

· 综述 ·

# 肠道微生物对运动表现的影响及机制的研究进展

张楚晗<sup>1</sup>, 姚泓<sup>1</sup>, 覃飞<sup>2</sup>, 吴锦毅<sup>3</sup>, 吴希阳<sup>1</sup>

1. 暨南大学生命科学技术学院食品科学与工程系, 广东广州 510632;

2. 暨南大学体育学院广东省速度能力研究重点实验室;

3. 湖南师范大学体育学院

**摘要:** 肠道微生物与运动具有紧密联系。运动可以升高肠道微生物群中有益细菌(如乳杆菌属和双歧杆菌属)的相对丰度。某些肠道微生物对运动机能具有正面影响, 可增强机体的运动能力, 减少长时间高强度运动带来的不良影响, 从而提高运动表现。此外, 一些益生菌还可以通过增强乳酸代谢来增强宿主的耐力运动表现。本综述旨在探讨益生菌对运动表现的影响及其增强运动机能的作用机制, 以期通过补充益生菌提高宿主运动机能的可能性提供理论依据和实践参考。

**关键词:** 益生菌; 乳酸; 胃肠道; 免疫力; 营养物质; 氧化应激

中图分类号: Q939 文献标识码: A 文章编号: 1005-376X (2026) 01-0097-06

DOI 编码: 10.13381/j.cnki.cjm.202601012

## Impact and mechanism of gut bacteria on athletic performance: research progress

ZHANG Chuhan\*, YAO Hong, QIN Fei, WU Jinyi, WU Xiyang

\* Department of Food Science and Engineering, College of Life Science and Technology, Ji'nan University, 510000, China

Corresponding author: WU Xiyang, E-mail: tkentwu@jnu.edu.cn

**Abstract:** There is a close association between gut microbiota and exercise. Exercise can increase the abundance of beneficial bacteria (such as *Lactobacillus* and *Bifidobacterium*) in the gut microbiota. Some gut microorganisms have a positive impact on motor function, which can enhance human exercise capacity, reduce the adverse effects caused by long-term high-intensity exercise, and thus improve exercise performance. Moreover, some probiotics can also enhance the endurance exercise performance of the host by strengthening lactic acid metabolism. This review aims to explore the effects of probiotics on athletic performance and the underlying mechanisms by which they enhance athletic function, with the intention of providing theoretical basis and practical guidance for the possibility of improving the host's athletic performance through probiotic supplementation.

**Keywords:** Probiotics; Lactic acid; Gastrointestinal tract; Immunity; Nutrients; Oxidative stress

大量研究表明<sup>[1-2]</sup>, 运动与肠道微生物组成之间存在密切关联。与久坐不动的受试者相比, 运动员和身体活跃的个体肠道中通常具有更高的微生物多样性和更多与健康相关的微生物, 如阿克曼菌属(*Akkermansia*)等, 而且定期运动能够显著改善肠道微生物组成。然而, 长时间高强度运动会导致肠道微生物多样性降低。研究表明<sup>[3]</sup>, 补充益生菌能够有效提高运动表现和疲劳恢复能力。因此, 补充益生菌可能是抵消长时间高强度运动负面影响的有效策略。

益生菌对运动影响的相关研究不断增多。研究表明<sup>[4]</sup>, 益生菌在提升运动者身体机能方面发挥着重要作用, 具体表现在能防止乳酸(lactic acid, LAC)堆积和LAC中毒, 缓解胃肠道症状, 促进免疫调节, 增加营养物质合成, 缓解氧化应激, 改善运动期间的能量获取, 提高肌肉生产能力、肌肉质量和力量、有氧运动能力等。因此, 益生菌为运动员在高强度运动和运动恢复期间提供了显著的代谢益处, 从而有可能成为提高运动能力的新靶点。本综述旨在探讨益生菌对运动表现的影响及其增强运动机能的作用

**基金项目:** 广东省国际科技合作基地-中国-新西兰食品安全与营养保障国际联合研究中心项目(2021A0505020016); 广东省速度能力研究重点实验室(2023B1212010009)

**作者简介:** 张楚晗(2000-), 女, 在读硕士研究生, 从事肠道微生物研究, E-mail: zch2471350265@163.com

**通信作者:** 吴希阳, E-mail: tkentwu@jnu.edu.cn

用机制，以期为通过补充益生菌来提高宿主运动机能的可能性提供理论依据和实践参考。

### 1 益生菌简介

近年来，益生菌因其能够有效调节肠道微生物群的组成而被广泛认可，并已成为运动员常用的营养补充剂。益生菌是活的、非致病性微生物，当有足够剂量时，能够调节肠道微生物组成，达到平衡状态，并对宿主产生有益作用。此外，成为益生菌的微生物必须满足以下条件：安全性高；能够耐受胃酸和胆汁酸；易于在肠道定植；不携带抗生素耐药基因。益生菌包含多种细菌，其中研究最为广泛的是乳杆菌属(*Lactobacillus*)和双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)。然而，值得注意的是，同一菌属的不同菌株可能具有不同的定植能力和功能。

传统益生菌主要来源于发酵食品，例如酸奶、奶酪和泡菜等。近年来，研究者对直接来源于人体消化道的有益菌株产生了更大兴趣，与植物和乳制品来源的益生菌相比，人源性益生菌在体外实验、临床试验和动物研究中均展现出更显著的效果。

### 2 益生菌增强运动机能的作用机制

#### 2.1 降 LAC 以及生成短链脂肪酸 (short-chain fatty acids, SCFAs)

**2.1.1 LAC 穿梭途径** LAC 是骨骼肌在有氧和无氧运动中产生的代谢产物，是导致人体疲劳和运动能力下降的主要因素。然而，近期研究表明<sup>[5]</sup>，LAC 不仅是运动时的重要能量来源，还在维持运动能力方面发挥着关键作用。在运动过程中，骨骼肌是 LAC 的主要生产者，LAC 进入肝脏后，通过糖异生

作用转化为葡萄糖，重新被骨骼肌利用。这一 LAC 循环的过程被称为科里循环，能确保 LAC 被有效利用。某些乳杆菌属菌株已被证实可以使小鼠运动后的血清 LAC 水平下降，例如 *Lactobacillus salivarius* subsp. *salicinius*(SA-03)是一株从 2008 年奥运会女子举重金牌得主的肠道微生物群中分离得到的益生菌菌株。研究人员每天向 4 组小鼠分别灌胃不同浓度的 SA-03 菌悬液，持续 4 周。随后，对所有小鼠进行了 10 min 的游泳测试，并在运动后测量其血清 LAC 水平。结果显示，SA-03 补充剂对血清 LAC 水平的改善作用呈剂量依赖性，且补充 SA-03 还能显著延长小鼠的最长游泳时间，这种改善同样呈现剂量依赖性。除此之外，研究还发现，补充 SA-03 可显著改善小鼠的肌肉力量和耐力表现，增加肝糖原和肌糖原的储存量，同时降低运动后血尿素氮 (blood urea nitrogen, BUN)、氨 (NH<sub>3</sub>) 和肌酸激酶 (creatine kinase, CK) 的水平<sup>[5]</sup>。由此可见，SA-03 通过多途径协同作用，能显著改善运动代谢、缓解疲劳、减少损伤和促进恢复，从而增强运动能力。Scheiman 等<sup>[6]</sup>通过尾静脉注射将 <sup>13</sup>C<sub>3</sub> 标记的乳酸钠注入到小鼠体内，12 min 后处死小鼠，检测发现标记的乳酸钠广泛存在于血清、血浆、结肠和盲肠中，由此可见 LAC 可以通过血液进入肠腔。而肠道微生物含有的乳酸脱氢酶 (lactic dehydrogenase, LDH) 可将 LAC 转化为 SCFAs，SCFAs 主要包括乙酸、丙酸和丁酸。SCFAs 在能量代谢和肠道健康中发挥重要作用。这一研究不仅揭示了机体 LAC 循环的完整路径，还为经典的科里循环理论补充了重要证据，如图 1 所示。

#### 2.1.2 乙酸和丙酸可促进运动能力 乙酸能维持耐

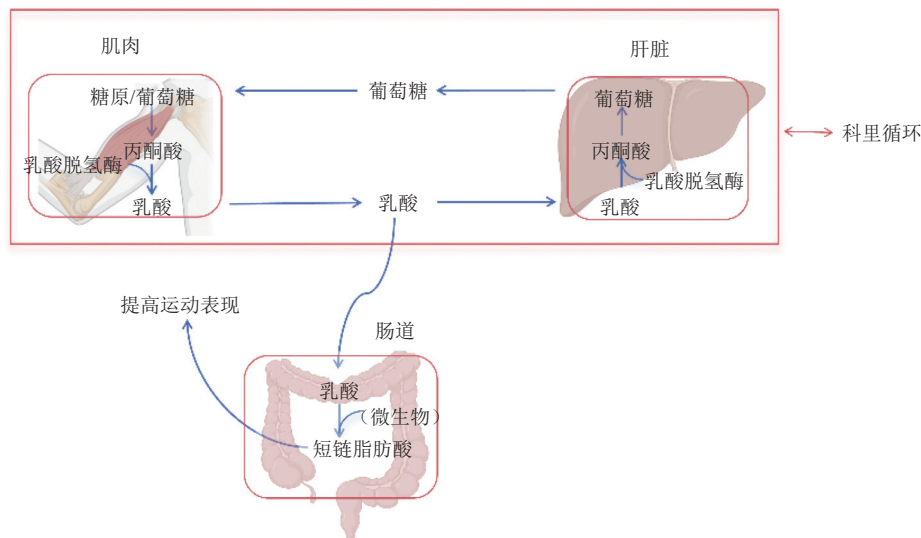


图 1 乳酸穿梭途径

Figure 1 Lactic acid shuttle pathway

力运动表现。丙酸可用作糖异生的前体, 通过为骨骼肌提供额外的底物来满足运动期间的能量需求。肠道微生物群中的大量细菌含有 LDH, 这是一种催化 LAC 代谢的关键酶, 该酶能够将 LAC 氧化为丙酮酸, 而丙酮酸经多种代谢路径, 最终生成乙酸和丙酸。例如, 丙酮酸可以转化为乙酰辅酶 A 或通过还原性乙酰辅酶 A 途径生成乙酸。丙酮酸还可以通过琥珀酸途径和丙烯酸酯途径进一步生成丙酸。其中, 琥珀酸途径主要存在于拟杆菌门(Bacteroidetes)和部分厚壁菌门(Firmicutes)的细菌中, 这些细菌能够通过该途径将 LAC 降解生成丙酸。而丙烯酸酯途径的适用范围较为局限, 仅发现存在于少数厚壁菌门的细菌属中, 如巨球型菌属(*Megasphaera*)等<sup>[7]</sup>。

Okamoto 等<sup>[8]</sup>用抗生素处理小鼠 2 周以破坏小鼠体内的微生物群, 然后将乙酸皮下注射到小鼠体内 1 周后发现乙酸可以恢复小鼠在跑步机上的运动时间。这表明在耐力运动中, 乙酸是微生物群介导的提升运动能力的重要代谢产物。Sakakibara 等<sup>[9]</sup>观察到缺乏乙酰辅酶 A 合成酶 2(负责将乙酸转化为乙酰辅酶 A 的唯一酶)的小鼠在禁食条件下表现出较弱的耐力运动表现。这一发现证实肠道微生物群产生的乙酸是维持耐力运动表现的重要代谢产物。

丙酸可用作糖异生的前体, 通过为骨骼肌提供额外的底物来满足运动期间的能量需求。由于韦荣球菌属(*Veillonella*)可以将 LAC 转化为乙酸和丙酸, 为明确丙酸是否是韦荣球菌属增强人体运动能力的原因, 研究人员给小鼠直肠内注射丙酸盐, 使丙酸盐能以更直接的途径到达体循环, 结果发现与注射盐水相比, 直肠内注射丙酸盐增加了小鼠在跑步机上的跑步时间, 说明丙酸能促进运动表现<sup>[5]</sup>。

**2.2 胃肠系统的调节** 剧烈运动可能导致胃肠道症状的出现, 如呕吐或腹泻等, 引起胃肠道功能紊乱。更严重的是, 高强度运动期间可能出现胃肠道出血, 如果长期反复胃肠道出血则会导致缺铁和贫血<sup>[10]</sup>。这些症状部分由肠道灌注不足导致肠细胞氧气和营养供应减少、黏液层厚度减少、肠道通透性增加以及细菌转移到血液中所致。

益生菌及其代谢产物(如丁酸等)可以降低胃肠道症状的发生频率和严重程度。Pugh 等<sup>[11]</sup>对 19 位马拉松运动员进行了为期 28 d,  $2.5 \times 10^{10}$  CFU/d 的多菌株胶囊的补充, 在补充期间, 受试者每天完成训练并记录胃肠道症状。结果显示, 与前 2 周相比, 补充益生菌的运动员在补充后 2 周的胃肠道出现中度症状的人数和天数显著减少, 且比赛时表现出较少的运动表现下降。以上结果表明, 益生菌通过调节胃肠道功能, 能够有效缓解运动引起的胃肠道不适,

从而维持运动员的运动表现。此外, 益生菌能够减弱肠道上皮屏障的通透性, 防止细菌和内毒素从肠腔转移到体循环中, 还能减少炎症细胞因子的产生并提高免疫力, 从而有效防止胃肠道功能紊乱, 减少因胃肠道不适导致的运动能力和运动表现下降的情况, 间接提高运动能力<sup>[12]</sup>。丁酸盐可以转化为乙酰辅酶 A, 生成三磷酸腺苷, 为人体提供能量, 并延缓疲劳的发生。因此, 补充益生菌是一种重要的饮食策略, 有助于改善肠道屏障功能, 预防内毒素血症, 减轻炎症反应。

**2.3 免疫系统的调节** 与中低等强度运动相比, 剧烈运动会显著增加促炎细胞因子的合成, 包括白细胞介素(interleukin, IL)-1、IL-6、IL-8 和肿瘤坏死因子  $\alpha$ (tumor necrosis factor  $\alpha$ , TNF- $\alpha$ )等<sup>[13]</sup>。此外, 剧烈和长时间的运动会使外周血中获得性免疫细胞(如淋巴细胞)水平下降。这种免疫抑制状态可能会增加人体的易感染性, 从而对运动表现产生不利影响<sup>[14]</sup>。

一些益生菌菌株已被证明可以显著降低因运动引发的炎症水平。Lamprecht 等<sup>[15]</sup>的研究发现, 给 23 名男性摄入含有 6 种菌株的益生菌补充剂 14 周后, 受试者在 90 min 高强度自行车运动后连蛋白(Zonulin)和 TNF- $\alpha$  水平显著降低。Zonulin 是肠道通透性增强的标志物, 其水平降低表明益生菌补充剂改善了肠道屏障功能, 减少了内毒素移位, 从而减轻了全身炎症反应。除此之外, 益生菌补充剂对运动诱导的蛋白质氧化也有有益影响, 表明其可能通过抗氧化机制进一步缓解运动引起的氧化应激, 从而促进运动后的恢复。因此, 益生菌能够通过增强肠道屏障功能和抑制炎症反应, 显著缓解运动引发的全身性炎症。

Tavares-Silva 等<sup>[16]</sup>进行了一项研究, 将 14 名男性马拉松运动员随机分为实验组和对照组, 分别给予多菌株益生菌胶囊和玉米淀粉胶囊 30 d。干预结束后, 受试者参加了 2015 年圣保罗国际马拉松赛。研究人员分析赛前 1 h、赛后即刻以及赛后 1 h 时抗炎和促炎因子的水平, 发现实验组在赛后即刻的 IL-6 水平显著低于对照组, 而 IL-10 水平在赛后即刻和赛后 1 h 显著升高。此外, 在赛后连续 7 d 对受试者上呼吸道症状的发生率和严重程度进行评估, 发现实验组的上呼吸道症状发生率比对照组低, 且严重程度较低。上述研究表明益生菌通过调节免疫反应, 有效减少促炎因子的生成和增加抗炎因子的生成, 并降低上呼吸道感染等轻微感染的发生风险。

研究表明<sup>[13]</sup>, 益生菌能够降低核因子  $\kappa$ B(nuclear factor  $\kappa$ B, NF- $\kappa$ B)的活性, 并减少促炎因子的表达。此外, 益生菌还可以通过产生细菌素或抗菌分子,

直接抑制病原体的生长或杀死病原体,例如乳杆菌属能在体外直接杀死鼠伤寒沙门菌(*Salmonella enterica*)<sup>[17]</sup>。这些作用不仅能够改善上呼吸道感染期间和感染后的肺部功能,还能够有效预防运动引起的免疫抑制,从而间接提高运动表现。因此,通过益生菌来调节免疫系统成为改善运动机能的一种有效策略。

**2.4 增加营养物质的生物利用度** 碳水化合物吸收的减少会限制 60 min 以上的耐力运动表现。与久坐受试者相比,运动员体内微生物群的代谢活性、蛋白质和碳水化合物的代谢会有所增加。研究表明<sup>[18]</sup>,由于肝脏和肌肉中的糖原储量有限,可以通过补充益生菌来维持长时间运动过程中碳水化合物的吸收和氧化。而益生菌能通过优化肠道微生物群的组成来提高蛋白酶活性,辅助运动人群对蛋白质的利用率。并且,益生菌还可以促进人体对氨基酸的吸收,支链氨基酸对蛋白质循环非常重要,同时氨基酸也可作为葡萄糖生成的来源。

益生菌还能增加无机铁的吸收。铁对氧气运输、线粒体能量产生和细胞免疫反应都至关重要。缺铁可能会对运动表现产生负面影响。因此,增加铁吸收可能是改善铁状态并避免使用传统高剂量铁补充剂产生不良影响的一种策略<sup>[19]</sup>。

**2.5 缓解氧化应激** 氧化应激反映了活性氧的产生和活性氧中间体的去除,或许可通过适当的抗氧化防御来修复由氧化应激造成的损害<sup>[6]</sup>。高强度运动会增加自由基和活性氧的增加。当这些物质的生成量超过体内防御机制的上限时,氧化与抗氧化水平失衡,造成氧化应激,从而损害细胞活力,进而导致肌肉损伤和疲劳,并使骨骼功能下降。临床研究已经证明在肌肉损伤性运动恢复过程中使用益生菌的效果。Jäger 等<sup>[20]</sup>给接受过阻力训练的男性,补充 3 周唾液链球菌嗜热亚种(*Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus*)FP4 和短双歧杆菌(*Bifidobacterium breve*)BR03 后,在等速测力计上以 90° 关节角度测量肘屈肌的最大等长峰值扭矩,发现补充 FP4 和 BR03 既可减轻运动后肌肉性能的下降,也可减轻肌肉损伤性运动后的运动表现下降。所以,补充益生菌是调节抗氧化防御系统功能和提升身体运动能力的一种重要策略。

### 3 益生菌对运动机能影响的相关标志物

判断益生菌对运动能力的影响,不应仅局限于运动表现和力竭时间,还应包括与疲劳相关的生化指标含量以及组织糖原储备量等标志物的综合评估。具体而言,可以通过检测血清中的 LAC、LDH、

BUN、血糖(glucose, GLU)、NH<sub>3</sub>、CK、肝糖原和肌糖原等指标,来全面分析益生菌对运动能力的潜在影响。LDH 和 CK 是反映肌肉损伤的主要指标,其水平升高通常表示运动过程中肌肉组织的损伤程度增加。BUN 则与蛋白质代谢有关,其水平变化可以反映运动过程中蛋白质的分解代谢情况。GLU 水平的动态变化则能够反映运动过程中能量代谢的调节能力。NH<sub>3</sub> 是运动过程中产生的一种主要代谢产物,运动期间,血液和大脑中 NH<sub>3</sub> 的蓄积会对中枢神经系统产生负面影响,导致疲劳。此外,肝糖原和肌糖原的储备量是运动中能量供应的关键,其含量变化可以直接影响运动的持续时间和强度。

Chen 等<sup>[21]</sup>采用灌胃法让 3 组小鼠每天接受植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)TWK10,剂量为 0 CFU/kg、2.05×10<sup>8</sup> CFU/kg 和 1.03×10<sup>9</sup> CFU/kg,持续 6 周后进行游泳能力测试,得出小鼠游泳耐力时间与 TWK10 补充剂呈现显著的剂量依赖性,补充 TWK10 可降低运动后 LAC、CK 和 NH<sub>3</sub> 的水平。

另外, Huang 等<sup>[22]</sup>将小鼠分为 4 组,非运动对照组、运动组、长双歧杆菌长亚种(*Bifidobacterium longum* subsp. *longum*)OLP-01 组和运动+ OLP-01 组,所有运动组接受为期 6 周的跑步机运动,OLP-01 组和运动+ OLP-01 组小鼠每日补充 OLP-01,剂量为 1.03×10<sup>10</sup> CFU/kg。干预结束后,让小鼠游泳至力竭。结果发现,干预前各组之间的耐力水平没有显著差异,干预后运动+ OLP-01 组的游泳时间显著高于运动组。运动后,运动+ OLP-01 组的 LAC 生成率显著低于运动组。另外,运动+ OLP-01 组的血清生化指标(LAC、NH<sub>3</sub>、CK、LDH)和肌糖原、肝糖原含量也有所改善。

所以,通过运动相关标志物来全面分析益生菌对运动能力的潜在影响,可以为益生菌提高运动能力提供技术指导和理论依据。

### 4 已报道的对运动表现有影响的肠道微生物

已有研究发现多种肠道微生物能通过防止肌肉损伤、改善炎症水平、降低疲劳指标、减轻压力和焦虑等方式来提高运动能力。具体的肠道微生物和对机体的改善见表 1。

### 5 未来研究重点

**5.1 通过益生元来提升对运动有益的肠道菌** 益生元是一类不能被宿主消化,但可以被益生菌利用和发酵的化合物。研究发现<sup>[33]</sup>,益生元的摄入可以刺激益生菌的增殖,并改善肠道微生物群的结构和多样性,且益生元基质的物理形式(如溶解性和结构)

表 1 提高运动能力的肠道微生物

Table 1 Intestinal microbiota that improves exercise performance

肠道微生物	运动群体及方式	有何改善	文献
<i>Lactobacillus paracasei</i> PS23	20~40 岁, 身体活跃的人进行最大垂直跳跃	防止肌肉损伤后力量和运动表现下降, 并改善炎症标志物	[4]
<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactobacillus rhamnosus</i> , <i>Bifidobacterium breve</i> , <i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Bifidobacterium longum</i> , <i>Bifidobacterium bifidum</i> , <i>Bifidobacterium infantis</i> , <i>Lactobacillus helveticus</i> , <i>Lactobacillus fermentum</i> , <i>Lactobacillus bulgaricus</i> , <i>Lactococcus lactis</i> , <i>Streptococcus thermophilus</i>	18~26 岁, 公路自行车手进行骑行训练	提高自行车手的有氧能力水平和厌氧能力, 并对与竞技公路自行车手的运动能力相关的选定健康指标产生积极影响	[23]
<i>Bifidobacterium lactis</i> W52, <i>Levilactobacillus brevis</i> W63, <i>Lactobacillus casei</i> W56, <i>Lactococcus lactis</i> W19, <i>Lactobacillus lactis</i> W58, <i>Lactobacillus acidophilus</i> W37, <i>Bifidobacterium bifidum</i> W23, <i>Ligilactobacillus salivarius</i> W24	20~60 岁, 长跑运动员进行比赛距离 > 100 km 的长跑项目	降低便秘的发生率, 血清高密度脂蛋白胆固醇浓度增加, 低密度脂蛋白胆固醇和甘油三酯浓度降低	[24]
<i>Lactiplantibacillus plantarum</i> TWK10, 热灭活的 <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> TWK10	20~30 岁, 健康个体进行耐力运动	降低疲劳指标和增加有氧能力来改善运动表现	[25]
<i>Lactobacillus casei</i> Shirota	19~22 岁, 羽毛球运动员训练	减轻了压力和焦虑, 并提高了有氧能力	[26]
<i>Lactobacillus helveticus</i> Lafti® L10, <i>Bifidobacterium animalis</i> subsp. <i>lactis</i> Lafti® B94, <i>Enterococcus faecium</i> R0026, <i>Bifidobacterium longum</i> R0175, <i>Bacillus subtilis</i> R0179	19~40 岁, 男性精英自行车手进行最大耗氧量和疲劳时间测试	降低了训练期间休息时恶心、打嗝和呕吐等胃肠道症状的发生率	[27]
<i>Lactobacillus rhamnosus</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus fermentum</i> , <i>Bifidobacterium lactis</i> , <i>Bifidobacterium bifidum</i> , <i>Streptococcus thermophilus</i> , <i>Saccharomyces burrata</i>	男子精英橄榄球运动员参加比赛	改善睡眠质量并减少感知到的肌肉酸痛	[28]
<i>Bacillus coagulans</i> IS-2	18~25 岁受过阻力训练的男性	通过提高下半身肌肉力量来改善支链氨基酸的吸收并增强运动表现	[29]
<i>Bifidobacterium animalis</i> subsp. <i>lactis</i> BB-12	年轻潜水员日常训练	降低认知状态和躯体状态的焦虑评分来改善运动表现	[30]
<i>Limosilactobacillus fermentum</i> LFZS09	小鼠进行负重游泳和跑步机疲惫实验	显著增加了小鼠游泳和跑步的持续时间	[31]
<i>Bifidobacterium bifidum</i> , <i>Bifidobacterium longum</i> , <i>Lactobacillus rhamnosus</i> GG, <i>Lactobacillus plantarum</i> LP28, <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>latis</i>	遗传性帕金森小鼠进行步态、光束平衡、运动协调和多巴胺能神经元退化水平测试	显著减少步态模式、平衡功能和运动协调方面的运动障碍	[32]

对其在肠道中的发酵速率和 SCFAs 的生成具有显著影响。近年来, 已经报道了一些益生元可以促进特定菌株的生长繁殖, 但目前针对运动有益菌株的益生元筛选和应用仍十分有限。

**5.2 评估益生菌与其他运动营养因子的联合作用**  
益生菌可以通过改善膳食营养素的吸收和利用来减少运动恢复所需的时间。目前, 市场上广泛使用的运动营养补充剂, 如能量胶、运动饮料、蛋白棒、口服氨基酸、抗氧化剂和维生素等, 尚未包含益生菌成分。因此, 将益生菌与现有运动营养成分进行联合设计, 可能从多个维度进一步提升运动机能并缓解运动疲劳。

**5.3 益生菌的具体作用机制** 结合多组学技术(基因组学、代谢组学和蛋白组学等), 深入探究益生菌与宿主代谢及免疫系统之间的互作机制, 揭示其改善运动能力的具体分子机制。

## 6 总结与展望

综上所述, 益生菌能影响运动机能, 特定益生菌能够将 LAC 转化为 SCFAs, 而 SCFAs 可以为人体提供能量支持。此外, 益生菌还能够通过增强肠道屏障功能, 防止运动引起的胃肠功能紊乱; 能通过调节免疫系统来促进碳水化合物、蛋白质和无机铁的吸收; 能利用自身产生的酚类物质, 缓解氧化应激, 增强肌肉能量代谢, 从而提升运动表现。

益生菌在运动领域的研究正逐渐成为一个新的研究热点。然而, 益生菌对运动机能作用机制的研究仍处于起步阶段, 且效果受菌株类型、剂量、个体差异和运动模式等的影响。目前, 益生菌可作为运动营养的辅助手段(而非核心策略), 建议运动员在专业指导下选择高活性、临床验证的菌株, 并结合科学训练和饮食方案, 使效果达到最大化。未来

需更多高质量的研究进一步明确益生菌对人类运动能力影响的具体作用机制和适用场景,以及在减轻运动后相关症状方面的具体功效。

## 参考文献

- [1] Morita E, Yokoyama H, Imai D, et al. Aerobic exercise training with brisk walking increases intestinal *Bacteroides* in healthy elderly women [J]. *Nutrients*, 2019, 11(4): 868.
- [2] Munukka E, Ahtiainen JP, Puigbó P, et al. Six-week endurance exercise alters gut metagenome that is not reflected in systemic metabolism in over-weight women [J]. *Front Microbiol*, 2018, 9: 2323.
- [3] Li YL, Wang S, Quan KY, et al. Co-administering yeast polypeptide and the probiotic, *Lactocaseibacillus casei* Zhang, significantly improves exercise performance [J]. *J Funct Foods*, 2022, 95: 105161.
- [4] Lee MC, Ho CS, Hsu YJ, et al. Live and heat-killed probiotic *Lactobacillus paracasei* PS23 accelerated the improvement and recovery of strength and damage biomarkers after exercise-induced muscle damage [J]. *Nutrients*, 2022, 14(21): 4563.
- [5] Lee MC, Hsu YJ, Ho HH, et al. *Lactobacillus salivarius* subspecies *salicinii* SA-03 is a new probiotic capable of enhancing exercise performance and decreasing fatigue [J]. *Microorganisms*, 2020, 8(4): 545.
- [6] Scheiman J, Lubner JM, Chavkin TA, et al. Meta-omics analysis of elite athletes identifies a performance-enhancing microbe that functions via lactate metabolism [J]. *Nat Med*, 2019, 25(7): 1104-1109.
- [7] Louis P, Hold GL, Flint HJ. The gut microbiota, bacterial metabolites and colorectal cancer [J]. *Nat Rev Microbiol*, 2014, 12(10): 661-672.
- [8] Okamoto T, Morino K, Ugi S, et al. Microbiome potentiates endurance exercise through intestinal acetate production [J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2019, 316(5): E956-E966.
- [9] Sakakibara I, Fujino T, Ishii M, et al. Fasting-induced hypothermia and reduced energy production in mice lacking acetyl-CoA synthetase 2 [J]. *Cell Metab*, 2009, 9(2): 191-202.
- [10] Peters HP, De Vries WR, Vanberge-Henegouwen GP, et al. Potential benefits and hazards of physical activity and exercise on the gastrointestinal tract [J]. *Gut*, 2001, 48(3): 435-439.
- [11] Pugh JN, Phelan MM, Caamaño-Gutiérrez E, et al. Four weeks of probiotic supplementation alters the metabolic perturbations induced by marathon running: insight from metabolomics [J]. *Metabolites*, 2021, 11(8): 535.
- [12] De Paiva AKF, De Oliveira E P, Mancini L, et al. Effects of probiotic supplementation on performance of resistance and aerobic exercises: a systematic review [J]. *Nutr Rev*, 2023, 81(2): 153-167.
- [13] Łagowska K, Bajerska J. Probiotic supplementation and respiratory infection and immune function in athletes: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *J Athl Train*, 2021, 56(11): 1213-1223.
- [14] Mooren FC, Lechtermann A, Völker K. Exercise-induced apoptosis of lymphocytes depends on training status [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2004, 36(9): 1476-1483.
- [15] Lamprecht M, Bogner S, Schippinger G, et al. Probiotic supplementation affects markers of intestinal barrier, oxidation, and inflammation in trained men; a randomized, double-blinded, placebo-controlled trial [J]. *J Int Soc Sports Nutr*, 2012, 9(1): 45.
- [16] Tavares-Silva E, Caris AV, Santos SA, et al. Effect of multi-strain probiotic supplementation on URTI symptoms and cytokine production by monocytes after a marathon race: a randomized, double-blind, placebo study [J]. *Nutrients*, 2021, 13(5): 1478.
- [17] Fayol-Messaoudi D, Berger CN, Coconnier-Polter MH, et al. pH-, lactic acid-, and non-lactic acid-dependent activities of probiotic lactobacilli against *Salmonella enterica* serovar typhimurium [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2005, 71(10): 6008-6013.
- [18] Pugh JN, Sparks AS, Doran DA, et al. Four weeks of probiotic supplementation reduces GI symptoms during a marathon race [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2019, 119(7): 1491-1501.
- [19] Vonderheid SC, Tussing-Humphreys L, Park C, et al. A systematic review and meta-analysis on the effects of probiotic species on iron absorption and iron status [J]. *Nutrients*, 2019, 11(12): 2938.
- [20] Jäger R, Purpura M, Stone JD, et al. Probiotic *Streptococcus thermophilus* FP4 and *Bifidobacterium breve* BR03 supplementation attenuates performance and range-of-motion decrements following muscle damaging exercise [J]. *Nutrients*, 2016, 8(10): 642.
- [21] Chen YM, Wei L, Chiu YS, et al. *Lactobacillus plantarum* TWK10 supplementation improves exercise performance and increases muscle mass in mice [J]. *Nutrients*, 2016, 8(4): 205.
- [22] Huang WC, Hsu YJ, Huang CC, et al. Exercise training combined with *Bifidobacterium longum* OLP-01 supplementation improves exercise physiological adaptation and performance [J]. *Nutrients*, 2020, 12(4): 1145.
- [23] Mazur-Kurach P, Frączek B, Klimek AT. Does multi-strain probiotic supplementation impact the effort capacity of competitive road cyclists? [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(19): 12205.
- [24] Smarkusz-Zarzecka J, Ostrowska L, Leszczyńska J, et al. Effect of a multi-strain probiotic supplement on gastrointestinal symptoms and serum biochemical parameters of long-distance runners: a randomized controlled trial [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(15): 9363.
- [25] Lee CC, Liao YC, Lee MC, et al. Different impacts of heat-killed and viable *Lactiplantibacillus plantarum* TWK10 on exercise performance, fatigue, body composition, and gut microbiota in humans [J]. *Microorganisms*, 2022, 10(11): 2181.
- [26] Salleh RM, Kuan G, Aziz MNA, et al. Effects of probiotics on anxiety, stress, mood and fitness of badminton players [J]. *Nutrients*, 2021, 13(6): 1783.
- [27] Schreiber C, Tamir S, Golan R, et al. The effect of probiotic supplementation on performance, inflammatory markers and gastro-intestinal symptoms in elite road cyclists [J]. *J Int Soc Sports Nutr*, 2021, 18(1): 36.
- [28] Harnett JE, Pyne DB, McKune AJ, et al. Probiotic supplementation elicits favourable changes in muscle soreness and sleep quality in rugby players [J]. *J Sci Med Sport*, 2021, 24(2): 195-199.
- [29] Tarik M, Ramakrishnan L, Bhatia N, et al. The effect of *Bacillus coagulans* unique IS-2 supplementation on plasma amino acid levels and muscle strength in resistance trained males consuming whey protein: a double-blind, placebo-controlled study [J]. *Eur J Nutr*, 2022, 61(5): 2673-2685.
- [30] Dong WZ, Wang Y, Liao SX, et al. *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BB-12 improves the state anxiety and sports performance of young divers under stress situations: a single-arm, prospective proof-of-concept study [J]. *Front Psychol*, 2021, 11: 570298.
- [31] Yang Y, Zhao YJ, Lei H, et al. *Limosilactobacillus fermentum* ZS09 can improve antibiotic-induced motor dysfunction in mice by regulating the brain-gut functions [J]. *J Inflamm Res*, 2024, 17: 10093-10106.
- [32] Hsieh TH, Kuo CW, Hsieh KH, et al. Probiotics alleviate the progressive deterioration of motor functions in a mouse model of Parkinson's disease [J]. *Brain Sci*, 2020, 10(4): 206.
- [33] Ashaolu TJ, Ashaolu JO, Adeyeye SAO. Fermentation of prebiotics by human colonic microbiota *in vitro* and short-chain fatty acids production: a critical review [J]. *J Appl Microbiol*, 2021, 130(3): 677-687.