

补充益生菌对耐力运动员运动表现的影响及机制研究进展

刘晨喆¹, 石丽君^{1*}, 王雯锐¹, 肖辉², 张璐芳¹

(¹北京体育大学运动人体科学学院 运动生理学教研室 北京 100084

²北京体育大学中国足球运动学院 北京 100084)

摘要 益生菌是活的微生物,越来越多地被用作营养补充品来改善运动员的健康状况。其对运动员胃肠道健康和上呼吸道疾病症状的有益作用已得到广泛认可,补充益生菌可以间接改善运动表现。然而,最近的一些研究虽然表明益生菌干预有助于提升耐力运动员运动表现,但仍存有争议且机制不清。本文综述补充益生菌对耐力运动员运动表现的最新研究,探讨改善运动表现的直接和间接的机制,涉及减轻疲劳,促进运动后恢复,促进营养吸收和能量供应,改善机体免疫机能和肠道健康以及减轻机体氧化应激等方面。本文旨在为补充益生菌维持运动员机能状态提供理论依据,并为提升耐力运动员运动表现提供新思路。

关键词 益生菌;耐力运动员;运动表现;疲劳恢复

文章编号 1009-7848(2022)11-0434-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.11.044

长时间的高强度体力消耗的训练和比赛会导致耐力运动员出现生理疲劳、免疫抑制(免疫细胞的数量和功能下降,如自然杀伤细胞和T淋巴细胞)、上呼吸道和胃肠道不适的发生率增加^[1-3]以及氧化应激^[4-6],这有可能导致运动员身体机能下降和/或错过训练或比赛的机会^[4,6]。此外,剧烈和长时间运动会引起内脏缺血和肠黏膜通透性升高,导致局部甚至全身性炎症^[1]。在这种情况下,预防或减轻这些状况的干预措施可能通过维持健康,增加训练和比赛时间来间接改善运动员的身体机能。近年来,肠道微生物在改善宿主能量代谢、免疫功能、炎症反应和氧化应激方面的作用已被证实^[7]。随着研究的深入,干预运动员肠道微生物的积极影响成为研究热点,涵盖了提高机体免疫、胃肠道健康、运动表现、机体抗氧化的能力^[8],促进疲劳恢复^[9-10]、能量供应^[11]、营养吸收^[12-13]和改善身体成分等方面^[14-15],而这些因素对于耐力运动员的健康和运动表现至关重要。

世界卫生组织将益生菌定义为“活的微生物,使用足够量时对健康有益处”。益生菌是调节肠道

菌群组成和功能的有效手段,可促进微生物多样性的增加,并有助于促进健康物种的生长^[16-17]。益生菌种类繁多,乳杆菌属和双歧杆菌属的研究最为广泛^[18-19]。从2006年Clancy等^[20]发表的第1篇关于对运动员和体育锻炼个体补充益生菌的研究开始,在过去15年中,益生菌在运动领域相关研究数量以及含有益生菌营养补剂的种类都大幅增加。目前的文献表明,对运动员有积极作用的益生菌主要有植物乳杆菌、干酪乳杆菌、嗜酸乳杆菌、双歧杆菌和嗜热链球菌等^[18]。益生菌对运动员胃肠道功能和免疫调节方面的益处已得到认可^[21]。此外,动物实验证实补充特定的益生菌可在一定程度上增加小鼠的耐力跑时长,这为补充益生菌来提升人体耐力表现带来一定的启示^[22-24]。对于努力改善比赛成绩并减少训练中恢复时间的运动员来说,了解益生菌能否提高运动员身体机能和运动表现具有重要意义。基于此,本文综述在运动领域补充益生菌的最新研究,评估其对动物模型和运动员运动表现的直接和间接影响,重点包括对身体机能、运动和运动适应的有效性、疲劳恢复、与运动有关的能量供应、营养利用、胃肠道和免疫健康以及氧化应激方面的作用。

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助课题
(2021TD002)

第一作者: 刘晨喆,女,博士,讲师

通信作者: 石丽君 E-mail: shilj@bsu.edu.cn

1 益生菌对耐力运动员运动表现的影响

根据运动类型的不同,运动表现可以用与耐

力、力量、速度和柔韧性等相关的结果来衡量。运动能力通常用在一定的运动强度或运动量下机体直至疲劳的时间或疲劳的程度来评价^[25]。在涉及耐力运动员和久坐不动的人的运动干预和训练研究中已经发现益生菌在改善身体机能和运动方面表现的潜力(表 1)。然而,大部分益生菌的干预研究主要关注其在改善免疫力、胃肠道健康和氧化应激等方面的作用,专门聚焦益生菌补充剂对运动表现影响的研究较少。在评估运动员运动表现的 19 项研究中,有 11 项报告补充益生菌在耐力、力量或疲劳恢复方面有改善作用。

几种特定益生菌菌株被证明具有提高耐力运动表现、推迟疲劳出现的作用。其中,研究最多的是植物乳杆菌属。Huang 等^[6]研究发现在 3 周训练期间补充植物乳杆菌 PS128 (*Lactobacillus plantarum* PS128, 3×10^{10} CFU/d)可改善运动员铁人三项冠军赛后无氧能力和有氧耐力的下降,减轻疲劳,并缓解机体的炎症和氧化应激。动物研究表明,与对照小鼠相比,补充植物乳杆菌 TWK10 (*Lactobacillus plantarum* TWK10)6 周可剂量依赖性地增加小鼠握力、耐力游泳时长、肌肉质量和腓肠肌中 I 型纤维(慢肌)的数量,并降低力竭运动引起的血清乳酸、氨和肌酸激酶(Creatine kinase, CK)的水平^[11]。其它研究表明,健康男性补充植物乳杆菌 TWK10(3×10^{10} 或 9×10^{10} CFU/d)6 周可剂量依赖性地提高有氧耐力运动的时长,以及显著降低力竭运动后血清乳酸和氨水平,并且高剂量的 TWK10 显著增加了肌肉质量百分比^[9-10]。此外,与安慰剂组相比,益生菌组力竭运动后血糖水平也高于安慰剂组,提示力竭运动中机体的能量供应得到改善。以上研究表明长期补充植物乳杆菌 TWK10 具有改善耐力运动表现、抗疲劳、增加肌肉质量、增强能量供应的作用。然而,由于该研究中受试者并非运动员,并且未在运动训练期间补充,因此植物乳杆菌 TWK10 对耐力运动员是否有同样的作用尚不清楚。

当前,益生菌在运动领域的最新应用趋势是从优秀运动员的粪便中分离肠道细菌,以研究运动员来源的肠道细菌对实验动物运动能力的影响。单一特定益生菌菌株已被证明具有增强耐力运动表现和抗疲劳的作用^[22-24,26]。从一位女子举重

奥运冠军肠道微生物中分离出来的长双歧杆菌 OLP-01 (*Bifidobacterium longum* OLP-01)^[22]和唾液乳杆菌 SA-03 (*Lactobacillus salivarius* SA-03)^[24]均可提高小鼠前肢的握力和耐力,并显著降低急性运动后血清乳酸、氨和 CK 水平。长双歧杆菌 OLP-01 干预还可显著升高肝糖原和肌糖原的基础水平^[26]。哈佛大学 Scheiman 团队在《Nature Medicine》上发表的研究表明,将从优秀马拉松运动员赛后粪便中高丰度的非典型韦荣氏球菌 (*Veillonella*)分离后移植到正常小鼠,小鼠的耐力表现显著提升,跑台运动至力竭时间比对照组升高了 13%^[23]。尽管以上来源于运动员的微生物在动物实验中显示出益处,但仍需要研究来证明其对运动员的影响,并进一步开发对人类健康有益的且经临床试验证实的商业益生菌。

与单一菌株益生菌相似,多菌株益生菌补充对耐力运动员运动表现也有提升作用。在 30 d 的高强度有氧训练期间补充益生菌酸奶(含嗜热链球菌、德氏乳杆菌和保加利亚菌)可显著增加耐力运动员的最大摄氧量(Maximal oxygen uptake, VO_{2max})和有氧功率^[27]。Shing 等^[28]发现乳杆菌、双歧杆菌和链球菌补充 4 周可增加男性跑步者在高温环境中运动至疲劳的时间。然而,此研究仅对比了运动后干预组和对照组之间的差异,并未对比益生菌干预前两组是否存在差异。

并不是所有的研究都表明运动员或健康个体在使用益生菌后耐力表现有所提高。Salarkia 等^[29]认为补充含多菌株益生菌(嗜酸乳杆菌、保加利亚乳杆菌、双歧杆菌和嗜热链球菌)的酸奶虽然提高了青春期女性耐力游泳运动员的 VO_{2max} ,但不影响 400 米游泳的成绩。16 周发酵乳杆菌 VRI-003 干预不影响优秀男子长跑运动员训练时长、强度和 VO_{2max} ^[30]。精英运动员补充 14 周瑞士乳杆菌 Lafti L10 后, VO_{2max} 、跑台运动时间、最大心率和心率恢复均不受影响^[31]。相似的,自行车运动员在冬训期间补充发酵乳杆菌对峰值功率或 VO_{2max} 也没有影响^[2]。除此之外,多菌株益生菌补充也不影响耐力运动员的比赛时长。铁人三项运动员赛前补充多菌株益生菌 12 周^[32]、马拉松运动员赛前补充 12 周^[33]或 4 周^[34]多菌株益生菌并不能缩短比赛用时。

综上所述,补充特定益生菌被认为在提高运动员耐力表现以及促进运动后恢复方面具有重要的应用价值。然而,目前补充益生菌对运动员运动表现影响的研究数量仍然较少,现有研究评估的运动类型和身体机能指标有限,并且存在相互矛盾的结果。此外,研究中使用了不同的益生菌菌株,它们的功效可能有所不同,还需要进一步的研究来确定补充益生菌对运动表现的直接影响。

2 补充益生菌提升耐力运动表现的机制

2.1 补充益生菌可减轻疲劳,促进运动后恢复

疲劳是剧烈运动的重要限制因素,而运动后的恢复一定程度上决定了训练水平能否提高。高强度训练可导致骨骼肌组织微损伤,引起局部炎症并降低肌肉功能,同时使得血清中CK^[35]和白细胞介素(IL)-6^[36]水平升高。运动引起的肌肉损伤、炎症和代谢反应是恢复过程的一部分,也是肌肉适应运动的一种机制^[37]。多项研究通过对比训练期间干预前基础水平和干预后的差异,探讨了补充益生菌对运动后恢复期运动表现、生化和免疫标志物的影响(表1)。Huang等^[9]的研究发现与安慰剂组相比,益生菌组在铁人三项比赛后恢复期的最大力量、疲劳指数和耐力指数得到显著改善。补充益生菌组可显著降低铁人三项冠军赛后3 h血清CK、促炎细胞因子肿瘤坏死因子 α (Tumour necrosis factor alpha, TNF- α)、IL-6和IL-8水平(减少6%~13%)^[6],升高抗炎细胞因子IL-10(增加55%)水平。Martarelli等^[38]发现副干酪乳杆菌IMC502和鼠李糖乳杆菌IMC501(1×10^9 CFU/d)补充4周可降低自行车运动员剧烈运动后血清CK水平,促进疲劳消除,并提高运动员的测试成绩。因此,补充益生菌可能通过减轻剧烈运动对肌肉的损伤来缓解疲劳。

Strasser等^[39]发现补充多菌株益生菌缓解了有氧运动导致的血清色氨酸浓度的下降。运动过程中,中枢对色氨酸的摄取增加,5-羟色胺水平升高可加剧中枢疲劳^[40]。并且,有研究报道 VO_{2max} 与运动前血清色氨酸水平呈正相关。因此,益生菌可能通过维持运动中循环色氨酸水平降低机体的疲劳感,潜在地影响训练的依从性和运动表现^[41]。

综上所述,益生菌可通过减轻肌肉损伤、炎症

以及维持运动中循环色氨酸水平等作用缓解疲劳、促进机体恢复。然而,到目前为止,对运动后恢复期运动表现和运动能力进行评估的研究仍较少。由于研究设计、训练方案、分析方法、运动人群和益生菌菌株的巨大差异,关于益生菌对运动后恢复期生化和免疫指标的影响显示了一些有争议的结果。因此,在恢复期需要更长的随访措施,并明确恢复过程和身体机能提高之间的关系以进一步得出关于益生菌促进恢复的结论。

2.2 补充益生菌增加运动过程中能量供应

研究发现,补充益生菌可增加运动过程中的能量供应,这可能为运动员在高强度运动和恢复过程中提供代谢益处^[42]。与安慰剂相比,铁人三项运动员在训练期间补充植物乳杆菌PS128可显著升高血浆中支链氨基酸(Branched-chain amino acid, BCAA)水平(升高24%~69%)^[6]。BCAA是促进肌肉蛋白质合成以及运动后恢复的必需氨基酸,在延迟耐力运动疲劳产生,以及维持运动训练时肌肉能量代谢的动态平衡中发挥重要作用^[43]。Chen等^[11]研究表明小鼠补充植物乳杆菌TWK10以剂量依赖的方式增加了肌肉质量和握力,并降低运动后血乳酸和葡萄糖的水平,提高葡萄糖利用率,表明植物乳杆菌TWK10可能有益于运动过程中的能量供应。此外,研究还发现嗜酸乳杆菌可调节组织中糖原合成相关基因(糖原合成酶激酶3 β 和苏氨酸激酶)和糖原含量^[44]。

尽管有待进一步研究,但微生物的代谢产物短链脂肪酸(Short-chain fatty acids, SCFAs)可能是益生菌增加能量供应的关键环节。SCFAs是肠道菌群将未消化的碳水化合物发酵的产物,被认为是饮食、肠道菌群和宿主能量代谢之间的桥梁。SCFAs主要包括丁酸盐、乙酸盐和丙酸盐。研究表明,肠道上皮细胞70%的能量来自丁酸盐,乙酸盐和丙酸盐进入血液循环可作为糖异生的底物被肌肉和肝脏吸收,葡萄糖总量的69%由丙酸盐合成^[45]。由于这一特性,SCFAs可通过维持血糖来提升耐力运动表现。一项开创性研究表明,骨骼肌在长时间无氧运动中产生的乳酸可能会从循环系统进入肠腔,被韦荣氏球菌酵解为丙酸盐,进而通过加速乳酸清除和增加能源物质储备改善运动表现^[23]。动物研究也证实了丙酸盐和乙酸盐是耐力

表 1 益生菌对运动表现和疲劳恢复的研究

试验设计		益生菌补充		主要结果	参考文献
17 名女性游泳运动员	以胶囊形式补充长双歧杆菌 35624 (1×10^{10} CFU/d), 持续 6 周	不	不影响有氧/无氧游泳时间和垂直跳跃	[101]	
46 名女性耐力游泳运动员	补充含嗜酸乳杆菌 SPP、德氏乳杆菌、双歧杆菌和唾液嗜热链球菌的牛奶 (共 4.0×10^{10} CFU/d), 持续 8 周	不	不影响 400 米游泳成绩	[29]	
20 名男性精英长跑运动员	以胶囊形式补充发酵乳杆菌 VRI-003 (1.26×10^{10} CFU/d), 持续 4 周	不	不影响跑台力竭测试运动表现	[30]	
8 名男性耐力跑步者	测试前 7 d 每日补充干酪乳杆菌 (10^{11} CFU/d)	不	不影响热应激环境下跑台力竭时长	[98]	
10 名受过训练的跑步者,	补充多种益生菌 (共 4.5×10^{10} CFU/d), 持续 4 周	在	在高温环境中运行至疲劳的时间升高	[28]	
24 名马拉松运动员 (男 20/女 4)	赛前 4 周每日以胶囊形式补充嗜酸乳杆菌、双歧杆菌、动物双歧杆菌和乳酸菌 (共 2.5×10^{10} CFU/d)	马	拉拉松比赛最后三分之一期间胃肠道症状严重程度降低, 不影响完成马拉松的时长	[34]	
32 名超跑马拉松运动员 (男 26/女 6)	马拉松赛前 12 周每日补充多种益生菌 (共 3×10^{10} CFU/d)	不	不影响马拉松赛前 VO_{2max} 和马拉松完成时间	[33]	
99 名自行车运动员 (男 64/女 35)	以胶囊形式补充发酵乳杆菌 VRI-003 PC (1.0×10^9 CFU/d), 持续 11 周	不	不影响功率自行车测试峰值功率和 VO_{2max}	[2]	
铁人三项运动员, 研究一: 18 人, 研究二: 16 人	以胶囊形式补充植物乳杆菌 PS128 (3×10^{10} CFU/d), 研究一持续 4 周, 研究二持续 3 周	研	究二 中, 益生菌缓解铁人三项冠军赛后 Wingate 测试和 85% VO_{2max} 的下降幅度和疲劳指数, 对身体成分无影响, 赛后 3 h CK 下降	[6]	
50 名优秀运动员 (男 36/女 14)	以胶囊形式补充瑞士乳杆菌 Lacti L10 (2×10^{10} CFU/d), 持续 14 周	不	不影响 VO_{2max} 和跑步表现	[31]	
30 名铁人三项运动员 (男 25/女 5)	长距离铁人三项比赛前 12 周每日补充多菌株益生菌 (共 3×10^{10} CFU/d)	在	游泳和骑行阶段, 益生菌组总体上出现了更快的趋势, 但不影响跑步时长	[32]	
23 名女性排球足球运动员	补充枯草芽孢杆菌 DE111 (5.0×10^{10} CFU/d), 持续 10 周	体	脂百分比降低, 不影响最大重复次数测试运动表现	[59]	
29 名运动员 (男 13/女 16)	以胶囊形式补充多种益生菌 (共 1×10^{10} CFU/d), 持续 12 周	训	练负荷明显升高, 不影响功率自行车力竭测试运动表现	[39]	
30 名体育专业男性	每日补充 200 mL 添加嗜热链球菌、德氏乳杆菌和保加利亚菌 (共 2×10^7 CFU/d) 的酸奶, 持续 10 周	益	生菌改善了 VO_{2max} 和有氧运动性能	[27]	
16 位健康男性	补充植物乳杆菌 TWK10 (1×10^{11} CFU/d), 持续 6 周	推	迟 85% VO_{2max} 强度力竭测试疲劳出现, 力竭运动后血糖升高, 不影响血乳酸、CK 水平	[9]	
54 名健康受试者 (男 27/女 27)	以胶囊形式补充植物乳杆菌 TWK10 (3×10^{10} CFU/d 或 9×10^{10} CFU/d), 持续 6 周	85%	VO_{2max} 强度力竭测试疲劳时间延长 (剂量依赖性), 力竭运动后血清乳酸、氨和葡萄糖含量降低, 大剂量组肌肉质量增加	[10]	

注: CK. 肌酸激酶; VO_{2max} . 最大摄氧量; RM. 最大重复次数。(参考 Martinen Metal.2020^[44]制作)

运动过程中的重要能量底物,结肠内灌注丙酸盐和持续皮下注射乙酸盐均可提升小鼠力竭运动的时长^[23,46]。此外,进入循环的 SCFAs 可激活脂酰辅酶 A 生成,参与甘油三酯代谢,为骨骼肌提供能量^[47]。SCFAs 还为骨骼肌线粒体提供必要的代谢产物,上调线粒体生物合成的调节剂 NAD 依赖性蛋白脱乙酰基酶 sirtuin-1^[48],而丁酸盐可通过激活 5'-磷酸腺苷激活的蛋白激酶 (5'-AMP activated protein kinase, AMPK) 以及其后过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 共激活剂 1 α (Peroxisome proliferator-activated receptor- γ co-activator 1 α , PGC-1 α) 通路,促进线粒体生物合成,增强骨骼肌葡萄糖摄取和利用以及脂肪酸氧化^[49]。研究发现,补充益生菌也可升高 SCFAs 水平。其中,唾液乳杆菌可增加丙酸盐和丁酸盐的浓度,嗜酸乳杆菌增加乙酸盐、丙酸盐和丁酸盐的浓度,而长双歧杆菌 SP 07/3 和双歧杆菌 MF 20/5 能够产生大量的丙酸盐和乙酸盐^[42]。因此,益生菌干预可能通过升高 SCFAs 水平增加运动中的能量供应,从而提升耐力表现。然而,目前大多数研究并未关注补充益生菌对运动员粪便以及血清中 SCFAs 的影响,SCFAs 对能量供给的影响也主要是在动物研究中获得的,其机制尚不清楚。因此,未来的研究需要明确 SCFAs 在益生菌促进能量供应中的作用。

2.3 补充益生菌促进营养物质和铁的吸收

近期的研究评估了益生菌菌株对营养物质的消化、吸收和代谢能力。在长时间的运动中,维持骨骼肌和中枢神经系统足够的碳水化合物可利用性有助于改善运动表现并推迟疲劳^[50],然而,碳水化合物的吸收受到肠道内运输系统的限制。最近的一项研究评估了补充益生菌对麦芽糊精的吸收和氧化以及运动员运动表现的影响^[12]。7 名受过训练的男性自行车运动员在补充 4 周多菌株益生菌 (2.5×10^{10} CFU) 或安慰剂的前、后进行了 2 h 55% 最大有氧功率的自行车运动。结果发现,补充益生菌可显著增加运动中平均总碳水化合物氧化、麦芽糊精的峰值氧化速率和血浆葡萄糖和胰岛素浓度,并减少脂肪氧化,而对摄入的麦芽糖糊精的吸收量以及运动表现没有影响。此项研究虽突出了益生菌增加碳水化合物的吸收和氧化的潜力,但仍需要进一步的研究来验证。

益生菌被证明可促进蛋白质的吸收和利用^[13]。与动物蛋白源相比,植物蛋白源一般为不完全蛋白,BCAA 含量较少,并且在吸收动力学和宿主吸收氨基酸的数量方面存在差异,而这些因素会影响运动员骨骼肌蛋白质合成。因此,在摄入植物蛋白源后如何提高血液中氨基酸浓度以克服其成分缺陷很有意义。研究发现,补充益生菌可能是解决此问题的重要营养策略。最近一项对健康男性随机、双盲、交叉试验研究评估了植物蛋白与益生菌补充剂 (5×10^9 CFU 副干酪乳杆菌 LPC-DG 和 5×10^9 CFU 副干酪乳杆菌 LPC-S01) 共同摄入后对血液中氨基酸的浓度的影响。结果表明,联合补充益生菌显著升高了蛋氨酸 (升高 16.3%)、组氨酸 (升高 49.2%)、缬氨酸 (升高 24.7%)、亮氨酸 (升高 25.2%)、异亮氨酸 (升高 26.1%)、酪氨酸 (升高 11.6%)、总 BCAA (升高 26.8%) 和总必需氨基酸 (升高 15.6%) 的最大浓度和曲线下面积^[51],而这些增加的氨基酸有助于运动员的运动恢复。此外,益生菌还可以增加蛋白水解酶活性来提高蛋白质利用率^[52]。体外研究显示,与只使用一种菌株相比,联合使用两种菌株对豌豆蛋白的水解作用增强。这些证据初步表明益生菌可能有助于克服植物蛋白成分缺陷并可将血液中 BCAA 水平提高到与动物蛋白相当水平,这样就不需要增加植物蛋白的剂量来达到补充肌肉蛋白质的相似效果。

关于益生菌和营养吸收的研究热点是无机铁的吸收。铁对于氧气的运输、线粒体能量的产生以及细胞的免疫反应十分重要,并且低含量时对体能和训练适应性会产生负面影响^[52]。因此,增加铁的吸收是改善铁状态、避免使用传统的高剂量铁补充剂从而减少不利的副作用的策略。最近的一项双盲、12 周随机对照试验给低铁储备但非贫血的女性运动员每日补充 20 mg 富马酸亚铁以及植物乳杆菌 299v。结果表明,与单独摄入铁相比,联合摄入益生菌可使铁储备得到更显著和快速的改善^[53]。此外,益生菌对无机铁来源铁の利用(如血清铁蛋白)的有益作用是显著的,并且对炎症标志物没有影响。最近的一项荟萃分析也表明植物乳杆菌 299v 有助于人体对铁的吸收^[54]。

研究发现,运动相关的肠道微生物群可能更容易提高营养物质的利用率,因为它似乎具有更

强的组织修复和从饮食中吸收能量的能力,并增加碳水化合物、细胞结构和核苷酸生物合成^[55],并且益生菌增强肠黏膜完整性的作用可能也有助于改善营养吸收^[56]。虽然目前相关研究较少,但上述最新的文献显示补充益生菌对促进营养物质吸收具有一定潜力。

2.4 补充益生菌对身体成分的影响

身体成分和体重是影响运动表现的因素之一,速度、耐力、力量和灵敏等身体素质需要较大的肌肉/脂肪比。几种乳酸菌菌株,包括鼠李糖乳杆菌、短双歧杆菌和乳酸双歧杆菌,已被报道可有效降低肥胖者的脂肪量^[57-58]。然而,仅有个别研究关注了益生菌对于健康个体或运动员身体成分的影响。植物乳杆菌 TWK10^[10]干预 6 周可降低健康男性的体脂,升高肌肉质量百分比。枯草芽孢杆菌 DE111 对体成分的影响报道不一。Toohey 等^[59]发现,10 周抗阻训练期间补充枯草芽孢杆菌 DE111 和蛋白质和碳水化合物饮料可显著降低女排和足球运动员体脂百分比。另一项研究报告,大学生棒球运动员补充稍小剂量的相同益生菌虽不影响身体成分,但可降低血浆 TNF- α 水平^[60],而 TNF- α 升高与骨骼肌蛋白合成受抑制和肌肉功能受损有关^[61-62]。这两项研究的差异可能与训练方式以及饮食不同有关。此外,由于这两项研究中受试者都是大学生,益生菌的积极作用可能被饮食、休息或恢复能力等因素所掩盖。

益生菌补充剂的抗肥胖作用可能与其改变肠道微生物群、重塑能量代谢、改变产热、糖代谢、脂代谢相关基因的表达、副交感神经活性有关^[63]。一些研究推测补充益生菌可能促进了蛋白质的吸收和利用,因而有助于改善身体成分^[13,35],然而,缺乏明确的作用机制。此外,短双歧杆菌 B-3 可激活 AMPK/PGC-1 α 信号通路改变骨骼肌代谢,以及激活苏氨酸激酶促进肌肉肥大,从而增加比目鱼肌的质量和力量^[64]。由于饮食和运动训练对身体成分的影响较大,因此对于得出益生菌影响身体成分的结论需要谨慎。

2.5 补充益生菌改善免疫机能

长时间的高强度运动与短暂的免疫功能障碍和疾病风险增加有关^[65]。由于黏膜和全身免疫反应的短暂抑制,免疫细胞的数量减少和功能降低,

运动员特别容易受到病毒性呼吸道感染的影响,最终影响训练效果和运动表现^[66]。减少上呼吸道感染 (Upper respiratory tract infection, URTI) 的发生率和/或严重性和症状持续时间是耐力运动员比较关注的,而补充益生菌被认为是预防此类疾病的有效策略^[14,67],可最大程度地减少训练日缺席,对运动表现产生积极影响。

目前,关于补充益生菌对运动员免疫机能影响的研究较多,训练负荷较高的耐力运动员是主要的研究对象。在益生菌对免疫机能影响的 23 项研究中,仅有 5 项研究报告没有影响,17 项研究报告了改善作用,主要体现在益生菌激活 T 淋巴细胞和 B 淋巴细胞,上调自然杀伤细胞活性^[29],增加抗炎细胞因子^[20,30]、分泌型免疫球蛋白 A (Secretory immunoglobulin A, SIgA)^[68-69]和 IL-10^[6]的分泌,抑制促炎细胞因子(TNF- α 、IL-6 和 IL-8)的表达^[6,60,69],以及降低 URTI 的发生率和/或症状严重程度。

在激烈的训练或比赛中 URTI 发生率较高,尤其是铁人三项和马拉松等耐力运动。现有关于益生菌的研究中,有 6 项研究表明 URTI 的发生率下降^[2,4,29-30,39,70],7 项研究发现症状严重程度减轻^[2,4,30,39,70-72],2 项研究表明 URTI 持续时间缩短^[31,73],涉及的益生菌有发酵乳杆菌 VRI-003、乳杆菌、干酪乳杆菌、双歧杆菌亚种、嗜酸乳杆菌和瑞士乳杆菌等。此外,对于健康个体,益生菌也可以降低 URTI 的风险^[71]。

补充益生菌缓解 URTI 的作用可能与益生菌增强黏膜和全身的免疫力有关。益生菌可以增强宿主免疫系统和共生细菌之间的沟通,从而建立互惠互利的关系。益生菌和微生物来源的 SCFAs (尤其是丁酸盐)通过诱导调节性 T (Treg) 细胞可激活免疫系统,提高机体免疫^[74-75]。Clancy 等^[20]研究发现,优秀运动员疲劳运动后 T 细胞免疫功能被抑制,血液中由 CD4⁺ 的 T 细胞分泌的干扰素- γ (IFN gamma, IFN- γ) 含量明显降低,而补充嗜酸乳杆菌 4 周后,疲劳运动员 T 细胞产生的 IFN- γ 增加,非疲劳运动员的唾液中 IFN- γ 浓度也升高。此研究首次证明益生菌具有逆转 T 细胞缺陷和增强黏膜 IFN- γ 浓度的能力,并且益生菌的作用可能与机体本身的免疫状态有关。此外,益生菌也可

诱导 B 细胞增殖^[76]来增加唾液中 SIgA 的浓度。IgA 可防止病原体的黏附,在维持黏膜稳态中起着关键作用。研究发现,耐力运动员的唾液分泌型 IgA 水平降低,并且其下降幅度与 URTI 风险升高有关^[77]。Gleeson 等^[70]研究表明,4 个月冬训期间补充含有干酪乳杆菌 Shirota 的发酵乳后,耐力运动员 URTI 发病率降低了 36%,伴随着唾液 IgA 浓度显著升高。另一项研究中,42 名男性马拉松比赛前 30 d 补充相同的益生菌可改善马拉松比赛后全身和气道的免疫反应,包括减少鼻黏膜中性粒细胞浸润、调节上呼吸道中促炎和抗炎细胞因子水平(降低 IL-1、IL-6、IL-5、IL-13 和 TNF- α 水平,升高 IL-10 水平),以及维持唾液 IgA 和抗菌肽的水平,并且 URTI 的发生率和持续时间也有改善趋势^[69]。这些结果表明,每天摄入益生菌能够诱导抗炎反应,从而减轻马拉松运动对黏膜炎症的有害作用。

总体来讲,目前的研究结论偏向于补充益生菌对耐力运动员免疫系统的影响是积极的,可减轻 URTI 对训练或比赛的负面影响,间接增强身体机能。未来的研究应更多的将 URTI 的发病率、症状与免疫反应的多种标志物联系起来,以更好地了解不同的益生菌菌株如何影响机体免疫。

2.6 补充益生菌减轻胃肠道症状

运动引起的胃肠道不适是耐力运动员常面临的一个问题^[78],30%~50%的运动员会出现胃肠道不适症状^[79],包括恶心、呕吐、腹胀和腹泻等。目前公认内脏血流量减少是加剧运动引起的胃肠道症状的主要因素之一。血液循环减少导致肠上皮细胞缺氧,从而损害细胞并引起肠通透性增加,内毒素进入肠组织和血液循环,刺激免疫系统甚至导致内毒血症,而循环中脂多糖(Lipopolysaccharides, LPS)的升高已被证明与胃肠道症状发生率增加有关^[80]。

7 项研究显示了补充益生菌对运动员胃肠道健康的积极作用。Pugh 等^[34]和 Kekkonen 等^[81]评估了多菌株益生菌补充剂对马拉松比赛中胃肠道症状、消化道通透性和免疫反应指标的影响,发现其可降低马拉松运动员比赛期间以及赛后胃肠道症状的严重程度和持续时间。值得注意的是,尽管益生菌组和安慰剂组之间的比赛完成时间没有差

异,但在比赛最后三分之一期间跑步速度的降低与主观胃肠道症状的严重程度之间存在显著相关性,益生菌组在比赛的最后阶段能够更好地保持跑步速度^[34]。然而,补充益生菌对马拉松比赛后升高的 CD14、IL-6、IL-8、IL-10、皮质醇和胃肠道通透性没有影响。因此,补充益生菌减轻胃肠道症状的确切机制无法确定。Haywood 等^[73]发现益生菌可降低胃肠道症状的发生率;而 West 等^[2]发现在较高的训练负荷下,男性胃肠道症状的严重程度有所降低,而女性运动员出现轻度胃肠道症状的频率增加,这可能是肠道对益生菌短期的适应现象。此外,益生菌干预可缓解运动引起的肠道通透性增加,如补充益生菌可降低运动员高温环境中力竭运动^[28]、铁人三项赛后^[32]血清 LPS 含量,以及一次大强度运动后粪便中 Zonulin 的水平^[82]。尽管运动相关的胃肠道症状并不总是胃肠道屏障功能损伤和通透性增加导致的,但这并不排除运动期间胃肠道屏障的潜在重要性以及益生菌可能发挥治疗作用^[32]。

益生菌改善肠道健康的机制包括调节肠道微生物群组成^[2,83]、增加有益菌的丰度^[84]、升高 SCFAs 的水平^[85]、增强肠道上皮屏障功能^[56]以及抑制炎症反应^[86]。研究发现,嗜酸乳杆菌和双歧杆菌通过抑制核因子 κ B(Nuclear factor kappa B, NF- κ B)活化,减少 TNF- α 、IL-6 和 IL-8 的表达以及结肠中性粒细胞浸润来减轻结肠炎症损伤^[86-87]。芽孢杆菌 SC06 可以通过 p38 MAPK 介导的自噬减轻氧化应激诱导的肠道损伤和细胞凋亡^[88]。因此,补充益生菌可能有助于缓解长时间耐力运动引发的胃肠道屏障损伤,进而减轻胃肠症状。虽然也有一些研究并未发现益生菌对肠道通透性^[60,89]、胃肠道症状^[29]以及胃肠道疾病发生率^[71]的改善作用,但总体来讲,益生菌对胃肠道健康的影响是积极有益的。

2.7 补充益生菌提高机体抗氧化能力

细胞氧化代谢过程中会产生活性氧(Reactive oxygen species, ROS),机体抗氧化系统可消除低水平的 ROS,但急性疲劳运动时 ROS 过量积累容易引起氧化应激^[90],导致细胞损伤和炎症并与疲劳的发生有关^[91],而降低运动引起的氧化应激有助于推迟疲劳并改善身体机能。Hsu 等^[92]发现,相比于无菌小鼠,无特定病原体小鼠的耐力游

泳时间更长,其血清谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GPX)和过氧化氢酶的水平也较高。这些结果提示,肠道菌群可能通过抗氧化酶系统影响运动表现。

益生菌已被证明可以调节肠道菌群稳态、增加基础状态血浆抗氧化能力以及减轻高强度运动或力竭比赛诱导的氧化应激^[8,38,93]。大强度运动训练的自行车运动员在4周训练期间补充鼠李糖乳杆菌 IMC501 和副干酪乳杆菌 IMC502 后,血浆抗氧化剂水平显著增加,运动训练诱导的氧化应激也明显减轻^[38]。Michalickova 等^[8]给10名优秀耐力运动员(铁人三项、自行车者和耐力运动员)在3个月常规训练时服用瑞士乳杆菌 L10,发现训练结束时益生菌组血清丙二醛水平显著降低。Mazani 等^[94]也发现2周益生菌干预显著升高女性一次力竭运动后血液 GPX 水平和血清总抗氧化能力。植物乳杆菌 PS128 也可改善铁人三项运动员高强度运动导致的氧化应激,并提升运动表现^[6]。以上研究通过血液指标证实了益生菌补充剂可以作为运动员抗氧化损伤的保护因子。

研究证实,益生菌通过多种的机制表现出抗氧化能力,包括螯合 Fe^{2+} 或 Cu^{2+} 而具有较高的抗氧化能力^[93];产生具有抗氧化能力的代谢产物,如:发酵菌 E3 和 E18 可产生谷胱甘肽^[95];上调机体总抗氧化剂水平^[8];调节抗氧化剂信号通路,如核因子 NF-E2^[96]等。此外,多种益生菌被证明具有抗氧化活性^[97],如保加利亚乳杆菌、乳酸菌、嗜酸乳杆菌和干酪乳杆菌。因此,益生菌可被视为一种营养补充策略来改善运动相关的氧化应激。然而,目前关于益生菌抗氧化作用的研究较少,其发挥保护作用的靶点和机制尚不清楚,还需要更多的研究为益生菌制剂应用于运动员提供科学的依据。

3 有待解决的问题

补充益生菌的有益效果取决于菌株、剂量、持续时间、补充形式和宿主生理状态以及目标人群和目标结果^[7]。由于补充益生菌对身体机能影响的研究数量有限,每项研究的受试者较少,并采用了不同的训练方案,也有研究未能证实益生菌的有益作用,因此关于补充益生菌的建议应该考虑以

上因素。乳杆菌属和双歧杆菌属是研究最多的益生菌,然而即使在单个物种内,益生菌的益处也常常是菌株特异性的。

在检验益生菌对身体机能影响的研究中,益生菌的补充期从2周到3个月不等(表1),短期补充益生菌可能无法真实地评估其作用^[98]。需要注意的是,一项研究显示补充益生菌后胃肠道症状有所增加^[2]。由于胃肠道需要一定时间适应所补充的微生物,在此期间可能会出现轻度的胃肠道症状(例如肠胃气胀)。因此益生菌应至少在重要比赛前14 d进行补充^[2]。此外,益生菌的许多作用是剂量依赖性的,给药剂量是需要考虑的重要因素。益生菌以胶囊、粉剂或添加到某些乳制品(发酵乳或酸奶)的形式补充,建议量约为每天 $10^8 \sim 10^9$ CFU^[7],然而,目前没有针对运动员的益生菌选择和剂量的明确建议。与其他人群相比,运动员的微生物群有几个主要差异^[99-100],这可能会影响益生菌对肠道微生物组和宿主的作用。未来,随着基因组学、代谢组学和蛋白质组学等技术的广泛应用,应针对性研究特定菌株的定植和对肠道微生物的影响,选择合适的菌种以适应运动员的个体差异性。并且,为了充分发挥益生菌的功效,相关研究应结合训练方式、免疫指标的结果和饮食的平行变化,确定可提高运动表现的浓度和剂量。

4 总结与展望

益生菌对耐力运动员运动表现的影响是多方面作用综合的结果,其对健康的促进作用与微生物群组成的变化、机体免疫机能的改善和肠道健康有关,这可能降低相关疾病感染的风险,通过增加健康训练的天数和完成比赛的次数使运动员受益。除此之外,益生菌可通过推迟疲劳、促进恢复、改善营养吸收、增加能量供应和减轻运动引起的氧化应激来提升耐力运动表现(图1)。总体来讲,补充特定的益生菌可作为确保运动员机能状态的营养策略之一,然而,大多数研究中并未评估运动表现,今后仍需要高质量、长期的、适当规模的研究来确定摄入益生菌对运动表现的影响的因果关系。

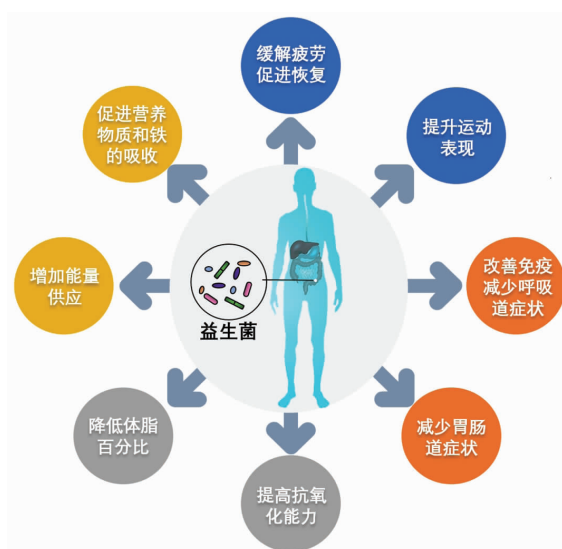


图1 运动员补充益生菌的益处和可能机制

Fig.1 Benefits and possible mechanisms of probiotic supplementation for athletes

参 考 文 献

- [1] COSTA R, SNIPE R, KITIC C M, et al. Systematic review: Exercise-induced gastrointestinal syndrome-implications for health and intestinal disease [J]. *Aliment Pharmacol Ther*, 2017, 46(3): 246-265.
- [2] WEST N P, PYNE D B, CRIPPS A W, et al. *Lactobacillus fermentum* (PCC (R)) supplementation and gastrointestinal and respiratory-tract illness symptoms: A randomised control trial in athletes[J]. *Nutrition Journal*, 2011, 10: 30.
- [3] 覃飞, 赵杰修, 王松涛, 等. 运动性免疫抑制及其干预措施研究进展[J]. *中国运动医学杂志*, 2018, 37(7): 615-623.
QIN F, ZHAO J X, WANG S T, et al. Research progress in exercise-induced immunosuppression and its intervention measures[J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2018, 37(7): 615-623.
- [4] KOMANO Y, SHIMADA K, NAITO H, et al. Efficacy of heat-killed *Lactococcus lactis* JCM 5805 on immunity and fatigue during consecutive high intensity exercise in male athletes: A randomized, placebo-controlled, double-blind trial [J]. *J Int Soc Sports Nutr*, 2018, 15(1): 39.
- [5] CASTELL L M, NIEMAN D C, BERMON S, et al. Exercise-induced illness and inflammation: Can immunonutrition and iron help? [J]. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2019, 29(2): 181-188.
- [6] 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.
- [7] JAGER R, MOHR A E, CARPENTER K C, et al. International society of sports nutrition position stand: Probiotics [J]. *J Int Soc Sports Nutr*, 2019, 16(1): 62.
- [8] MICHALICKOVA D, KOTUR-STEVLJEVIC J, MILJKOVIC M, et al. Effects of probiotic supplementation on selected parameters of blood prooxidant-antioxidant balance in elite athletes: A double-blind randomized placebo-controlled study [J]. *Journal of Human Kinetics*, 2018, 64: 111-122.
- [9] HUANG W C, HSU Y J, LI H, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* TWK10 on improving endurance performance in humans [J]. *Chin J Physiol*, 2018, 61(3): 163-170.
- [10] HUANG W C, LEE M C, LEE C C, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* TWK10 on exercise physiological adaptation, performance, and body composition in healthy humans [J]. *Nutrients*, 2019, 11(11): 2836.
- [11] CHEN Y M, WEI L, CHIU Y S, et al. *Lactobacillus plantarum* TWK10 supplementation improves exercise performance and increases muscle mass in mice [J]. *Nutrients*, 2016, 8(4): 205.
- [12] PUGH J N, WAGENMAKERS A, DORAN D A, et al. Probiotic supplementation increases carbohydrate metabolism in trained male cyclists: A randomized, double-blind, placebo-controlled crossover trial [J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2020, 318(4): E504-E513.
- [13] KELLER D, VAN DINTER R, CASH H, et al. *Bacillus coagulans* GBI-30, 6086 increases plant protein digestion in a dynamic, computer-controlled *in vitro* model of the small intestine (TIM-1) [J]. *Beneficial Microbes*, 2017, 8(3): 491-496.
- [14] MARTINEN M, ALA-JAAKKOLA R, LAITILA A, et al. Gut microbiota, probiotics and physical performance in athletes and physically active individuals [J]. *Nutrients*, 2020, 12(10): 2936.
- [15] 刘卓群, 马亚楠, 闻德亮. 益生菌, 益生元对肥胖的治疗及其机制的研究进展 [J]. *中国微生态学杂志*,

- 2018, 30(9): 1096–1101.
- LIU Z Q, MA Y N, WEN D L. Treatment of obesity and its mechanisms by probiotics and prebiotics [J]. Chinese Journal of Microecology, 2018, 30(9): 1096–1101.
- [16] 张双双, 张林, 张成岗. 微生态制剂在运动领域的应用[J]. 中国运动医学杂志, 2017, 36(1): 80–83.
- ZHANG S S, ZHANG L, ZHANG C G. Application of microecological preparations in sports field [J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2017, 36(1): 80–83.
- [17] 阿热爱·巴合提, 武瑞赞, 肖梦圆, 等. 益生菌的生理功能及作用机理研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(22): 270–275.
- AREAI B, WU R Y, XIAO M Y, et al. Research progress in physiological function and mechanism of probiotics [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(22): 270–275.
- [18] LEITE G, RESENDE M S A, WEST N P, et al. Probiotics and sports: A new magic bullet? [J]. Nutrition, 2019, 60: 152–160.
- [19] 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, 38(8): 704–711.
- XIA Y L, YI M Q. Supplementing probiotics to improve exercise stress and its mechanism research progress [J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2019, 38(8): 704–711.
- [20] CLANCY R L, GLEESON M, COX A, et al. Reversal in fatigued athletes of a defect in interferon gamma secretion after administration of *Lactobacillus acidophilus* [J]. Br J Sports Med, 2006, 40(4): 351–354.
- [21] SIVAMARUTHI B S, KESIKA P, CHAIYASUT C. Effect of probiotics supplementations on health status of athletes [J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(22): 4469.
- [22] LEE M C, HSU Y J, CHUANG H L, et al. *In vivo* ergogenic properties of the *Bifidobacterium longum* OLP-01 isolated from a weightlifting gold medalist [J]. Nutrients, 2019, 11(9): 2003.
- [23] SCHEIMAN J, LUBER J M, CHAVKIN T A, et al. Meta-omics analysis of elite athletes identifies a performance-enhancing microbe that functions via lactate metabolism [J]. Nature Medicine, 2019, 25(7): 1104–1109.
- [24] 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.
- [25] TURCK D, CASTENMILLER J, De HENAUW S, et al. Guidance on the scientific requirements for health claims related to muscle function and physical performance: (Revision 1) [J]. EFSA J, 2018, 16(10): e5434.
- [26] HUANG W C, HSU Y J, HUANG C C, et al. Exercise training combined with *Bifidobacterium longum* OLP-01 supplementation improves exercise physiological adaptation and performance [J]. Nutrients, 2020, 12(4): 1145.
- [27] SALEHZADEH K. The effects of probiotic yogurt drink on lipid profile, CRP, and record changes in aerobic athletes [J]. Life Sci, 2015, 9: 32–37.
- [28] SHING C M, PEAKE J M, LIM C L, et al. Effects of probiotics supplementation on gastrointestinal permeability, inflammation and exercise performance in the heat [J]. European Journal of Applied Physiology, 2014, 114(1): 93–103.
- [29] SALARKIA N, GHADAMLI L, ZAERI F, et al. Effects of probiotic yogurt on performance, respiratory and digestive systems of young adult female endurance swimmers: A randomized controlled trial [J]. Med J Islam Repub Iran, 2013, 27(3): 141–146.
- [30] COX A J, PYNE D B, SAUNDERS P U, et al. Oral administration of the probiotic *Lactobacillus fermentum* VRI-003 and mucosal immunity in endurance athletes [J]. Br J Sports Med, 2010, 44(4): 222–226.
- [31] MICHALICKOVA D, MINIC R, DIKIC N, et al. *Lactobacillus helveticus* Lafti L10 supplementation reduces respiratory infection duration in a cohort of elite athletes: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. Appl Physiol Nutr Metab, 2016, 41(7): 782–789.
- [32] ROBERTS J D, SUCKLING C A, PEEDLE G Y, et al. An exploratory investigation of endotoxin levels in novice long distance triathletes, and the effects of a multi-strain probiotic/prebiotic, antioxidant intervention [J]. Nutrients, 2016, 8(11): 733.
- [33] MARSHALL H, CHRISMAS B, SUCKLING C A, et al. Chronic probiotic supplementation with or without

- glutamine does not influence the eHsp72 response to a multi-day ultra-endurance exercise event[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2017, 42(8): 876–883.
- [34] PUGH J N, SPARKS A S, DORAN D A, et al. Four weeks of probiotic supplementation reduces GI symptoms during a marathon race[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2019, 119(7): 1491–1501.
- [35] JAGER R, SHIELDS K A, LOWERY R P, et al. Probiotic *Bacillus coagulans* GBI-30, 6086 reduces exercise-induced muscle damage and increases recovery[J]. *PeerJ*, 2016, 4: e2276.
- [36] DUPUY O, DOUZI W, THEUROT D, et al. An evidence-based approach for choosing post-exercise recovery techniques to reduce markers of muscle damage, soreness, fatigue, and inflammation: A systematic review with Meta-analysis[J]. *Frontiers in Physiology*, 2018, 9: 403.
- [37] PEAKE J M, NEUBAUER O, DELLA G P, et al. Muscle damage and inflammation during recovery from exercise[J]. *J Appl Physiol (1985)*, 2017, 122(3): 559–570.
- [38] MARTARELLI D, VERDENELLI M C, SCURI S, et al. Effect of a probiotic intake on oxidant and antioxidant parameters in plasma of athletes during intense exercise training [J]. *Current Microbiology*, 2011, 62(6): 1689–1696.
- [39] STRASSER B, GEIGER D, SCHAUER M, et al. Probiotic supplements beneficially affect tryptophan-kynurenine metabolism and reduce the incidence of upper respiratory tract infections in trained athletes: A randomized, double-blinded, placebo-controlled trial[J]. *Nutrients*, 2016, 8(11): 752.
- [40] KAVANAGH J J, MCFARLAND A J, TAYLOR J L. Enhanced availability of serotonin increases activation of unfatigued muscle but exacerbates central fatigue during prolonged sustained contractions[J]. *J Physiol*, 2019, 597(1): 319–332.
- [41] MEEUSEN R. Exercise, nutrition and the brain[J]. *Sports Medicine*, 2014, 44: S47–S56.
- [42] LEBLANC J G, CHAIN F, MARTIN R, et al. Beneficial effects on host energy metabolism of short-chain fatty acids and vitamins produced by commensal and probiotic bacteria[J]. *Microbial Cell Factories*, 2017, 16(1): 79.
- [43] XU M, KITaura Y, ISHIKAWA T, et al. Endurance performance and energy metabolism during exercise in mice with a muscle-specific defect in the control of branched-chain amino acid catabolism [J]. *PLoS One*, 2017, 12(7): e180989.
- [44] YAN F F, LI N, SHI J L, et al. *Lactobacillus acidophilus* alleviates type 2 diabetes by regulating hepatic glucose, lipid metabolism and gut microbiota in mice[J]. *Food & Function*, 2019, 10(9): 5804–5815.
- [45] DEN BESTEN G, LANGE K, HAVINGA R, et al. Gut-derived short-chain fatty acids are vividly assimilated into host carbohydrates and lipids[J]. *Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol*, 2013, 305(12): G900–G910.
- [46] 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.
- [47] ALLEN J M, MAILING L J, NIEMIRO G M, et al. Exercise alters gut microbiota composition and function in lean and obese humans [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2018, 50(4): 747–757.
- [48] RADAK Z, ZHAO Z, KOLTAI E, et al. Oxygen consumption and usage during physical exercise: The balance between oxidative stress and ROS-dependent adaptive signaling[J]. *Antioxid Redox Signal*, 2013, 18(10): 1208–1246.
- [49] MIKA A, FLESHNER M. Early-life exercise may promote lasting brain and metabolic health through gut bacterial metabolites [J]. *Immunology And Cell Biology*, 2016, 94(2): 151–157.
- [50] HAWLEY J A, BURKE L M. Carbohydrate availability and training adaptation: Effects on cell metabolism[J]. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 2010, 38(4): 152–160.
- [51] JAGER R, ZARAGOZA J, PURPURA M, et al. Probiotic administration increases amino acid absorption from plant protein; A placebo-controlled, randomized, double-blind, multicenter, crossover study [J]. *Probiotics Antimicrob Proteins*, 2020, 12(4): 1330–1339.
- [52] SIM M, GARVICAN-LEWIS L A, COX G R, et al. Iron considerations for the athlete: A narrative review[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2019, 119(7): 1463–1478.
- [53] AXLING U, ONNING G, COMBS M A, et al. The effect of *Lactobacillus plantarum* 299v on iron status

- and physical performance in female iron-deficient athletes: A randomized controlled trial[J]. *Nutrients*, 2020, 12(5): 1279.
- [54] VONDERHEID S C, 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.
- [55] MOHR A E, JAGER R, CARPENTER K C, et al. The athletic gut microbiota[J]. *J Int Soc Sports Nutr*, 2020, 17(1): 24.
- [56] KUMAR M, KISSOON-SINGH V, CORIA A L, et al. Probiotic mixture VSL#3 reduces colonic inflammation and improves intestinal barrier function in Muc2 mucin-deficient mice[J]. *Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol*, 2017, 312(1): G34-G45.
- [57] MEKKES M C, WEENEN T C, BRUMMER R J, et al. The development of probiotic treatment in obesity: A review[J]. *Beneficial Microbes*, 2014, 5(1): 19-28.
- [58] MINAMI J, KONDO S, YANAGISAWA N, et al. Oral administration of *Bifidobacterium breve* B-3 modifies metabolic functions in adults with obese tendencies in a randomised controlled trial[J]. *J Nutr Sci*, 2015, 4: e17.
- [59] TOOHEY J C, TOWNSEND J R, JOHNSON S B, et al. Effects of probiotic (*Bacillus subtilis*) supplementation during offseason resistance training in female division I athletes[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2020, 34(11): 3173-3181.
- [60] TOWNSEND J R, BENDER D, VANTREASE W C, et al. Effects of probiotic (*Bacillus subtilis* DE111) supplementation on immune function, hormonal status, and physical performance in division I baseball players[J]. *Sports (Basel)*, 2018, 6(3): 70.
- [61] HARDIN B J, CAMPBELL K S, SMITH J D, et al. TNF- α acts via TNFR1 and muscle-derived oxidants to depress myofibrillar force in murine skeletal muscle[J]. *J Appl Physiol (1985)*, 2008, 104(3): 694-699.
- [62] LANG C H, FROST R A, NAIRN A C, et al. TNF- α impairs heart and skeletal muscle protein synthesis by altering translation initiation[J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2002, 282(2): E336-E347.
- [63] 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, 2019: 3291367.
- [64] TODA K, YAMAUCHI Y, TANAKA A, et al. Heat-killed *Bifidobacterium breve* B-3 enhances muscle functions: Possible involvement of increases in muscle mass and mitochondrial biogenesis[J]. *Nutrients*, 2020, 12(1): 219.
- [65] NIEMAN D C, WENTZ L M. The compelling link between physical activity and the body's defense system[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2019, 8(3): 201-217.
- [66] 唐晖, 周亮, 姚绩伟, 等. 运动性免疫抑制的研究进展[J]. *武汉体育学院学报*, 2008, 42(4): 75-81. TANG H, ZHOU L, YAO J W, et al. Exercise-induced immunosuppression[J]. *Journal of Wuhan Institute of Physical Education*, 2008, 42(4): 75-81.
- [67] LAGOWSKA K, BAJERSKA J. Effects of probiotic supplementation on 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.
- [68] KABERDOSS J, DEVI R S, MARY R R, et al. Effect of yoghurt containing *Bifidobacterium lactis* Bb12 (R) on faecal excretion of secretory immunoglobulin A and human beta-defensin 2 in healthy adult volunteers[J]. *Nutrition Journal*, 2011, 10: 138.
- [69] VAISBERG M, PAIXAO V, ALMEIDA E B, et al. Daily intake of fermented milk containing *Lactobacillus casei* Shirota (Lcs) modulates systemic and upper airways immune/inflammatory responses in marathon runners[J]. *Nutrients*, 2019, 11(7): 1678.
- [70] GLEESON M, BISHOP N C, OLIVEIRA M, et al. Daily probiotic's (*Lactobacillus casei* Shirota) reduction of infection incidence in athletes[J]. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2011, 21(1): 55-64.
- [71] WEST N P, HORN P L, PYNE D B, et al. Probiotic supplementation for respiratory and gastrointestinal illness symptoms in healthy physically active individuals[J]. *Clinical Nutrition*, 2014, 33(4): 581-587.
- [72] TAVARES-SILVA E, CARIS A V, SANTOS S A, 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.
- [73] HAYWOOD B A, BLACK K E, BAKER D, et al. Probiotic supplementation reduces the duration and incidence of infections but not severity in elite rugby union players[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2014, 17(4): 356–360.
- [74] GEUKING M B, MCCOY K D, MACPHERSON A J. Metabolites from intestinal microbes shape Treg[J]. *Cell Research*, 2013, 23(12): 1339–1340.
- [75] THOMAS C M, VERSALOVIC J. Probiotics–host communication: Modulation of signaling pathways in the intestine[J]. *Gut Microbes*, 2010, 1(3): 148–163.
- [76] YANAGIBASHI T, HOSONO A, OYAMA A, et al. IgA production in the large intestine is modulated by a different mechanism than in the small intestine: *Bacteroides acidifaciens* promotes IgA production in the large intestine by inducing germinal center formation and increasing the number of IgA+ B cells[J]. *Immunobiology*, 2013, 218(4): 645–651.
- [77] PENAILILLO L, MAYA L, NINO G, et al. Salivary hormones and IgA in relation to physical performance in football[J]. *J Sports Sci*, 2015, 33(20): 2080–2087.
- [78] SMITH K A, PUGH J N, DUCA F A, et al. Gastrointestinal pathophysiology during endurance exercise: Endocrine, microbiome, and nutritional influences[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2021, 121(10): 2657–2674.
- [79] DE OLIVEIRA E P, BURINI R C, JEUKENDRUP A. Gastrointestinal complaints during exercise: Prevalence, etiology, and nutritional recommendations[J]. *Sports Medicine*, 2014, 44 (Suppl 1): S79–S85.
- [80] STUEMPFLE K J, VALENTINO T, HEW–BUTLER T, et al. Nausea is associated with endotoxemia during a 161–km ultramarathon[J]. *J Sports Sci*, 2016, 34(17): 1662–1668.
- [81] KEKKONEN R A, VASANKARI T J, VUORIMAA T, et al. The effect of probiotics on respiratory infections and gastrointestinal symptoms during training in marathon runners [J]. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2007, 17(4): 352–363.
- [82] 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.
- [83] AZAD M, SARKER M, LI T, et al. Probiotic species in the modulation of gut microbiota: An overview[J]. *Biomed Research International*, 2018, 2018: 9478630.
- [84] AXELROD C L, BRENNAN C J, CRESCI G, et al. UCC118 supplementation reduces exercise–induced gastrointestinal permeability and remodels the gut microbiome in healthy humans[J]. *Physiol Rep*, 2019, 7(22): e14276.
- [85] MACH N, FUSTER–BOTELLA D. Endurance exercise and gut microbiota: A review[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2017, 6(2): 179–197.
- [86] WANG Y, GU Y, FANG K, et al. *Lactobacillus acidophilus* and *Clostridium butyricum* ameliorate colitis in murine by strengthening the gut barrier function and decreasing inflammatory factors[J]. *Beneficial Microbes*, 2018, 9(5): 775–787.
- [87] GUO S, GILLINGHAM T, GUO Y, et al. Secretions of *Bifidobacterium infantis* and *Lactobacillus acidophilus* protect intestinal epithelial barrier function[J]. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*, 2017, 64(3): 404–412.
- [88] WU Y P, WANG B K, XU H, et al. Probiotic *Bacillus* attenuates oxidative stress–induced intestinal injury via p38–mediated autophagy[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 2185.
- [89] GILL S K, ALLERTON D M, ANSLEY–ROBSON P, et al. Does short–term high dose probiotic supplementation containing *Lactobacillus casei* attenuate exertional–heat stress induced endotoxaemia and cytokinaemia?[J]. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2016, 26(3): 268–275.
- [90] 陈佩杰, 董静梅. 过度运动激活中性粒细胞产生的活性氧对淋巴细胞 DNA 损伤及干预研究[J]. *体育科学*, 2011, 31(1): 29–38.
- CHEN P J, DONG J M. Research on DNA damage of lymphocytes induced by ros mediated by nadph–oxidase in neutrophils and intervention after over–training[J]. *China Sport Science*, 2011, 31(1): 29–38.
- [91] POPRAC P, JOMOVA K, SIMUNKOVA M, et al.

- Targeting free radicals in oxidative stress-related human diseases[J]. Trends in Pharmacological Sciences, 2017, 38(7): 592-607.
- [92] HSU Y J, CHIU C C, LI Y P, et al. Effect of intestinal microbiota on exercise performance in mice [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2015, 29(2): 552-558.
- [93] WANG Y, WU Y P, WANG Y Y, et al. Antioxidant properties of probiotic bacteria [J]. Nutrients, 2017, 9(5): 521.
- [94] MAZANI M, NEMATI A, AMANI M, et al. The effect of probiotic yoghurt consumption on oxidative stress and inflammatory factors in young females after exhaustive exercise [J]. Journal of the Pakistan Medical Association, 2018, 68(12): 1748-1754.
- [95] KULLISAAR T, ZILMER M, MIKELSAAR M, et al. Two antioxidative *Lactobacilli* strains as promising probiotics[J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 72(3): 215-224.
- [96] GAO D W, GAO Z R, ZHU G H. Antioxidant effects of *Lactobacillus plantarum* via activation of transcription factor Nrf2[J]. Food & Function, 2013, 4(6): 982-989.
- [97] SAIDE J A, GILLILAND S E. Antioxidative activity of *Lactobacilli* measured by oxygen radical absorbance capacity [J]. Journal of Dairy Science, 2005, 88(4): 1352-1357.
- [98] GILL S K, TEIXEIRA A M, ROSADO F, et al. High-dose probiotic supplementation containing *Lactobacillus casei* for 7 days does not enhance salivary antimicrobial protein responses to exertional heat stress compared with placebo [J]. Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2016, 26(2): 150-160.
- [99] PETERSEN L M, BAUTISTA E J, NGUYEN H, et al. Community characteristics of the gut microbiomes of competitive cyclists[J]. Microbiome, 2017, 5(1): 98.
- [100] 金泽宇, 李威, 孙宝林. 宏基因组测序分析男性运动员肠道菌群物种组成及代谢通路特点[J]. 生物学杂志, 2019, 36(4): 7-13.
- JIN Z Y, LI W, SUN B L. Taxonomic and metabolic analysis of gut microbiota from male athletes based on metagenomic[J]. Journal of Biology, 2019, 36(4): 7-13.
- [101] CARBUHN A F, REYNOLDS S M, CAMPBELL C W, et al. Effects of probiotic (*Bifidobacterium longum* 35624) supplementation on exercise performance, immune modulation, and cognitive outlook in division I female swimmers [J]. Sports (Basel), 2018, 6(4): 116.

Advances in the Effect and Mechanism of Probiotics Supplementation on the Performance of Endurance Athletes

Liu Chenzhe¹, Shi Lijun^{1*}, Wang Wenrui¹, Xiao Hui², Zhang Lufang¹

¹Department of Exercise Physiology, College of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084

²China Football College, Beijing Sport University, Beijing 100084

Abstract Probiotics are living microorganisms and are increasingly used as nutritional supplements to improve the health of athletes. The beneficial effects of probiotics on gastrointestinal health and upper respiratory tract illness symptoms have been well-acknowledged. Therefore, supplementation of probiotics may indirectly improve athletic performance. However, some recent studies have shown that probiotic intervention can improve the performance of endurance athletes, but the mechanism remains controversial and unclear. This article reviewed the latest research on the performance of endurance athletes with probiotic supplementation, to explore the mechanism of improving the performance of direct and indirect, including alleviating fatigue, promoting post-exercise recovery, promoting nutrient absorption and energy collection, improving the body's immune function and intestinal health, as well as reduce oxidative stress. The aim was to provide a theoretical basis for using probiotics to maintain the functional state of athletes and to provide new ideas for improving the performance of endurance athletes.

Keywords probiotics; endurance athletes; exercise performance; fatigue recovery