

付明, 臧延青. 嗜酸乳杆菌 M6 提高小鼠运动能力和缓解疲劳功能的研究 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 330–336. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020065

FU Ming, ZANG Yanqing. Effect of *Lactobacillus acidophilus* M6 on Improving Exercise Performance and Relieving Fatigue in Mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 330–336. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020065

· 营养与保健 ·

嗜酸乳杆菌 M6 提高小鼠运动能力和 缓解疲劳功能的研究

付 明¹, 臧延青^{2,*}

(1. 黑龙江八一农垦大学体育教研部, 黑龙江大庆 163319;

2. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319)

摘 要:目的: 前期从长跑运动员粪便中分离出嗜酸乳杆菌 M6, 本研究旨在研究嗜酸乳杆菌 M6 对提高小鼠运动能力和缓解疲劳功能的效果。方法: 将 60 只 C57BL/6N 雄性小鼠随机分为 4 组: 对照组、嗜酸乳杆菌 M6 低、中、高剂量组 (依次为 600、800 及 1000 mg/kg), 每天灌胃嗜酸乳杆菌 M6, 连续灌胃 4 周, 检测小鼠肌肉力量和力竭游泳时间, 检测小鼠疲劳相关指标、能量相关指标和抗氧化相关指标。结果: 低、中、高剂量的嗜酸乳杆菌 M6 均显著 ($P<0.001$) 提高小鼠前肢握力 (124.01 ± 6.02 、 132.02 ± 4.30 和 139.66 ± 4.72 g) 和力竭游泳时间 (8.03 ± 1.05 、 10.06 ± 1.10 和 14.36 ± 0.55 min), 均显著 ($P<0.001$) 降低小鼠血清肌酸激酶活力 (730.66 ± 16.77 、 647.66 ± 39.95 和 594.56 ± 32.33 U/L)、血乳酸 (10.13 ± 1.00 、 8.36 ± 0.99 和 6.09 ± 0.36 mol/L)、血尿素氮 (6.40 ± 0.53 、 5.96 ± 0.85 和 5.23 ± 0.25 nmol/L) 和血氨 (115.34 ± 4.50 、 99.67 ± 4.50 和 94.33 ± 4.72 μ mol/L) 等疲劳指标。此外, 嗜酸乳杆菌 M6 显著 ($P<0.001$) 增加血糖、肌糖原和肝糖原, 并显著 ($P<0.001$) 降低血清甘油三酯含量等能量代谢指标, 显著 ($P<0.001$) 增加小鼠血清超氧化物歧化酶、过氧化氢酶及谷胱甘肽过氧化物酶的酶活, 并显著 ($P<0.001$) 降低丙二醛含量。在 $3\times10^7\sim3\times10^9$ CFU 嗜酸乳杆菌 M6 范围内存在剂量效应。结论: 嗜酸乳杆菌 M6 可以通过提高小鼠前肢握力和力竭游泳时间改善小鼠运动能力的水平, 通过降低小鼠肌酸激酶活力、乳酸、尿素氮和血氨, 增加能量代谢, 提高抗氧化能力, 进而缓解运动后疲劳。

关键词: 嗜酸乳杆菌, 运动能力, 抗疲劳, 能量代谢, 抗氧化活性

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)23-0330-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020065

本文网刊:



Effect of *Lactobacillus acidophilus* M6 on Improving Exercise Performance and Relieving Fatigue in Mice

FU Ming¹, ZANG Yanqing^{2,*}

(1. Sports Teaching and Research Department, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: Objective: To isolate *Lactobacillus acidophilus* M6 from the feces of long-distance runners in the early stage. The aim of this study was to investigate the effect of *Lactobacillus acidophilus* M6 on improving exercise ability and alleviating fatigue function in mice. Methods: Sixty C57BL/6N male mice were randomly divided into 4 groups: Control, low, medium and high dose groups of *L. acidophilus* M6, *L. acidophilus* M6 was given daily for four weeks, muscle strength, exercise endurance, fatigue related indicators, energy related indicators and antioxidant related indicators were measured. Results: The low, medium and high dose of *L. acidophilus* M6 significantly ($P<0.001$) improved the forelimb grip strength (124.01 ± 6.02 , 132.02 ± 4.30 and 139.66 ± 4.72 g) and exhaustive swimming time (8.03 ± 1.05 , 10.06 ± 1.10 and

收稿日期: 2023-02-08

基金项目: 山葡萄花色苷双糖苷合成相关 MYB 转录因子的筛选及功能验证 (LH2022C064)。

作者简介: 付明 (1980-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 运动营养学, E-mail: 245638160@qq.com。

* 通信作者: 臧延青 (1974-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 功能性食品, E-mail: byndzangyanqing@163.com。

14.36±0.55 min)。The low, medium and high dose of *L. acidophilus* M6 significantly ($P<0.001$) reduced the fatigue indexes including the creatine kinase activity (730.66±16.77, 647.66±39.95 and 594.56±32.33 U/L), serum lactic acid (10.13±1.00, 8.36±0.99 and 6.09±0.36 mol/L), serum urea nitrogen (6.40±0.53, 5.96±0.85 and 5.23±0.25 nmol/L) and blood ammonia (115.34±4.50, 99.67±4.50 and 94.33±4.72 μ mol/L). *L. acidophilus* M6 significantly ($P<0.001$) improved energy metabolism indexes including increasing blood glucose, muscle glycogen and liver glycogen, and significantly ($P<0.001$) reducing triglyceride content in a dose-dependent manner. *L. acidophilus* M6 significantly ($P<0.001$) increased the activity of serum superoxide dismutase, catalase and glutathione peroxidase and decreased the content of malondialdehyde in mice in a dose-dependent manner at the range from 3×10^7 CFU to 3×10^9 CFU. Conclusion: *L. acidophilus* M6 could improve exercise performance and relieve fatigue after exercise in mice by improving the grip strength of forelimbs and the exhaustion swimming time, and increase the indexes related to energy metabolism and antioxidant capacity by decreasing the fatigue indexes such as creatine kinase activity, lactic acid, urea nitrogen and blood ammonia.

Key words: *Lactobacillus acidophilus*; exercise performance; anti-fatigue; energy metabolism; antioxidant activity

运动性疲劳是指难以开始或维持自愿运动型活动,并可分为精神性运动疲劳和身体性运动疲劳,运动性疲劳会引起工作效率下降^[1],也是某些疾病的前兆,如癌症、多发性硬化症、抑郁症和帕金森病^[2-4]。非病理性/生理性疲劳在不同运动过程、类型、强度和持续时间等生理上均有所表现^[5-6]。在长时间的耐力锻炼中,肌肉所需的能量不足以维持和产生相同水平的力量,导致疲劳反应和降低运动表现^[7]。由于现代社会的快速发展,疲劳已经成为越来越普遍的健康问题,而现代人偏向于用运动的方式解决健康问题的同时又会引发运动性疲劳。目前,对运动性疲劳有效治疗的药物或疗法在很大程度上仍无法满足需求^[8-9]。研究发现,自由基的产生、能量的消耗和有害代谢产物的积累都会导致运动性疲劳^[10]。近年来,运动营养补充剂被认为是提高运动表现或减少运动后疲劳的必要手段,对科学锻炼起到了重要作用。除了传统的草药、蛋白质和肌酸等,益生菌作为膳食补充剂受到越来越多的关注^[11]。

益生菌是一种定植于肠道对宿主健康有益的活的微生物^[12]。大量的研究表明,益生菌具有多种生物学效应,如提高胰岛素敏感性、诱导癌细胞凋亡、抗高血压、降胆固醇、抗炎、抗菌和抗氧化等^[13-16]。近年来,越来越多的研究表明益生菌具有提高运动能力和抗疲劳的功能,因此越来越多地被运动员用作营养补充以提高运动表现和减少运动后疲劳^[17]。在动物水平上,Yun 等^[18]研究表明嗜酸乳杆菌、两歧双歧杆菌和嗜热链球菌可以延长小鼠力竭游泳时间。夏亚丽^[19]研究表明混合益生菌可以改善大鼠疲劳相关指标。在人体水平,Callister 等^[20]研究表明嗜酸乳杆菌具有缓解运动员疲劳的功能。Sullivan 等^[21]研究表明嗜酸乳杆菌 NCFB 1748、副干酪乳杆菌 F19 和乳双歧杆菌 Bb12 可以缓解慢性疲劳综合征患者疲劳程度。

本团队前期从长跑运动员粪便中分离出嗜酸乳杆菌 M6,发现其具有良好的模拟胃肠液耐受性和黏附肠道的潜力。因此本研究首先通过检测小鼠肌肉力量和运动耐力评价嗜酸乳杆菌 M6 改善小鼠运动能力的水平,随后检测疲劳相关指标、能量代谢相关

指标、抗氧化相关指标,系统地评价嗜酸乳杆菌 M6 抗疲劳的作用,为开发提高运动表现和减少运动后疲劳的营养补充剂提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

SPF 级雄性 C57BL/6N 小鼠 60 只,6 周龄,体质量 18~21 g,北京维通利华实验动物技术有限公司 [SYXK(京)2022-0052];肌糖原试剂盒、肝糖原试剂盒、血糖试剂盒、甘油三酯试剂盒、过氧化氢酶(catalase, CAT)试剂盒、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)试剂盒、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)和丙二醛(malondialdehyde, MDA)试剂盒 南京建成生物科技有限公司;其他试剂均为分析纯 上海国药集团;嗜酸乳杆菌 M6 分离自长跑运动员粪便 经过 16S rDNA 系统发育分析鉴定,前期实验表明该菌株良好的模拟胃肠液耐受性和黏附肠道的潜力,该菌株保存在本实验室。

DHP-9272 型电热恒温培养箱 上海一恒科技有限公司;LDZF-50KB-II 立式蒸汽灭菌器 上海申安医疗器械厂;TGL-16G 离心机 上海安亭科技仪器厂;DW-150W200 超低温冰箱 青岛海尔集团;HH-6D 单列数显恒温水浴锅 常州市凯航仪器有限公司;MF1035B 电子天平 济南童鑫生物科技有限公司;V-1600B 紫外可见分光光度计 青岛明博环保科技有限公司;GL-12MS/GL-12M 高速台式离心机 赛默飞世尔科技(中国)有限公司;全波长酶标仪 美国 Bio-Rad 公司;Milli-Q 超纯水仪 美国 Millipore 公司;低力测试系统 日本爱光公司;自动分析仪 美国 Beckman 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 嗜酸乳杆菌处理方法 将第 3 代培养至 18 h 的嗜酸乳杆菌 M6 从培养箱中取出,8000×g 离心 10 min,弃去上清液后,再用无菌蒸馏水洗涤菌体 3 次,之后将菌体重悬于无菌蒸馏水中,菌体浓度均调至 1.5×10^{10} CFU/mL,备用。

1.2.2 动物分组与饲养 将 60 只 6 周龄 C57BL/6N 雄性小鼠在明暗交替 12 h,室温为(22±2)℃,相对湿度

度为 $45\% \pm 5\%$ 的 SPF 级动物房适应性饲养 1 周, 期间自由饮食和饮水, 随机分为 4 组: 对照组、嗜酸乳杆菌 M6 低、中、高剂量组, 每组 15 只。嗜酸乳杆菌 M6 低、中、高剂量组每天分别灌胃 0.2 mL 的 3×10^7 、 3×10^8 和 3×10^9 CFU 嗜酸乳杆菌 M6, 对照组灌胃等体积的蒸馏水, 连续灌胃 4 周。记录小鼠体重。本实验所涉及所有实验动物饲养均符合国家实验动物福利指南及实验动物伦理规范。

1.2.3 前肢握力检测实验 按照文献 [22] 描述, 使用低力测试系统测量所有小鼠的前肢握力。

1.2.4 力竭游泳实验 末次灌胃 30 min 后, 小鼠尾部进行负荷 5% 体质量的铅丝处理, 放于 40 cm 深度的游泳箱中游泳。实验过程确保小鼠四肢持续运动。小鼠力竭游泳时间为小鼠从游泳开始至鼻孔完全没入水中 7 s, 不能浮出水面的时间。

1.2.5 疲劳相关生化指标测定 末次灌胃后进行力竭游泳 30 min, 对所有小鼠进行无负重的游泳 15 min, 吹干, 人道处死小鼠, 取肝脏和前肢肌肉部位, 洗净, 吸干。在小鼠眼球取血, 静置 30 min 后, 在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $1500 \times g$ 离心 10 min 收集血清, 血清中肌酸激酶活力、乳酸含量、尿素氮含量、氨含量用自动分析仪检测。

1.2.6 能量代谢相关生化指标测定 按照试剂盒说明书测定肝糖原、肌糖原、血糖和血清甘油三酯含量。

1.2.7 抗氧化相关指标的测定 血清 SOD、CAT 和 GSH-Px 的活力以及 MDA 含量按照试剂盒检测方法检测。

1.3 数据处理

实验所有数据均平行测定 3 次, 数据结果以均值 $\pm$ 标准偏差表示, 采用 SPSS 软件进行数值变量趋势性分析及 Duncan's test 单因素分析, $P < 0.05$ 为显著性差异。

2 结果与分析

2.1 嗜酸乳杆菌 M6 对小鼠体重和肌肉力量的影响

通常情况下, 需要有计划的运动训练才能增加握力 [23]。如图 1A 所示, 补充 4 周的嗜酸乳杆菌 M6 后, 相比于对照组小鼠的体重增重, 嗜酸乳杆菌 M6 低剂量组、中剂量组和高剂量组小鼠的体重增重均无显著差异 ($P > 0.05$)。如图 1B 所示, 补充 4 周的嗜酸乳杆菌 M6 后, 相比于对照组小鼠的前肢握力, 嗜酸乳杆菌 M6 低剂量组、中剂量组和高剂量组小鼠的前肢握力均显著增加 ($P < 0.001$), 分别是 124.01 ± 6.02 、 132.02 ± 4.30 和 139.66 ± 4.72 g; 趋势分析显示随着嗜酸乳杆菌 M6 剂量的增加, 前肢握力呈剂量依赖性增加 ($P < 0.001$), 但中剂量组与高剂量组差异不显著。前期研究表明补充乳酸菌可降低肌肉萎缩标志物相关基因的表达水平 [24], 乳酸菌可以减少作为腓肠肌和胫骨肌蛋白质分解的主要系统的自噬-溶酶体

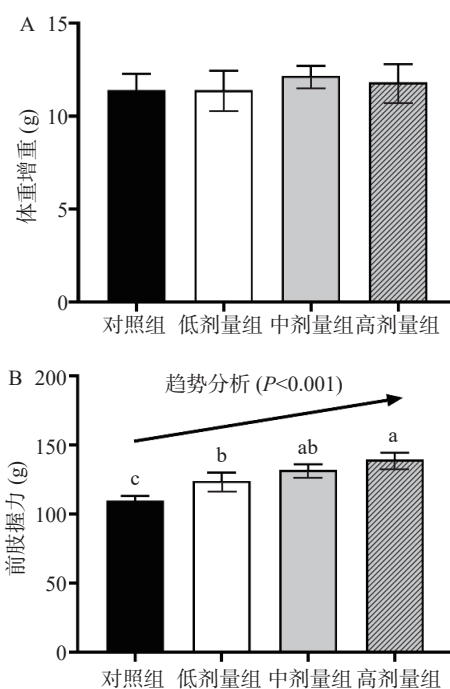


图 1 嗜酸乳杆菌 M6 对小鼠体重增重(A)和前肢握力(B)的影响

Fig.1 Effects of *L. acidophilus* M6 supplementation on body weight gain (A) and forelimb grip strength (B) in mice

注: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.001$); 图 2-图 5 同。

途径的标志物 [25]。以上研究表明嗜酸乳杆菌 M6 具有良好的增加肌肉力量的作用。

2.2 嗜酸乳杆菌 M6 对小鼠运动耐力的影响

负重游泳实验可用于评估小鼠的运动耐力, 且具有较高的重现性 [26]。如图 2 所示, 补充 4 周的嗜酸乳杆菌 M6 后, 相比于对照组小鼠, 嗜酸乳杆菌 M6 低剂量组、中剂量组和高剂量组小鼠的力竭游泳时间均显著增加 ($P < 0.001$), 分别增加 0.55%、1.11%、2.07%; 趋势分析显示随着嗜酸乳杆菌 M6 剂量的增加, 力竭游泳时间呈剂量依赖性增加 ($P < 0.001$)。Yun 等 [18] 研究表明嗜酸乳杆菌、两歧双歧杆菌和嗜热链球菌可以延长小鼠力竭游泳时间约 7 min。本研究显示在不通过训练的方式下, 嗜酸乳杆菌 M6 可以显著提高力竭游泳时间, 以上研究表明嗜酸乳杆菌 M6 具有良好的提高运动耐力的效果。

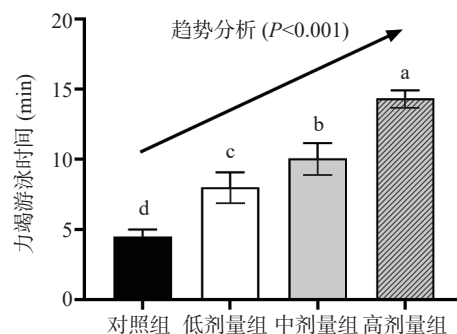


图 2 嗜酸乳杆菌 M6 对小鼠力竭游泳时间的影响

Fig.2 Effect of *L. acidophilus* M6 supplementation on exhaustive swim time in mice

2.3 嗜酸乳杆菌 M6 对小鼠抗疲劳相关指标的影响

肌酸激酶是一种与能量转移、肌肉收缩和 ATP 再生直接相关的重要激酶。运动锻炼后,体内肌酸激酶显著增加,且与运动强度呈正相关^[27]。如图 3A 所示,补充 4 周的嗜酸乳杆菌 M6 后,相比于对照组小鼠,嗜酸乳杆菌 M6 低剂量组、中剂量组和高剂量组小鼠的血清肌酸激酶活力均显著($P<0.001$)降低,但中剂量组与高剂量组间无显著性差异。小鼠血清肌酸激酶活力分别降低 16.00%、28.50%、33.90%;趋势分析显示随着嗜酸乳杆菌 M6 剂量的增加,肌酸激

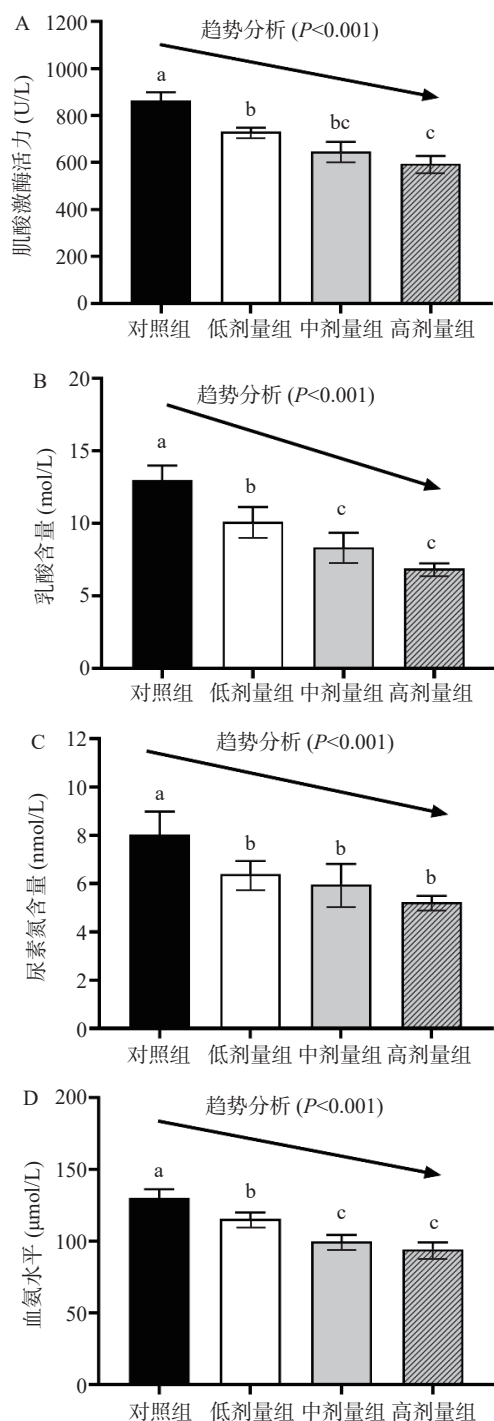


图 3 嗜酸乳杆菌 M6 对小鼠疲劳指标的影响

Fig.3 Effect of *L. acidophilus* M6 supplementation on fatigue-associated factors in mice

酶活力呈剂量依赖性降低($P<0.001$)。夏亚丽^[19]研究表明混合益生菌可以降低大鼠肌酸激酶的活力。这表明嗜酸乳杆菌 M6 能够降低小鼠体内肌酸激酶活力,进而缓解机体疲劳。

血液中的乳酸是机体发生糖代谢的必然产物,乳酸的升高将导致肌肉组织和血液的 pH 下降,引发对人体功能有害的生化 and 生理过程,乳酸是评价机体有氧代谢和疲劳的重要指标^[28]。如图 3B 所示,补充 4 周的嗜酸乳杆菌 M6 后,相比于对照组小鼠,嗜酸乳杆菌 M6 低剂量组、中剂量组和高剂量组小鼠的血乳酸含量均显著($P<0.001$)降低,但中剂量组与高剂量组间无显著性差异,其乳酸含量分别是 10.13 ± 1.00 、 8.36 ± 0.99 和 6.09 ± 0.36 mol/L; Huang 等^[22]研究表明运动训练和长双歧杆菌 OLP-01 联合可以显著降低乳酸含量,而本研究这表明嗜酸乳杆菌 M6 单独使用能够降低小鼠血液中的乳酸,进而缓解机体疲劳。

在正常生理条件下,蛋白质和氨基酸等经过分解代谢产生氨,进一步通过肝脏产生尿素,最后经血液循环进入肾脏,随着尿液排出体外。由于疲劳时体内糖含量无法满足运动供能的需求,因此机体内的蛋白质参与供能反应^[29]。运动疲劳发生与血尿素氮含量的呈正相关^[30]。如图 3C 所示,补充 4 周的嗜酸乳杆菌 M6 后,相比于对照组小鼠的血尿素氮含量,嗜酸乳杆菌 M6 低剂量组、中剂量组和高剂量组小鼠的血尿素氮含量显著降低($P<0.001$),但三个剂量组间无显著性差异,分别降低 13.40%、14.90%、31.50%; Lee 等^[31]研究表明,1000 mg/kg 剂量的唾液酸乳杆菌 SA-03 可以降低血尿素氮含量 16.16%,低于本研究的效果(34.86%)。这表明嗜酸乳杆菌 M6 能够降低小鼠血尿素氮,进而缓解机体疲劳。

氨是运动能量代谢过程中产生的一种重要代谢物,由不同来源产生。运动期间血液和大脑中积累的氨会对中枢神经系统产生负面影响,会导致疲劳。尽管运动引起的氨中毒是短暂和可逆的,具体取决于疾病状态,但它可能会影响中枢神经系统关键区域的持续协调活动。中枢神经系统在身体疲劳的发展中起着至关重要的作用^[32]。如图 3D 所示,补充 4 周的嗜酸乳杆菌 M6 后,相比于对照组小鼠的血氨水平,嗜酸乳杆菌 M6 低剂量组、中剂量组和高剂量组小鼠的血氨水平均显著($P<0.001$)减少,分别为 115.34 ± 4.50 、 99.67 ± 4.50 和 94.33 ± 4.72 $\mu\text{mol/L}$,但中剂量组与高剂量组差异不显著; Lee 等^[33]研究表明不同剂量的植物乳杆菌 TWK10 均可以显著降低血氨水平,这表明嗜酸乳杆菌 M6 能够降低小鼠血氨水平,进而缓解机体疲劳。

2.4 嗜酸乳杆菌 M6 对小鼠能量供给的影响

低血糖会抑制运动时大脑的活跃功能,导致无法继续运动^[34]。如图 4A 可以观察得到,嗜酸乳杆菌 M6 低剂量组、中剂量组和高剂量组小鼠的血糖浓度分别是 3.26 ± 0.25 、 4.00 ± 0.20 和 4.33 ± 0.15 mmol/L,

相比于对照组小鼠呈现出显著($P<0.001$)增加趋势,且血糖浓度随嗜酸乳杆菌 M6 剂量的增加表现出剂量依赖性增加($P<0.001$),但中剂量组高剂量组之间差异不显著。综上,嗜酸乳杆菌 M6 可以通过提高血糖浓度为机体提供能量。

肝糖原主要是在糖消耗后对其进行补充,使血糖稳定在正常水平。当处于疲劳状态下,在机体运动过程中首先消耗肌糖原,随后消耗肝糖原供能,因此,糖原消耗与疲劳程度紧密关联^[35]。如图 4B 显示出肝糖原含量与嗜酸乳杆菌 M6 剂量成正比,与对照组小鼠的肝糖原含量相比均显著($P<0.001$)增加,但中

剂量组与高剂量组差异不显著;在有氧运动中,肌糖原是中等强度运动时主要供能物质之一,因而肌糖原含量明显影响机体持续亚强度运动的时间。如图 4C,肌糖原含量同肝糖原含量变化相似,含量分别是 1.70 ± 0.11 、 2.06 ± 0.15 和 2.46 ± 0.30 mg/g。这表明嗜酸乳杆菌 M6 可以通过提高肌糖原和肝糖原的积累为机体提供能量。

大部分能量以甘油三酯的形式储存在脂肪组织中。甘油三酯转化成游离脂肪酸,进入血液,就可以作为组织中的能量来源^[36]。如图 4D,相比于对照组,嗜酸乳杆菌 M6 低剂量组、中剂量组和高剂量组小鼠的血清甘油三酯含量均显著($P<0.001$)降低,数据显示分别为 2.04 ± 0.12 、 1.78 ± 0.08 和 1.55 ± 0.04 mmol/L。这表明嗜酸乳杆菌 M6 可以通过利用甘油三酯为机体提供能量。Zhang 等^[37]研究表明发酵乳杆菌 HFY03 可以显著提高运动后小鼠的能量供给水平,这与本研究较为一致。

2.5 嗜酸乳杆菌 M6 对小鼠氧化应激指标的影响

越来越多的证据表明,活性氧诱导蛋白质氧化,并强烈地促进肌肉疲劳^[38]。益生菌可以减轻氧化应激,改善运动能力,降低疲劳程度^[39]。因此本研究采用小鼠氧化应激指标评价嗜酸乳杆菌 M6 的改善运动能力和缓解疲劳的作用。超氧化物歧化酶(SOD)是一种来源于活体的活性物质。它是一种含有金属元素的活性蛋白酶,能清除代谢过程中产生的有害物质,SOD 的含量可以直接反映机体的衰老疲劳程度^[40]。如图 5A 所示,相比于对照组小鼠的血清 SOD 活力,嗜酸乳杆菌 M6 低剂量组、中剂量组和高剂量组小鼠的血清 SOD 活力均显著($P<0.001$)增加,分别提高了 6.82%、23.17% 和 37.80%;趋势分析显示随着嗜酸乳杆菌 M6 剂量的增加,血清 SOD 活力呈剂量依赖性增加($P<0.001$)。这表明嗜酸乳杆菌 M6 可以通过提高 SOD 活力,提高机体抗氧化能力,进而缓解疲劳。

过氧化氢酶(CAT)可以将 H_2O_2 催化分解生成 H_2O 和 O_2 ,保护细胞膜结构和功能完整。因此,CAT 常用来评价机体抗氧化能力。如图 5B 所示,嗜酸乳杆菌 M6 中剂量组和高剂量组小鼠的血清 CAT 活力相较于对照组小鼠的血清 CAT 活力均显著($P<0.001$)增加,分别提高了 16.36% 和 35.15%。这表明嗜酸乳杆菌 M6 可以通过提高 CAT 活力,提高机体抗氧化能力,进而缓解疲劳。

谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)是人体最重要的过氧化物酶之一,可用于评估疲劳和健康,能在体内将有毒的过氧化氢还原为无毒无害的羟基化合物,分解过氧化氢,保护细胞膜结构和功能的完整性^[41]。运动使身体产生强烈的脂质氧化和葡萄糖代谢等氧化反应^[42]。如图 5C 所示,嗜酸乳杆菌 M6 中剂量组和高剂量组小鼠的 GSH-Px 活力随着嗜酸乳杆菌 M6 剂量的增加呈正比显著($P<0.001$)增加,分别提高了 24.13% 和 38.96%。这表明嗜酸乳杆菌 M6 可以通

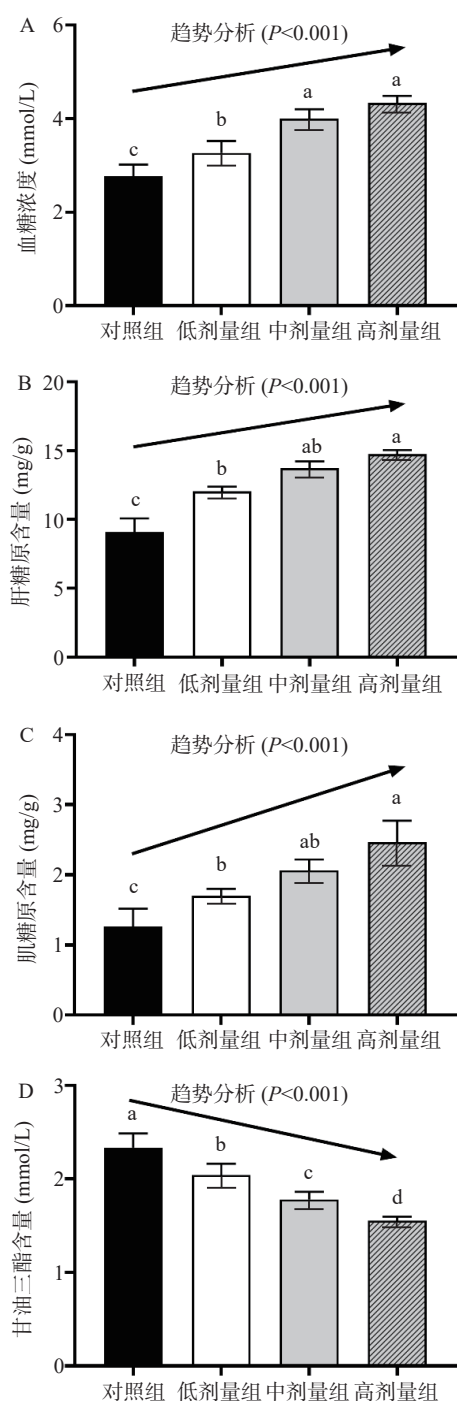


图4 嗜酸乳杆菌 M6 对小鼠能量供给的影响

Fig.4 Effect of *L. acidophilus* M6 supplementation on energy supply in mice

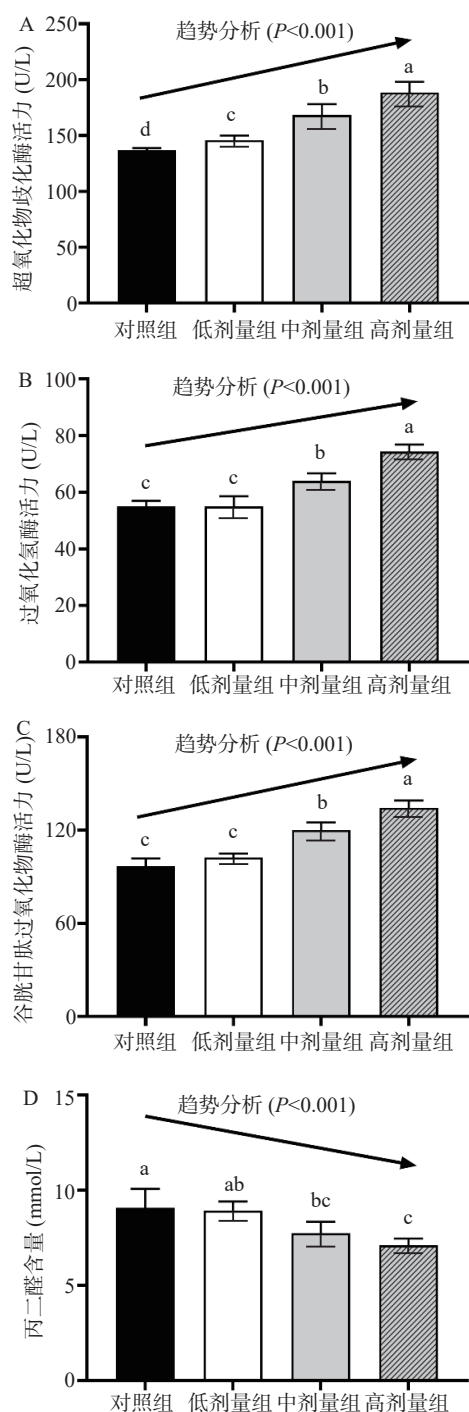


图 5 嗜酸乳杆菌 M6 对小鼠氧化应激指标的影响

Fig.5 Effect of *L. acidophilus* M6 supplementation on oxidative stress in mice

过提高 GSH-Px 活力,提高机体抗氧化能力,进而缓解疲劳。

丙二醛(MDA)是机体内氧自由基的重要代谢物,反映机体潜在的抗氧化能力、脂质氧化的速率以及组织过氧化损伤的程度^[43]。运动缺氧可在心肌组织中产生大量自由基。自由基作用于细胞膜上的不饱和脂肪酸,使膜脂发生过氧化作用,导致心肌细胞损伤,形成脂质过氧化,因此,在疲劳状态下,丙二醛浓度升高^[40]。如图 5D 所示,嗜酸乳杆菌 M6 中剂量组和高剂量组小鼠的 MDA 含量降低了 14.71% 和 21.69%,其变化呈现反向增长。这表明嗜酸乳杆菌

M6 可以降低体内脂质过氧化作用,进而发挥抗疲劳作用。Yi 等^[44]研究表明植物乳杆菌 CQPC02 可以缓解疲劳运动引起的氧化应激。Huang 等^[45]报道植物乳杆菌 PS128 可以改善高强度耐力训练引起的氧化应激,这与本研究结果相一致。

3 结论

本研究发现低、中、高剂量的嗜酸乳杆菌 M6 均可以显著提高($P<0.001$)小鼠前肢握力和力竭游泳时间,低、中、高剂量的嗜酸乳杆菌 M6 均可以显著($P<0.001$)降低小鼠肌酸激酶活力、乳酸、尿素氮和血氨等疲劳指标,增加血糖、肌糖原和肝糖原并降低甘油三酯含量等能量代谢指标,增加小鼠超氧化物歧化酶、过氧化氢酶及谷胱甘肽过氧化物酶酶活,并降低丙二醛含量,且存在剂量效应。因此,嗜酸乳杆菌 M6 具有改善小鼠运动能力和缓解运动后疲劳的作用。

参考文献

- [1] YOU L J, ZHAO M M, REGENSTEIN J M, et al. *In vitro* antioxidant activity and *in vivo* anti-fatigue effect of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) peptides prepared by papain digestion[J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(1): 188–194.
- [2] TAN W, YU K Q, LIU Y Y, et al. Anti-fatigue activity of polysaccharides extract from *Radix Rehmanniae Preparata*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2012, 50(1): 59–62.
- [3] UTHAYATHAS S, KARUPPAGOUNDER S S, TAMER S I, et al. Evaluation of neuroprotective and anti-fatigue effects of sildenafil[J]. *Life Sciences*, 2007, 81(12): 988–992.
- [4] NI W H, GAO T T, WANG H L, et al. Anti-fatigue activity of polysaccharides from the fruits of four Tibetan plateau indigenous medicinal plants[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2013, 150(2): 529–535.
- [5] DAVIS J M. Central and peripheral factors in fatigue[J]. *Journal of Sports Sciences*, 1995, 13(S1): S49–S53.
- [6] ZAJĄC A, CHALIMONIUK M, GOŁAŚ A, et al. Central and peripheral fatigue during resistance exercise—a critical review[J]. *Journal of Human Kinetics*, 2015, 49(1): 159–169.
- [7] WAN J J, QIN Z, WANG P Y, et al. Muscle fatigue: General understanding and treatment[J]. *Experimental & molecular medicine*, 2017, 49(10): e384.
- [8] GUO Z B, LIN D Q, GUO J J, et al. *In vitro* antioxidant activity and *in vivo* anti-fatigue effect of sea horse (hippocampus) peptides[J]. *Molecules*, 2017, 22(3): 482.
- [9] YE J, SHEN C H, HUANG Y Y, et al. Anti-fatigue activity of sea cucumber peptides prepared from *Stichopus japonicus* in an endurance swimming rat model[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(13): 4548–4556.
- [10] KAN N W, HUANG W C, LIN W T, et al. Hepatoprotective effects of *Ixora parviflora* extract against exhaustive exercise-induced oxidative stress in mice[J]. *Molecules*, 2013, 18(9): 10721–10732.
- [11] BINDA S, HILL C, JOHANSEN E, et al. Criteria to qualify microorganisms as “probiotic” in foods and dietary supplements[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020(11): 1662.
- [12] KHANI S, HOSSEINI H M, TAHERI M, et al. Probiotics as an alternative strategy for prevention and treatment of human diseases: A review[J]. *Inflammation & Allergy-Drug Targets (Formerly Current Drug Targets-Inflammation & Allergy)*(Discontinued), 2012, 11(2): 79–89.
- [13] SIVAMARUTHI B S, KESIKA P, SUGANTHY N, et al. A

review on role of microbiome in obesity and antiobesity properties of probiotic supplements[J]. *BioMed Research International*, 2019; 3291367.

[14] SICHETTI M, DE MARCO S, PAGIOTTI R, et al. Anti-inflammatory effect of multistrain probiotic formulation (*L. rhamnosus*, *B. lactis*, and *B. longum*) [J]. *Nutrition*, 2018, 53: 95–102.

[15] KANG M S, LIM H S, OH J S, et al. Antimicrobial activity of *Lactobacillus salivarius* and *Lactobacillus fermentum* against *Staphylococcus aureus* [J]. *Pathogens and Disease*, 2017, 75(2).

[16] TIPTIRI-KOURPETI A, SPYRIDOPOULOU K, SANTARMAKI V, et al. *Lactobacillus casei* exerts anti-proliferative effects accompanied by apoptotic cell death and up-regulation of TRAIL in colon carcinoma cells [J]. *PLoS One*, 2016, 11(2): e0147960.

[17] DÍAZ-JIMÉNEZ J, SÁNCHEZ-SÁNCHEZ E, ORDOÑEZ F J, et al. Impact of probiotics on the performance of endurance athletes: A systematic review [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(21): 11576.

[18] YUN J H, KIM Y A, CHUNG M J, et al. Hepatoprotective and anti-fatigue effects of lactic acid bacteria (*Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium bifidum* and *Streptococcus thermophilus*) [J]. *Toxicological Research*, 2007, 23(1): 11–17.

[19] 夏亚丽. 补充益生菌改善过度运动大鼠骨骼肌炎症反应的机制研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2020. [XIA Y L. Research on the mechanism of probiotics supplementation to improve muscle inflammation in overtraining rats[D]. Shanghai: Shanghai University of Sport, 2020.]

[20] CALLISTER R, CLANCY R, GLEESON M, et al. Effect of *Lactobacillus acidophilus* probiotic treatment in fatigued athletes with an interferon-defect [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2006, 38(5): S30.

[21] SULLIVAN Å, NORD C E, EVENGÅRD B. Effect of supplement with lactic-acid producing bacteria on fatigue and physical activity in patients with chronic fatigue syndrome [J]. *Nutrition Journal*, 2009, 8(1): 1–6.

[22] HUANG W C, HSU Y J, HUANG C C, et al. Exercise training combined with *Bifidobacterium longum* OLP-01 supplementation improves exercise physiological adaption and performance [J]. *Nutrients*, 2020, 12(4): 1145.

[23] CHEN W C, HUANG W C, CHIU C C, et al. Whey protein improves exercise performance and biochemical profiles in trained mice [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2014, 46(8): 1517.

[24] BINDELS L B, BECK R, SCHAKMAN O, et al. Restoring specific lactobacilli levels decreases inflammation and muscle atrophy markers in an acute leukemia mouse model [J]. *PLoS One*, 2012, 7(6): e37971.

[25] WHITE J P, BAYNES J W, WELLE S L, et al. The regulation of skeletal muscle protein turnover during the progression of cancer cachexia in the ApcMin/+ mouse [J]. *PLoS One*, 2011, 6(9): e24650.

[26] ZHANG Y, YAO X B, BAO L L, et al. Anti-fatigue activity of a triterpenoid-rich extract from Chinese bamboo shavings (*Caulis bambusae in taeniam*) [J]. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 2006, 20(10): 872–876.

[27] WANG J, LI S, FAN Y, et al. Anti-fatigue activity of the water-soluble polysaccharides isolated from *Panax ginseng CA Meyer* [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2010, 130(2): 421–423.

[28] SURHIO M M, WANG Y, FANG S, et al. Anti-fatigue activity of a *Lachnum* polysaccharide and its carboxymethylated derivative in mice [J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2017, 27(20): 4777–4780.

[29] YEH T S, HUANG C C, CHUANG H L, et al. *Angelica sinensis* improves exercise performance and protects against physical fatigue in trained mice [J]. *Molecules*, 2014, 19(4): 3926–3939.

[30] XI X Z, GUO S S, GUO H, et al. Anti-exercise-fatigue and promotion of sexual interest activity of total flavonoids from wasps drone-pupae in male mice [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2018, 107: 254–261.

[31] LEE M C, HSU Y J, HO H H, et al. *Lactobacillus salivarius* subspecies *salicinius* SA-03 is a new probiotic capable of enhancing exercise performance and decreasing fatigue [J]. *Microorganisms*, 2020, 8(4): 545.

[32] FINSTERER J. Biomarkers of peripheral muscle fatigue during exercise [J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2012, 13(1): 1–13.

[33] LEE M C, HSU Y J, HO H H, et al. Effectiveness of human-origin *Lactobacillus plantarum* PL-02 in improving muscle mass, exercise performance and anti-fatigue [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1–12.

[34] WANG J J, SHIEH M J, KUO S L, et al. Effect of red mold rice on antifatigue and exercise-related changes in lipid peroxidation in endurance exercise [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, 70(2): 247–253.

[35] WEI L, WEN Y T, LEE M C, et al. Effects of isolated soy protein and strength exercise training on exercise performance and biochemical profile in postpartum mice [J]. *Metabolism*, 2019, 94: 18–27.

[36] LI Y C, ZHENG X L, LIU B T, et al. Regulation of ATGL expression mediated by leptin *in vitro* in porcine adipocyte lipolysis [J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2010, 333(1): 121–128.

[37] ZHANG J, CHEN L, ZHANG L, et al. Effect of *Lactobacillus fermentum* HFY03 on the antifatigue and antioxidation ability of running exhausted mice [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021: 8013681.

[38] POWERS S K, DERUISSEAU K C, QUINDRY J, et al. Dietary antioxidants and exercise [J]. *Journal of Sports Sciences*, 2004, 22(1): 81–94.

[39] 夏亚丽, 伊木清. 补充益生菌改善运动应激及其机制研究进展 [J]. *中国运动医学杂志*, 2019, 8(38): 704–711. [XIA Y L, YI M Q. Research progress on supplementing probiotics to improve exercise stress and its mechanism [J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2019, 8(38): 704–711.]

[40] YANG Q Y, LAI X D, OUYANG J, et al. Effects of ginsenoside Rg3 on fatigue resistance and SIRT1 in aged rats [J]. *Toxicology*, 2018, 409: 144–1451.

[41] CHI A P, LI H, KANG C Z, et al. Anti-fatigue activity of a novel polysaccharide conjugates from Ziyang green tea [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 80: 566–572.

[42] 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.

[43] HSU W H, QIU W L, TSAO S M, et al. Effects of WSG, a polysaccharide from *Ganoderma lucidum*, on suppressing cell growth and mobility of lung cancer [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 165: 1604–1613.

[44] 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.

[45] HUANG W C, WEI C C, HUANG C C, et al. The beneficial effects of *Lactobacillus plantarum* PS128 on high-intensity, exercise-induced oxidative stress, inflammation, and performance in triathletes [J]. *Nutrients*, 2019, 11(2): 353.