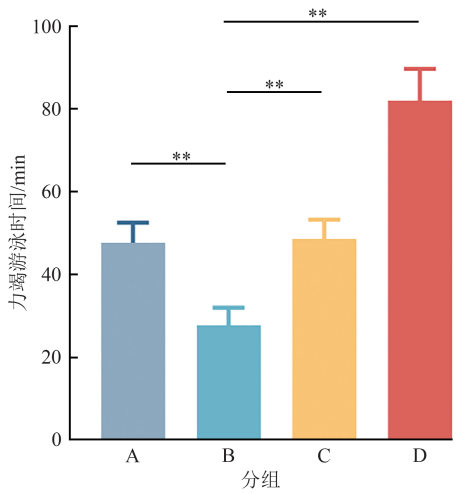
Table 3　Mass concentrations changes of free amino acids in fermented milk　　单位：g/100 g

游离氨基酸	发酵初始质量分数	发酵结束质量分数
天门冬氨酸	0.41±0.05	0.47±0.04
谷氨酸	1.36±0.02	1.21±0.03
丝氨酸	0.41±0.03	0.43±0.03
甘氨酸	0.38±0.07	0.29±0.04
组氨酸	0.17±0.02	0.36±0.05
精氨酸	0.37±0.02	0.39±0.01
苏氨酸	0.34±0.03	0.38±0.02
丙氨酸	0.23±0.02	0.34±0.01
脯氨酸	0.21±0.03	0.54±0.06
酪氨酸	0.43±0.01	0.60±0.07
缬氨酸	0.28±0.06	0.50±0.07
异亮氨酸	0.31±0.02	0.41±0.03
亮氨酸	0.36±0.03	0.63±0.05
苯丙氨酸	0.44±0.04	0.47±0.07
赖氨酸	0.34±0.02	0.49±0.04
蛋氨酸	0.46±0.05	0.42±0.01
胱氨酸	0.43±0.05	0.56±0.04

2.3　抗运动性疲劳相关指标结果

2.3.1　富含GABA发酵乳对运动性疲劳小鼠力竭游泳时间的影响

力竭游泳试验是反映运动耐力和药物抗疲劳效果的经典研究方法[38]。如图1所示，在第4周周末进行的小鼠力竭游泳测试中，A组、B组、C组、D组小鼠的力竭游泳时间分别是（47.69±4.84）、（27.80±4.27）、（48.62±4.68）、（81.94±7.65）min。与A组相比，B组的最终力竭游泳时间减少了41.71%（P<0.01），表明长期高强度运动对小鼠疲劳造成了显著影响。与B组相比，C组小鼠最终游泳力竭时间没有显著变化（P=0.981），而D组小鼠的最终游泳力竭时间增长了54.14 min（P<0.01），达到（81.94±7.65）min。结果表明所制备的富含GABA的发酵乳可延长运动性疲劳小鼠的力竭游泳时间，具有一定的抗疲劳与增强运动耐力活性。该结果与丁园[39]的测试结果一致。



A—对照组；B—模型组；C—商业发酵剂组；D—商业发酵剂+植物乳植杆菌LP-5组；*—差异显著（P<0.05），**—差异极显著（P<0.01）。

图1　富含GABA发酵乳对运动性疲劳小鼠力竭游泳时间的影响

Fig. 1　Effect of GABA-enriched fermented milk on exhaustive swimming time in the mouse model of exercise fatigue

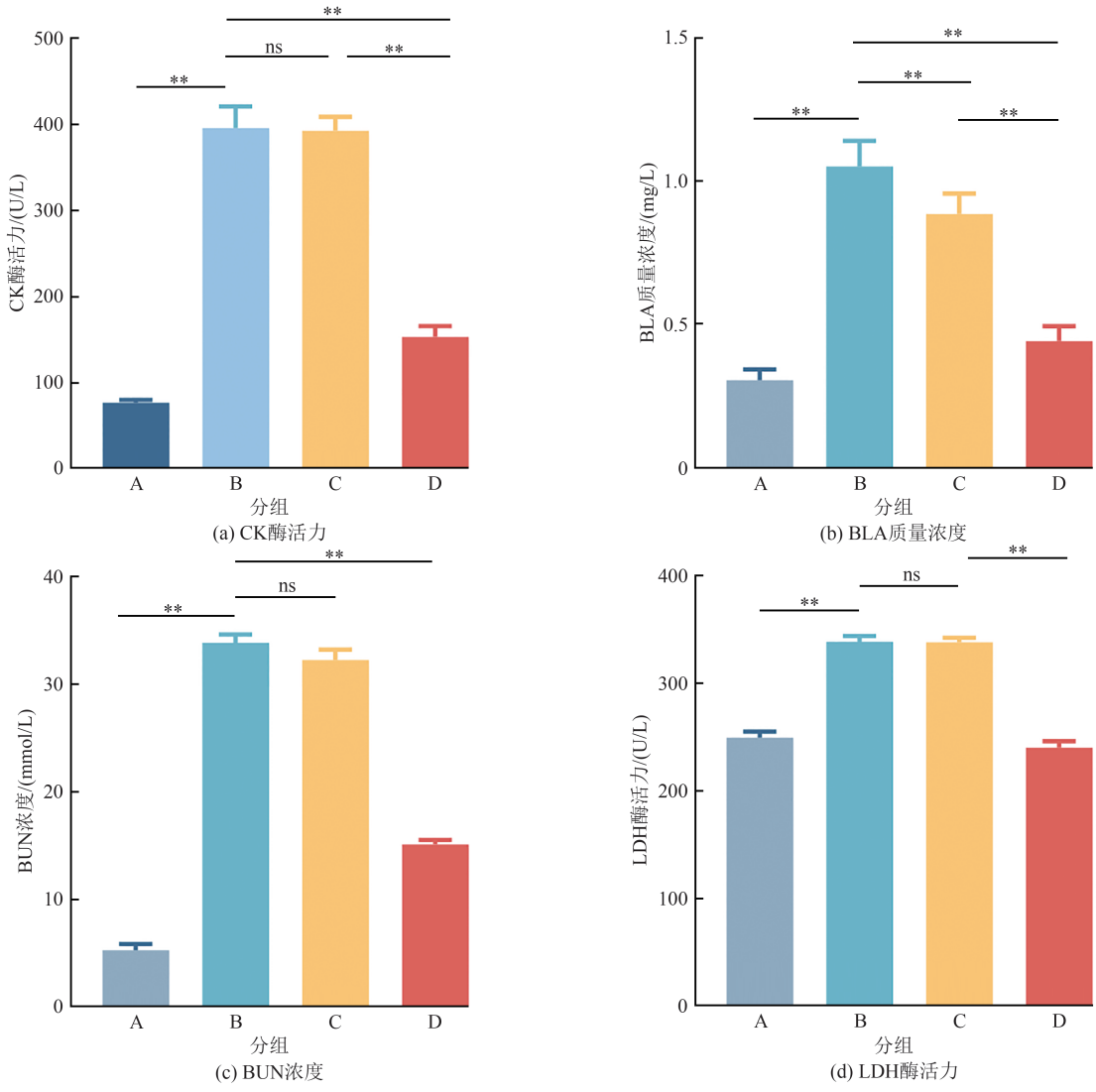
2.3.2　富含GABA发酵乳对运动性疲劳小鼠血清生化指标的影响

剧烈或过度运动会影响机体代谢[40]，导致有氧能量供应转化为厌氧糖酵解，造成乳酸、氨和其他厌氧发酵产物的大量积累。这些代谢物会扰乱酸碱稳态，导致细胞内微环境失衡，从而诱发疲劳。BLA、BUN是剧烈运动过程中由于无氧呼吸所产生的代谢产物，CK和LDH为运动过程中由于肌肉组织损伤而渗透入血液中的物质，这些物质的含量一定程度上反映了疲劳的程度。

如图2所示，与A组相比，建立了运动性疲劳模型的3组小鼠血清中的CK、BLA、BUN、LDH的生化指标测量值分别上升了414.70%、243.28%、535.56%、35.64%（P<0.01）。与B组和C组相比较，D组发酵乳具有显著降低血清生化指标的效果。这些结果表明，商业发酵剂组+植物乳植杆菌LP-5发酵乳在清除运动疲劳代谢产物方面具有优良特性。

2.3.3　富含GABA发酵乳对运动性疲劳小鼠抗氧化指标的影响

自由基攻击是指由于厌氧发酵增加了氧自由基水平[41-42]，破坏细胞膜的流动性和通透性[43]，导致组织损伤与氧化应激，从而引起疲劳。SOD是一种抗氧化物质，可以将细胞内产生的超氧自由基转



A—对照组；B—模型组；C—商业发酵剂组；D—商业发酵剂+植物乳植杆菌 LP-5 组；*—差异显著（P<0.05）；**—差异极显著（P<0.01）；ns—无显著性差异。

图 2　富含 GABA 发酵乳对运动性疲劳小鼠血清生化指标的影响

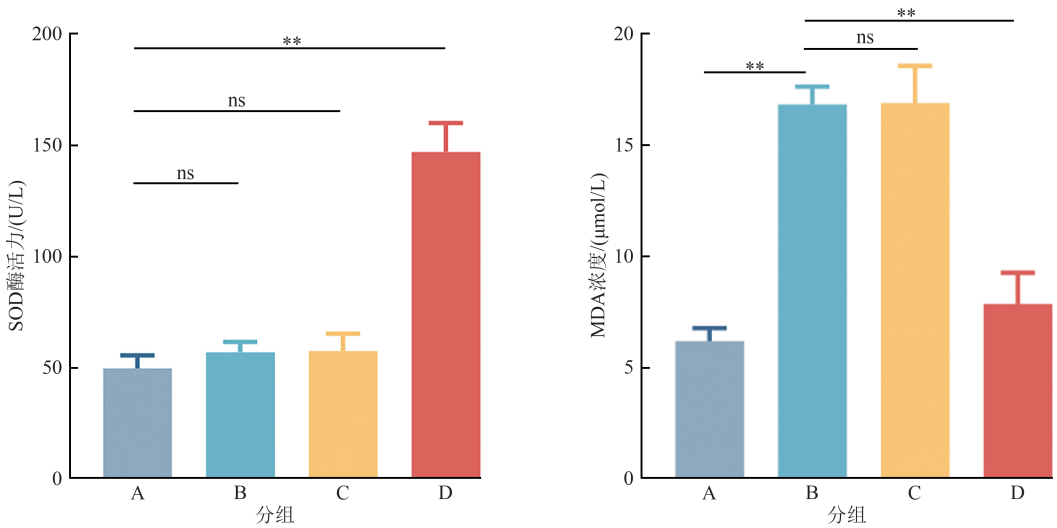
Fig. 2　Effects of GABA-enriched fermented milk on serum biochemical indicators in the mouse model of exercise fatigue

化为氧气和过氧化氢，从而减少细胞内的氧化应激和氧化损伤[43]。而 MDA 是细胞内氧化应激过程中产生的有毒代谢产物。因此上述 2 种物质的水平可以在一定程度上反映细胞的过氧化程度。

如图 3 所示，A、B、C 组小鼠血清中的 SOD 酶活力无显著差异（P>0.05），而 D 组与以上 3 组小鼠相比，血清中 SOD 酶活力极显著上升（P<0.01），其中 D 组小鼠的 SOD 酶活力比模型组高 89.77 U/L；与对照组相比，建立运动性疲劳模型的 3 组小鼠血清中 MDA 浓度分别上升了 172.72%、173.84%、27.23%（P<0.01）。与 B、C 这 2 组相比，D 组发酵乳可极显著降低小鼠血清 MDA 浓度（P<0.01）。结果表明发酵乳抗氧化性良好，可减少运动性疲劳小鼠的氧化应激水平。

2.3.4　富含 GABA 发酵乳对运动性疲劳小鼠肝、肌糖原质量分数的影响

长时间或高强度的运动会导致机体储存的长期和短期能量物质（如糖原和葡萄糖）过度消耗、动态供应能量不足[44]，从而引发机体疲劳，对人体造成伤害。如图 4 所示，A、B、C 组小鼠肝糖原质量分数无显著差异（P>0.05），而 D 组与 A、B、C 组小鼠相比，肝糖原质量分数显著上升，其中 D 组比 B 组上升了 50.58%（P<0.01）。肌糖原质量分数与肝糖原趋势基本一致。因此，富含

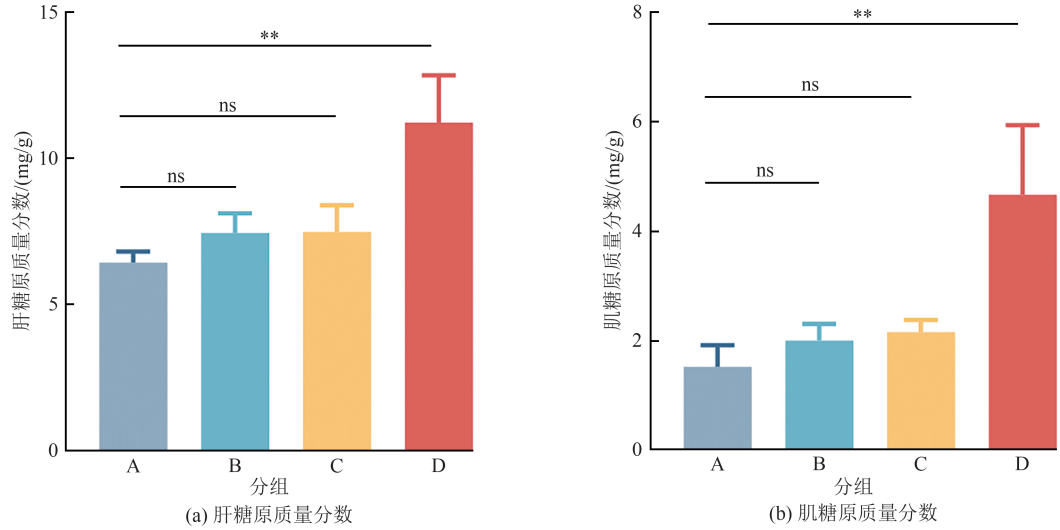


(a) SOD酶活力　(b) MDA浓度

A—对照组；B—模型组；C—商业发酵剂组；D—商业发酵剂+植物乳植杆菌LP-5组；**—差异极显著（$P<0.01$）；ns—无显著性差异。

图3　富含GABA发酵乳对运动性疲劳小鼠抗氧化指标的影响

Fig. 3　Effects of GABA-enriched fermented milk on antioxidant indicators in the mouse model of exercise fatigue



(a) 肝糖原质量分数　(b) 肌糖原质量分数

A—对照组；B—模型组；C—商业发酵剂组；D—商业发酵剂+植物乳植杆菌LP-5组；**—差异极显著（$P<0.01$）；ns—无显著性差异。

图4　富含GABA发酵乳对运动性疲劳小鼠肝、肌糖原质量分数的影响

Fig. 4　Effects of GABA-enriched fermented milk on mass fractions of glycogen in the liver and muscle of the mouse model of exercise fatigue

GABA的发酵乳具有提高运动性疲劳小鼠体内储能物质如肝、肌糖原质量分数的作用。

3　结论

作者筛选的植物乳植杆菌LP-5的GABA产量可达到（1.340±0.003）g/L，在发酵乳体系中可与商业发酵剂菌株共生良好，发酵乳中富含GABA、游离氨基酸且具有良好的滴定酸度。通过动物试验证明了该富含GABA的发酵乳缓解了运动性疲劳小鼠能量供应不足、代谢物积累和自由基攻击等问题，但其具体分子作用机制仍有待深入研究。

参考文献

[1] XIAN J, CHEN Q L, ZHANG C, et al. *Polygonati rhizoma* polysaccharides relieve exercise-induced fatigue by regulating gut microbiota[J]. Journal of Functional Foods, 2023, 107: 105658.

[2] COQUEIRO A Y, DE OLIVEIRA GARCIA A B, ROGERO M M, et al. Probiotic supplementation in sports

and physical exercise: does it present any ergogenic effect? [J]. Nutrition and Health, ,2017,23(4):239-249.

[3] XU Y F, LIAN Y J, LI J, et al. KangPiLao decoction modulates cognitive and emotional disorders in rats with central fatigue through the GABA/Glu pathway [J]. Frontiers in Pharmacology,2022,13:939169.

[4] 李梦民,刘滔,罗婷,等. 疲劳评价与食源性抗运动疲劳成分研究进展[J]. 食品工业科技,2025,46(2):394-402.
LI M M, LIU T, LUO T, et al. Research progress of fatigue evaluation and foodborne anti-sport fatigue components [J]. Science and Technology of Food Industry,2025,46(2):394-402.(in Chinese)

[5] 肖嵋方,王力,田皓然,等. 海洋生物活性物质抗疲劳功能研究进展[J]. 食品与机械,2022,38(9):211-218.
XIAO M F, WANG L, TIAN H R, et al. Research progress on anti-fatigue function of marine bioactive substances [J]. Food & Machinery,2022,38(9):211-218.(in Chinese)

[6] LIU Y Z, SHEN X F, SHA M X, et al. Natural bioactive flavonoids as promising agents in alleviating exercise-induced fatigue[J]. Food Bioscience,2023,51:102360.

[7] LUO C H, XU X R, WEI X C, et al. Natural medicines for the treatment of fatigue: bioactive components, pharmacology, and mechanisms [J]. Pharmacological Research, 2019, 148:104409.

[8] 谢婷婷,黄丽,黄加祥. 产γ-氨基丁酸的乳酸菌在发酵乳制品中的应用现状[J]. 中国乳业,2021(1):60-64.
XIE T T, HUANG L, HUANG J X. γ-aminobutyric acid producing lactic acid bacteria and its application in fermented dairy products[J]. China Dairy, 2021(1): 60-64.(in Chinese)

[9] 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.(in Chinese)

[10] HEPSOMALI P, GROEGER J A, NISHIHIRA J, et al. Effects of oral gamma-aminobutyric acid (GABA) administration on stress and sleep in humans: a systematic review[J]. Frontiers in Neuroscience,2020,14:923.

[11] HOU D 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,2024,64(24):8852-8874.

[12] FU J, HAN Z Y, WU Z B, et al. GABA regulates IL-1β production in macrophages [J]. Cell Reports, 2022, 41(10):111770.

[13] CUI Y H, MIAO K, NIYAPHORN S, et al. Production of gamma-aminobutyric acid from lactic acid bacteria: a systematic review[J]. International Journal of Molecular Sciences,2020,21(3):995.

[14] CHEN H W, HE X H, LIU Y, et al. Extraction, purification and anti-fatigue activity of γ-aminobutyric acid from mulberry (*Morus alba* L.) leaves [J]. Scientific Reports,2016,6:18933.

[15] 顾坤. γ-氨基丁酸与运动疲劳的相关性研究 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(08): 3153-3158.
GU Kun. Study on the correlation between γ-aminobutyric acid and exercise fatigue [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(08): 3153-3158.

[16] 施生玲,郭星晨,马金璞,等. 产GABA乳酸菌工艺优化及其产物抗氧化活性研究[J]. 食品工业,2023,44(5):86-91.
SHI S L, GUO X C, MA J P, et al. Optimization of GABA-producing lactic acid bacteria process and study on its antioxidant activity[J]. The Food Industry, 2023, 44(5):86-91.(in Chinese)

[17] 薛玉清,单艺,满朝新,等. γ-氨基丁酸发酵乳的研制[J]. 食品与发酵工业,2013,39(11):85-90.
XUE Y Q, SHAN Y, MAN C X, et al. Development of GABA-enriched yogurt [J]. Food and Fermentation Industries,2013,39(11):85-90.(in Chinese)

[18] 冯骁,池慧兵,孟凡强,等. 谷氨酸脱羧酶基因的挖掘、表征及全细胞制备γ-氨基丁酸的研究[J]. 食品与生物技术学报,2022,41(10):58-66.
FENG X, CHI H B, MENG F Q, et al. Mining and characterization of glutamate decarboxylase gene for whole cell preparation of γ-aminobutyric acid[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2022,41(10):58-66.(in Chinese)

[19] 李若鲲,高岩,卢天成,等. 富含降压物质γ-氨基丁酸发酵饮料的研制[J]. 食品科学,2010,31(24):494-497.
LI R K, GAO Y, LU T C, et al. Development of GABA-rich fermented beverage with blood-pressure-lowering function [J]. Food Science,2010,31(24):494-497.(in Chinese)

[20] 张群. 新型益生菌发酵乳制品的研究与开发[J]. 食品与生物技术学报,2015,34(6):672.
ZHANG Q. Research and development of new probiotic fermented dairy products [J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2015,34(6):672.(in Chinese)

[21] REHMAN A, DI BENEDETTO G, BIRD J K, et al. Development of a workflow for the selection, identification and optimization of lactic acid bacteria with high γ-aminobutyric acid production[J]. Scientific Reports, 2023,13:13663.

[22] 马牧然. 产γ-氨基丁酸乳酸菌的筛选及培养条件的优化[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.

[23] 冯晨晨. 高产γ-氨基丁酸乳酸菌的筛选、鉴定及其在发酵豆乳中的应用[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2022.

[24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品酸度的测定：GB 5009.239—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[25] 中华人民共和国国家卫生健康委员会，国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定：GB 4789.2—2022[S]. 北京：中国标准出版社，2016.

[26] YANG S S，YAN D L，ZOU Y T，et al. Fermentation temperature affects yogurt quality：a metabolomics study [J]. Food Bioscience，2021，42：101104.

[27] 程娇，孙敬，梁肖娜，等. 蛋白酶处理对脱脂乳感官品质及游离氨基酸的影响[J]. 食品科学，2021，42(16)：14-22.
CHENG J，SUN J，LIANG X N，et al. Effect of protease treatment on sensory quality and free amino acids of skim milk[J]. Food Science，2021，42(16)：14-22.(in Chinese)

[28] 李蕊，王一然，刘一鸣，等. 不同益生元对酸奶游离氨基酸及风味的影响[J]. 食品科学，2020，41(20)：83-89.
LI R，WANG Y R，LIU Y M，et al. Effect of adding different prebiotics on free amino acids and flavor of yogurt[J]. Food Science，2020，41(20)：83-89.(in Chinese)

[29] 温欣，田培郡，严中汉，等. 植物乳植杆菌CCFM1280对小鼠运动性疲劳的缓解作用[J]. 食品与发酵工业，2024，50(23)：29-35.
WEN X，TIAN P J，YAN Z H，et al. Alleviating effect of *Lactobacillus plantarum* CCFM1280 on exercise-induced fatigue in mice[J]. Food and Fermentation Industries，2024，50(23)：29-35.(in Chinese)

[30] YI R K，FENG M，CHEN Q P，et al. The effect of *Lactobacillus plantarum* CQPC02 on fatigue and biochemical oxidation levels in a mouse model of physical exhaustion[J]. Frontiers in Nutrition，2021，8：641544.

[31] CAI B N，YI X X，WANG Z，et al. Anti-fatigue effects and mechanism of *Syngnathus schlegeli* peptides supplementation on exercise-fatigued mice[J]. Journal of Functional Foods，2023，110：105846.

[32] 刘文俊. 嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌产酸、风味特性及其功能基因分型和表达研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2014.

[33] YAN J M，WU M L，ZHAO W，et al. Effects of probiotics and its fermented milk on constipation：a systematic review [J]. Food Science and Human Wellness，2023，12(6)：2124-2134.

[34] MUKHERJEE A，BRESELGE S，DIMIDI E，et al. Fermented foods and gastrointestinal health：underlying mechanisms [J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology，2024，21(4)：248-266.

[35] HADJIMBEI E，BOTSARIS G，CHRYSOSTOMOU S. Beneficial effects of yoghurts and probiotic fermented milks and their functional food potential [J]. Foods，2022，11(17)：2691.

[36] BAI M，HUANG T，GUO S，et al. Probiotic *Lactobacillus casei* Zhang improved the properties of stirred yogurt[J]. Food Bioscience，2020，37：100718.

[37] SHI M，MATHAI M L，XU G Q，et al. The effects of supplementation with blueberry，cyanidin-3-*O*-*β*-glucoside，yoghurt and its peptides on obesity and related comorbidities in a diet-induced obese mouse model [J]. Journal of Functional Foods，2019，56：92-101.

[38] 张瀛化，王莹，李宏，等. 注射用益气复脉(冻干)对力竭游泳大鼠的抗疲劳作用研究[J]. 天津医科大学学报，2023，29(1)：51-54.
ZHANG Y H，WANG Y，LI H，et al. Study on anti-fatigue effect of YiqiFumai Lyophilized Injection on(Carrageenan) exhausted swimming rats [J]. Journal of Tianjin Medical University，2023，29(1)：51-54.(in Chinese)

[39] 丁园. 牛磺酸、γ-氨基丁酸对小鼠抗缺氧抗疲劳作用的研究[J]. 内江科技，2009，30(12)：18.
DING Y. Effects of taurine and γ-aminobutyric acid on anti-hypoxia and anti-fatigue in mice [J]. Neijiang Science & Technology，2009，30(12)：18.(in Chinese)

[40] HARGREAVES M，SPRIET L L. Skeletal muscle energy metabolism during exercise [J]. Nature Metabolism，2020，2(9)：817-828.

[41] 缪文玉，李云飞，宋露露，等. 火麻仁低聚肽对小鼠的抗疲劳作用及其作用于性别间的差异[J]. 食品与机械，2023，39(12)：139-144.
MIAO W Y，LI Y F，SONG L L，et al. Anti-fatigue effect of hemp seed oligopeptide in mice and its sex difference[J]. Food & Machinery，2023，39(12)：139-144.(in Chinese)

[42] POWERS S K，DEMINICE R，OZDEMIR M，et al. Exercise-induced oxidative stress：Friend or foe?[J]. Journal of Sport and Health Science，2020，9(5)：415-425.

[43] 邱娟. 核桃清蛋白抗氧化肽对力竭运动小鼠抗疲劳和抗氧化能力的影响[J]. 基因组学与应用生物学，2020，39(5)：2222-2229.
QIU J. Effects of walnut albumin antioxidant peptide on anti-fatigue and anti-oxidation ability of exhausted mice [J]. Genomics and Applied Biology，2020，39(5)：2222-2229.(in Chinese)

[44] 任超. 体育运动后快速补糖对肌糖原合成及运动能力的影响[J]. 广西糖业，2022，42(5)：47-50.
REN C. Effect of rapid sugar supplementation after physical exercise on glycogen synthesis and exercise ability of muscle[J]. Guangxi Sugar Industry，2022，42(5)：47-50.(in Chinese)

（责任编辑：李春丽）