

运动员肠道微生物组与营养干预研究进展

高健玮¹, 张璐佳¹, 马湘宁¹, 贾凌宇^{2*}, 陈芳^{1*}

(¹ 中国农业大学食品科学与营养工程学院 果蔬加工国家工程技术研究中心 北京 100193

² 中国农业大学体育教学部 北京 100083)

摘要 运动员日常管理的目标是优化比赛过程中的表现并提高训练期间的恢复效率。研究表明,运动员的肠道微生物组成与运动表现密切相关。本文综述运动员群体的肠道微生物组特征及其对运动表现的提升机制,包括肠道微生物促进乳酸代谢以及短链脂肪酸等肠道微生物代谢物在调节糖原储存和肠道屏障功能方面的重要性,总结目前以肠道微生物组为靶点,通过益生菌、益生元和促进肌肉合成的膳食补充剂等营养干预提高运动表现的研究进展。此外,提出未来通过调节肠道微生物组提高耐力和运动能力这一重要的研究方向和应用领域。

关键词 运动员; 肠道微生物; 运动表现; 益生菌; 益生元

文章编号 1009-7848(2024)12-0454-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.12.040

肠道微生物是与人体共生的一组活微生物,大约有 10^{14} ~ 10^{15} 个细菌在肠道内定植,显著影响人体的代谢功能、肠道发育以及免疫系统。越来越多的研究明确了环境和行为因素对肠道微生物组成和结构的影响。近年来,肠道微生物组与运动之间的关系逐渐受到广泛关注。研究发现,运动人群的肠道微生物组具有明显的差异特征,并且证明肠道微生物可能通过增强运动员乳酸代谢、优化能量供应^[1-2],或者通过产生的短链脂肪酸(Short-chain fatty, SCFAs)等代谢物参与宿主代谢、调节糖原储存以及肠屏障功能,从而改善运动表现。本文综述了运动员肠道微生物组成特征以及通过肠道微生物组提高运动表现的机制,总结了目前利用益生菌、益生元和补充 SCFAs 等营养干预途径调节运动肠道微生态组成提升运动表现。这些研究进展为利用肠道微生物组作为潜在靶点进行营养干预提升运动表现提供了可能。对未来通过调节肠道微生物组进行运动员的营养干预的研究领域进行了展望。

1 运动员肠道微生物组成的特殊性

运动员的肠道微生物组成与运动类型密切相

关,并显著影响着运动表现和代谢能力。耐力运动分为剧烈运动和适度运动两种类型。剧烈运动指在高强度(最大摄氧量>70%)下进行的体育锻炼,而适度运动则是指所有其它类型的运动(最大摄氧量<70%)。研究表明,剧烈运动和长时间训练会改变肠道微生物群的组成和功能,体育训练对微生物组的影响可以通过调节特定微生物的相对丰度来实现^[3]。

运动员肠道微生物组成和结构具有显著特征,表1显示了运动员和非运动员肠道微生物组成的差异。参加半程马拉松比赛的业余跑步者,其肠道微生物组在属水平上表现出假丁酸弧菌(*Pseudobutyribrio*)、粪球菌属(*Coprococcus*)、柯林斯氏菌属(*Collinsella*)和光冈菌属(*Mitsuokella*)的丰度显著增加,而拟杆菌属(*Bacteroides coprophilus*)的丰度显著减少^[4]。一项针对4名训练有素的男运动员进行高强度的连续5000 km跨洋划船比赛的研究中,在比赛前、期间和比赛后微生物组结构和代谢能力发生了显著变化,微生物多样性增加,同时增加了产丁酸微生物以及与改善代谢和胰岛素敏感性的微生物种类的丰度^[5]。

此外,研究证实了肠道微生物对运动表现有显著影响^[1-2,6]。例如,通过对比参加波士顿马拉松比赛前后运动员的肠道微生物组成,发现韦荣氏球菌属(*Veillonella*)在运动后增加,这与对另一组参加超级马拉松耐力跑的运动员的跟踪结果一致^[7]。

收稿日期: 2023-12-30

第一作者: 高健玮,女,博士生

通信作者: 陈芳 E-mail: chenfangch@sina.com

贾凌宇 E-mail: jlingyu@cau.edu.cn

韦荣氏球菌属是一种以乳酸为碳源的细菌,在运动过程中将乳酸转化为丙酮酸促进能量代谢,有助于优化运动员的训练和表现^[8-9]。在日本的一项研究中发现,单形拟杆菌(*Bacteroides uniformis*)丰度减少与 3 000 m 长跑运动员完成跑步的时间较长相关,并且补充 α -环糊精(α -cyclodextrin)后,肠道中的单形拟杆菌丰度增加,改善了耐力运

动表现^[10]。还有一项研究发现,从奥运举重金牌得主粪便中分离的双歧杆菌长古门(*Bifidobacterium longum*)菌株在移植于小鼠实验中,显示出具有改善运动能力和抗疲劳效果^[11]。Lee 等^[12]的动物模型研究中采用唾液乳杆菌(*Lactobacillus salivarius*)干预也起到了类似的效果。

表 1 运动员和非运动员肠道微生物组的差异

Table 1 Differences in gut microbiota between athletes and non-athletes

研究人群	微生物多样性指数	粪便微生物组成变化	参考文献
橄榄球运动员(n=40);对照组(n=46)	↑ α -多样性 (Shannon)	↑琥珀酸弧菌属 ↑S24-7 属 ↑普雷沃氏菌属 ↑琥珀酸弧菌属 ↓拟杆菌属 ↓乳酸杆菌属	[13]
健美运动员(n=15);跑步运动员(n=15); 对照组(n=15)	—	↑梭菌属 ↑艾森伯格菌属 ↑普拉梭菌属 ↑嗜血杆菌属 ↑萨特氏菌 ↓双歧杆菌属 ↓副萨特氏菌	[14]
高级武术运动员(n=12);初级武术运动 员(n=16名)	↑ α -多样性 (Shannon, Simpson)	↑嗜胆菌属 ↑颤螺菌属 ↑副拟杆菌属 ↑考拉杆菌属 ↓巨球形菌属	[15]
2015 年波士顿马拉松赛运动员(n=15) 赛艇运动员(n=7)	— ↑ α -多样性 (Shannon, Simpson)	↑韦荣氏球菌属 ↑梭菌属 ↑普拉梭菌属 ↑毛螺菌属 ↑瘤胃球菌属	[16] [17]
马拉松运动员(n=14);越野滑雪运动员 (n=11);久坐对照组(n=46)	↑ α -多样性 (Shannon, Simpson, Chao1)	↑普雷沃氏菌属 ↑韦荣氏球菌属 ↑罗氏菌属	[18]

综上所述,运动对肠道微生物组成和结构有显著影响,适宜的有氧训练可能诱导其发生显著的变化。而通过干预运动员肠道微生物组组成和结构可以改善运动引起的不适反应,提高运动员比赛成绩和训练期间的恢复能力。

2 肠道微生物对运动表现的影响机制

运动可能通过改变肠道微生物组成及其代谢

物从而提高运动表现。在运动过程中,大量乳酸被释放到血液中,而乳酸分泌到肠腔中可能改变肠道 pH 值。同时运动也会改变肠道微生物组成和功能,影响 SCFAs 的产生进而调控肠道屏障功能。

2.1 肠道微生物通过产生 SCFAs 改善肠道屏障功能

肠道屏障能够防止肠内的细菌和毒素等有害物质穿过肠黏膜进入体内其他组织、器官和血液

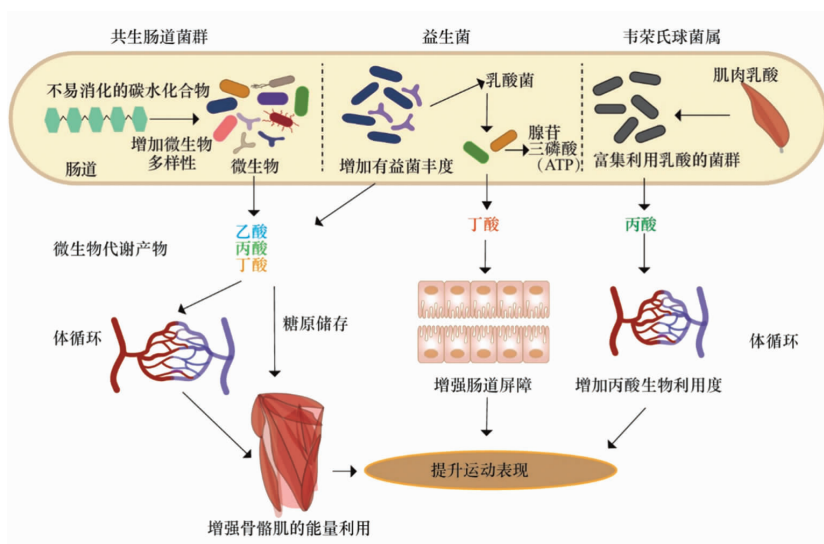


图1 肠道微生物对运动表现的调节机制

Fig.1 The regulatory mechanism of gut microbiota on exercise performance

循环系统^[19]。研究发现,耐力练习和高强度运动均可以暂时增加其通透性,引起肠道功能紊乱^[20-21],且受到运动类型、强度、年龄等多种因素的影响。20%~50%的运动员会出现呕吐、腹泻等肠道症状,且随着运动强度的增加这些症状会增加。研究发现,乳酸菌和双歧杆菌等有益微生物能增强肠道屏障功能,减少有害菌及LPS从肠道进入全身循环,从而降低炎症反应并改善免疫功能,间接改善耐力运动能力^[22-23]。Scheiman等^[16]报道运动能增加韦荣氏球菌属等产SCFAs(乙酸、丙酸等)的微生物数量,SCFAs除了作为燃料来源外,还可以通过调节肠道微生物组间接增加肠道肽的分泌,促进肠上皮屏障的完整性,维持肠道稳态^[24],因此,肠道微生物组的动态变化会改善运动引起的肠道屏障功能下降。

2.2 肠道微生物通过调节乳酸代谢改善运动表现

肠道微生物通过产生多种活性代谢物对运动表现产生积极影响(图1)。在运动过程中,骨骼肌是乳酸的主要产生者和利用者,大部分乳酸被氧化组织消耗以产生ATP(氧化型骨骼肌纤维),剩余部分则被运送到肝脏,并通过Cori循环转化为葡萄糖,新生成的葡萄糖进入全身循环,作为糖酵解底物供给运动中的骨骼肌使用^[25]。乳酸在运动过程中被组织摄取和利用,因此,增强乳酸清除的机制可能对运动能力和表现产生积极影响。

Scheiman等^[16]的研究表明,肠道微生物组(尤其是非典型韦荣氏球菌存在)可以通过增强乳酸代谢,在运动过程中优化能量供应来改善运动能力。为了更好的了解肠道微生物组与运动乳酸之间的关系,需来进一步评估运动状态下的乳酸动力学,并使用同位素示踪技术来确定乳酸产生、消耗和清除速率等乳酸代谢的具体特征^[26]。

2.3 肠道微生物通过影响糖原储存改善骨骼肌代谢

肌肉糖原耗竭是长时间剧烈运动中限制运动能力的主要因素之一。通过摄入高碳水化合物饮食以实现超补偿反应是最大限度增加糖原储存的方法。研究证实,一些有益的肠道微生物通过产生SCFAs增加骨骼肌中葡萄糖转运蛋白4(Glucose transporter type 4, GLUT4)的表达来增强糖原储存能力,从而增加骨骼肌的葡萄糖摄取和糖原补充^[27]。另一方面,SCFAs通过增加肌肉中AMP/ATP比例直接激活肌肉中的AMPK,或通过游离脂肪酸受体(Free fatty acid receptor, FFAR)-瘦素途径间接激活AMPK,调节与脂质和葡萄糖代谢相关因子的活性^[28-29]。此外,结肠中的SCFAs通过结肠中的FFAR2/3受体增加血浆饱腹激素(Peptide YY, PYY)含量,增强胰岛素在肌肉和脂肪组织中对葡萄糖的利用^[30]。尽管SCFAs调节运动机能的具体机制尚不清楚,但通过补充肠道微生物代谢物SCFAs对于增强运动能力的效果是

显而易见的。未来研究还应进一步加强代谢组学分析(宿主和微生物代谢产物)等手段,以更好地理解肠道微生物、SCFAs 和运动表现之间的关系。

3 通过营养干预调节肠道微生物组改善运动表现

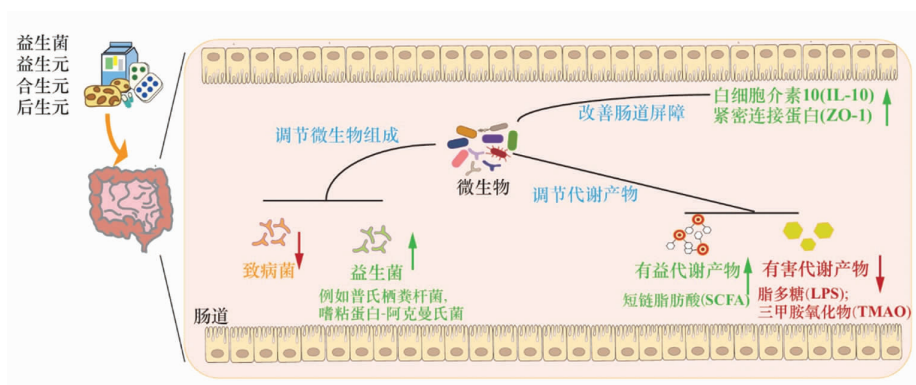


图 2 膳食补充剂对肠道微生物的影响机制

Fig.2 The mechanism of dietary supplements on the gut microbiota

3.1 益生菌

益生菌是一种“活的并且给予宿主足够量时能够促进宿主健康”的微生物,可以降低上呼吸道感染的发病率、持续时间和严重程度^[31]。益生菌可以通过增强肠道屏障完整性、调节免疫系统、改善肠道微生物组成、降低肠道 pH 值、增加 SCFAs 等有益代谢物的产生来改善宿主健康状况^[32-33]。

越来越多的证据支持补充益生菌在改善优秀运动员和普通人群的健康状况和运动成绩方面的作用^[34-35](表 2)。补充植物乳杆菌 PS128 可以改善铁人三项运动员的炎症和氧化应激,推测通过重塑运动员肠道微生物并调节 SCFAs 含量,进而提高耐力跑步性能^[36]。此外,运动员益生菌补充剂研究的样本量通常较小,并且通常为男性运动员^[37],因此存在特定性别的影响。West 等^[38]研究发现,添加发酵乳杆菌的益生菌(PCC®, Probiomix Ltd, Sydney, Australia)能够减少男性胃肠道症状,但增加了女性的发病率和症状持续时间。与之前的研究一致,益生菌具有抗炎特性。补充不同菌株的益生菌可以减少循环中 TNF- α 、IL-6 和干扰素 γ (Interferon- γ , IFN- γ)等促炎细胞因子的产生^[36,39]。钝顶螺旋藻 (*Spirulina platensis*)、凝结芽孢杆菌

个性化饮食结合运动可以改变肠道微生物组成,维持肠道稳定,并对运动表现产生积极影响。目前,对运动员进行个性化营养干预已逐渐发展为新的研究方向。图 2 表示了膳食补充剂干预对肠道微生物及其代谢物的影响机制。

(*B. coagulans*)和植物乳杆菌(*L. plantarum*)等益生菌菌株可以降低肌肉中肌酸激酶和血清乳酸等疲劳指标,从而促进运动后的肌肉恢复^[40]。然而,需要进一步研究益生菌对肌肉性能和疲劳的影响,以更好地了解其在运动人群中的潜在益处。

3.2 益生元

益生元是一种特定的碳水化合物,无法被胃肠道消化,但可以被少数特定微生物发酵。它们具有多种分子结构,能够通过调节肠道微生物组成和结构促进机体健康^[45]。大豆、菊苣根、朝鲜蓟等菊粉化合物、母乳、未加工小麦、未煮熟的燕麦、培根、不易消化的低聚糖和未加工的大麦都是益生元来源。表 3 列出了一些益生元成分与运动员相关的研究。为了避免与运动相关的胃肠道症状,一些运动员采用低发酵低聚糖、双糖、单糖和多元醇等饮食策略,限制高度可发酵碳水化合物的摄入,减少稀便或腹泻等问题^[46]。低聚半乳糖(Galactooligosaccharides, GOS)通过增加双歧杆菌属的数量和活性,减少 CRP 和 IL-1 β 等促炎细胞因子产生,从而提高免疫系统功能^[47]。Hasle 等^[48]研究证实了 GOS 可以减少旅行者腹泻的发生率。

表2 益生菌对运动员训练后身体表现及肌肉恢复的影响研究

Table 2 Impact of probiotics on post-training physical performance and muscle recovery in athletes

研究人群	益生菌	剂量	干预影响	参考文献
业余跑步运动员 (n=54)	植物乳杆菌 TWK10	6周(10 ¹⁰ CFU/d)	↑ 肌肉质量(人体肌肉组织的总质量,衡量健康状况和运动能力) ↑ 运动持久性	[41]
足球、田径男性运动员 (n=51)	乳酸乳球菌 JCM 5805	13 d(10 ¹¹ CFU/d)	↑ 体能 ↑ 免疫力 ↓ 流感和急性呼吸道感染的累计时间 ↓ 关节疼痛	[42]
以色列男性士兵 (n=16)	凝结芽孢杆菌	2周(10 ⁹ CFU/d)	↑ 肌肉耐力(1 min内最大引体向上次数) ↑ 垂直跳跃高度 ↓ 全身性炎症(TNF-α、IFN-γ)	[39]
铁人三项运动员 (n=18)	植物乳杆菌 PS128	3~4周(10 ¹⁰ CFU/d)	↑ 无氧时间 ↑ 最大摄氧量持续时间 ↓ 全身性炎症(TNF-α、IL-6) ↓ 疲劳指标(运动后肌酸激酶指数和肾损伤)	[43]
羽毛球运动员 (n=18)	干酪乳酸菌代 田株	6周(3 × 10 ¹⁰ CFU/d)	↑ 有氧代谢能力	[44]

表3 益生元对运动员体能表现的影响研究

Table 3 Research on prebiotics and athletes

研究人群	益生元制剂	剂量	肠道微生物组成变化和干预结果	参考文献
全能挑战运动员 (n=30)	益生元(含低聚果糖)	55.8 mg/d	↓ 内毒素水平	[49]
日本足球运动员 (n=157)	瓜尔豆胶	6 g/d, 4周	↑ 双歧杆菌属和乳酸杆菌属 ↓ 腹泻症状	[50]
女运动员(n=18)	菊粉和乳果糖强化益生元	25 g/包/d, 12周	↑ 双歧杆菌属比例 ↓ 血清骨折风险预测因子(TRACP-5b)水平	[51]
男足球运动员(n=30)	益生元补充剂(包括半乳糖寡糖、果寡糖、菊粉、聚葡萄糖、草莓粉和麦芽糖醇)	2 g/包/d, 6周	↓ IL-4, IL-10, 和 TGF-β1 水平 ↓ 上呼吸道感染的发生率和严重程度	[52]
橄榄球联盟队员 (n=23)	低聚半乳糖	2.9 g/d, 168 d	↓ 胃肠道症状的发生率和严重程度 ↓ 上呼吸道症状的持续时间 ↑ 唾液免疫球蛋白 IgA	[53]

3.3 补充剂(Supplements)

一些营养补充剂可能通过影响肠道微生物组而提高运动成绩(表4)。除了蛋白质补充剂、鱼油、益生菌和益生元,还有抗氧化剂、硝酸盐、肌酸和咖啡因等补充剂^[54]。

适量运动可以提高抗氧化能力,但过量的活性氧(Reactive oxygen species, ROS)积累会对免

疫力和运动后的肌肉恢复产生负面影响^[55]。多酚是植物衍生的抗氧化成分,通过促进肠道内双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)、乳酸菌(*Lactobacilli*)、嗜粘蛋白-阿克曼氏菌(*Akkermansia muciniphila*)、普氏栖粪杆菌(*Faecalibacterium prausnitzii*)和罗氏菌属(*Roseburia spp*)等有益菌富集及其生物活性代谢物产生,从而减轻运动员的过度氧化应激,

促进受损肌肉的恢复^[56-57]。咖啡因被广泛用于减少运动过程中的疲劳或疼痛^[54]。一项动物研究证实,咖啡因或绿原酸等咖啡成分影响肠道微生物组成

和结构,并增加肠道中丁酸盐和丙酸盐的含量^[58]。综上所述,一些运动员常用的补充剂可能影响肠道微生物组组成及其代谢物,进而调节运动表现。

表4 补充剂对运动员体能及肠道微生物的潜在影响

Table 4 Potential effects of supplements on athletic performance and intestinal microbiome

研究人群	膳食补充剂	干预结果	参考文献
越野跑步者(n=24)	乳清分离物(10 g)和牛肉水解物(10 g),25周	门水平: ↑ 拟杆菌门; ↓ 厚壁菌门 种属水平: ↑ 拟杆菌属; ↓ 柠檬酸杆菌属; ↑ 克雷伯氏菌属; ↓ 长双歧杆菌属	[59]
大学排球俱乐部的女运动员(n=20)	紫苏油,9 g/d,8周	↑ 产丁酸盐菌毛螺菌属 ↑ 肠道功能	[60]
健康男性,每周两次阻力训练(n=36)	抹茶粉,1.5 g/d,8周	↑ 瘤胃球菌属,丁酸梭菌属和颤螺菌属 ↓ 疲劳度 ↑ 显著提高腿部力量	[61]

4 总结与展望

本文综述了肠道菌群对耐力运动能力、耐受性等运动表现的影响。肠道微生物组及其代谢产物可能通过增加乳酸代谢、增加糖原储存能力或影响骨骼肌底物代谢的机制来增强运动能力。调节肠道微生物组可以作为一个提高运动表现的有效途径。尽管如此,肠道微生物在促进运动功能领域的研究仍处于起步阶段。我们需要更严谨的科学研究来理解肠道菌群与运动的关系,确定肠道菌群与运动表现之间是否存在因果关系。未来的研究应采用宏基因组学、宏蛋白质组学和代谢组学等多组学,结合生物信息学技术,更深入地揭示肠道微生物的作用机制及其与运动员健康和运动表现之间的因果关系。此外,由于运动员群体的稀缺性、人群的差异性,运动生理指标及运动表现测定重复性差,限制了肠道菌群和运动的人群研究规模。未来仍需要开展更多人群研究获得肠道微生物对人体运动表现的改善证据。随着未来研究的深入,这些信息将有助于开发新的精准营养策略,以通过调节肠道微生物组并提高运动员的整体表现和健康。

参 考 文 献

[1] NAY K, JOLLET M, GOUSTARD B, et al. Gut bacteria are critical for optimal muscle function: a

potential link with glucose homeostasis[J]. *American Journal of Physiology*, 2019, 317(1): e158-e71.

[2] LAHIRI S, KIM H, GARCIA-PEREZ I, et al. The gut microbiota influences skeletal muscle mass and function in mice[J]. *Science Translational Medicine*, 2019, 11(502): eaan5662.

[3] BATAKAN R B, FENNING A S, DALBO V J, et al. A gut reaction: The combined influence of exercise and diet on gastrointestinal microbiota in rats[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2017, 122(6): 1627-1638.

[4] ZHAO X, ZHANG Z J, HU B, et al. Response of gut microbiota to metabolite changes induced by endurance exercise[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 765.

[5] KEOHANE D M, WOODS T, O'CONNOR P, et al. Four men in a boat: Ultra-endurance exercise alters the gut microbiome [J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2019, 22(9): 1059-1064.

[6] MAILING L J, ALLEN J M, BUFORD T W, et al. Exercise and the gut microbiome: A review of the evidence, potential mechanisms, and implications for human health[J]. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 2019, 47(2): 75-85.

[7] GROSICKI G J, DURK R P, BAGLEY J R. Rapid gut microbiome changes in a world-class ultramarathon runner[J]. *Physiological Reports*, 2019, 7(24): e14313.

[8] EGLAND P G, PALMER R J, KOLENBRANDER

- P E. Interspecies communication in *Streptococcus gordonii*-*Veillonella atypica* biofilms: Signaling in flow conditions requires juxtaposition[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(48): 16917-16922.
- [9] ZHANG S M, HUANG S L. The commensal anaerobe *Veillonella dispar* reprograms its lactate metabolism and short-chain fatty acid production during the stationary phase[J]. Microbiology Spectrum, 2023, 11(2): e0355822.
- [10] MORITA H, KANO C, ISHII C, et al. Bacteroides uniformis and its preferred substrate, α -cyclodextrin, enhance endurance exercise performance in mice and human males[J]. Science Advances, 2023, 9(4): eadd2120.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] CLARKE S F, MURPHY E F, O'SULLIVAN O, et al. Exercise and associated dietary extremes impact on gut microbial diversity[J]. Gut, 2014, 63(12): 1913-1920.
- [14] JANG L G, CHOI G, KIM S W, et al. The combination of sport and sport-specific diet is associated with characteristics of gut microbiota: An observational study[J]. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2019, 16(1): 21.
- [15] LIANG R, ZHANG S, PENG X J, et al. Characteristics of the gut microbiota in professional martial arts athletes: A comparison between different competition levels[J]. PloS One, 2019, 14(12): e0226240.
- [16] 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.
- [17] HAN M Z, YANG K, YANG P S, et al. Stratification of athletes' gut microbiota: the multifaceted hubs associated with dietary factors, physical characteristics and performance[J]. Gut Microbes, 2020, 12(1): 1842991.
- [18] KULECKA M, FRACZEK B, MIKULA M, et al. The composition and richness of the gut microbiota differentiate the top Polish endurance athletes from sedentary controls[J]. Gut Microbes, 2020, 11(5): 1374-1384.
- [19] AN J, LIU Y Q, WANG Y Q, et al. The role of intestinal mucosal barrier in autoimmune disease: A potential target[J]. Frontiers in Immunology, 2022, 13: 871713.
- [20] KAROLKIEWICZ J, NIEMAN D C, CISOŃ T, et al. No effects of a 4-week post-exercise sauna bathing on targeted gut microbiota and intestinal barrier function, and hsCRP in healthy men: A pilot randomized controlled trial[J]. BMC Sports Sci Med Rehabil, 2022, 14(1): 107.
- [21] MCKENNA Z, HOUCK J, DUCHARME J, et al. The effect of prolonged interval and continuous exercise in the heat on circulatory markers of intestinal barrier integrity[J]. European Journal of Applied Physiology, 2022, 122(12): 2651-2659.
- [22] RIVIÈRE A, SELAK M, LANTIN D, et al. *Bifidobacteria* and butyrate-producing colon bacteria: Importance and strategies for their stimulation in the human gut[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 979.
- [23] LEE J H, SAITO Y, PARK S J, et al. Existence and possible roles of independent non-CpG methylation in the mammalian brain[J]. DNA Research, 2020, 27(4): dsaa020.
- [24] ZHAO Y, CHEN F D, WU W, et al. GPR43 mediates microbiota metabolite SCFA regulation of antimicrobial peptide expression in intestinal epithelial cells via activation of mTOR and STAT3[J]. Mucosal Immunology, 2018, 11(3): 752-762.
- [25] LUND J, AAS V, TINGSTAD R H, et al. Utilization of lactic acid in human myotubes and interplay with glucose and fatty acid metabolism[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 9814.
- [26] BERGMAN B C, WOLFEL E E, BUTTERFIELD G E, et al. Active muscle and whole body lactate kinetics after endurance training in men[J]. Journal of Applied Physiology, 1999, 87(5): 1684-1696.
- [27] OTTEN B M J, STHIJNS M, TROOST F J. A

- Combination of acetate, propionate, and butyrate increases glucose uptake in C2C12 myotubes[J]. *Nutrients*, 2023, 15(4): 946.
- [28] FRAMPTON J, MURPHY K G, FROST G, et al. Short-chain fatty acids as potential regulators of skeletal muscle metabolism and function[J]. *Nature Metabolism*, 2020, 2(9): 840–848.
- [29] KASUBUCHI M, HASEGAWA S, HIRAMATSU T, et al. Dietary gut microbial metabolites, short-chain fatty acids, and host metabolic regulation[J]. *Nutrients*, 2015, 7(4): 2839–2849.
- [30] DEN BESTEN G, VAN EUNEN K, GROEN A K, et al. The role of short-chain fatty acids in the interplay between diet, gut microbiota, and host energy metabolism [J]. *Journal of Lipid Research*, 2013, 54(9): 2325–2340.
- [31] TILLER N B, ROBERTS J D, BEASLEY L, et al. International society of sports nutrition position stand: Nutritional considerations for single-stage ultra-marathon training and racing[J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2019, 16(1): 1–23.
- [32] CALERO C Q, RINCÓN E O, MARQUETA P M. Probiotics, prebiotics and synbiotics: Useful for athletes and active individuals? A systematic review[J]. *Beneficial Microbes*, 2020, 11(2): 135–149.
- [33] TICINESI A, LAURETANI F, MILANI C, et al. Aging gut microbiota at the cross-road between nutrition, physical frailty, and sarcopenia: Is there a gut-muscle axis?[J]. *Nutrients*, 2017, 9(12): 1303.
- [34] MAZUR-KURACH P, FRACZEK B, KLIMEK A T. Does Multi-strain probiotic supplementation impact the effort capacity of competitive road cyclists? [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(19): 12205.
- [35] MOHR A E, PUGH J, O'SULLIVAN O, et al. Best practices for probiotic research in athletic and physically active populations: Guidance for future randomized controlled trials[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 809983.
- [36] HUANG W C, PAN C H, WEI C C, et al. *Lactobacillus plantarum* PS128 improves physiological adaptation and performance in triathletes through gut microbiota modulation[J]. *Nutrients*, 2020, 12(8): 2315.
- [37] WOSINSKA L, COTTER P D, O'SULLIVAN O, et al. The potential impact of probiotics on the gut microbiome of athletes[J]. *Nutrients*, 2019, 11(10): 2270.
- [38] WEST N P, PYNE D B, CRIPPS A W, et al. *Lactobacillus fermentum* (PCC®) supplementation and gastrointestinal and respiratory tract illness symptoms: a randomised control trial in athletes[J]. *Nutrition Journal*, 2011, 10: 1–11.
- [39] HOFFMAN J R, HOFFMAN M W, ZELICHA H, et al. The effect of 2 weeks of inactivated probiotic *Bacillus coagulans* on endocrine, inflammatory, and performance responses during self-defense training in soldiers[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2019, 33(9): 2330–2337.
- [40] JÄGER 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.
- [41] 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.
- [42] 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-blinded trial[J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2018, 15(1): 39.
- [43] 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.
- [44] SALLEH R M, KUAN G, AZIZ M N A, et al. Effects of probiotics on anxiety, stress, mood and fitness of badminton players[J]. *Nutrients*, 2021, 13(6): 1783.
- [45] 石梦玄, 张璐, 田美玲, 等. 基于体外模拟肠道微生物体系比较不同果蔬全粉的益生元功效[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(2): 87–94.
- SHI M X, ZHANG L, TIAN M L, et al. The comparison of prebiotic roles of different vegetable and fruit poeders using *in vitro* simulation intestinal microecology system[J]. *Journal of Chinese Institute*

- of Food Science and Technology, 2020, 20(2): 87–94.
- [46] LIS D M, KINGS D, LARSON-MEYER D E. Dietary practices adopted by track-and-field athletes: Gluten-free, low FODMAP, vegetarian, and fasting [J]. International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism, 2019, 29(2): 236–245.
- [47] WILLIAMS N C, JOHNSON M A, SHAW D E, et al. A prebiotic galactooligosaccharide mixture reduces severity of hyperpnoea-induced bronchoconstriction and markers of airway inflammation[J]. British Journal of Nutrition, 2016, 116(5): 798–804.
- [48] HASLE G, RAASTAD R, BJUNE G, et al. Can a galacto-oligosaccharide reduce the risk of traveller's diarrhoea? A placebo-controlled, randomized, double-blind study[J]. Journal of Travel Medicine, 2017, 24(5): tax057.
- [49] 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.
- [50] KAPOOR M P, KOIDO M, KAWAGUCHI M, et al. Lifestyle related changes with partially hydrolyzed guar gum dietary fiber in healthy athlete individuals—A randomized, double-blind, crossover, placebo-controlled gut microbiome clinical study[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 72: 104067.
- [51] ISHIZU T, TAKAI E, TORII S, et al. Prebiotic food intake may improve bone resorption in Japanese female athletes: A pilot study[J]. Sports (Basel), 2021, 9(6): 82.
- [52] ZHANG L F, XIAO H, ZHAO L, et al. Comparison of the effects of prebiotics and synbiotics supplementation on the immune function of male university football players[J]. Nutrients, 2023, 15(5): 1158.
- [53] PARKER C, HUNTER K A, JOHNSON M A, et al. Effects of 24-week prebiotic intervention on self-reported upper respiratory symptoms, gastrointestinal symptoms, and markers of immunity in elite rugby union players[J]. European Journal of Sport Science, 2023, 23(11): 2232–2239.
- [54] CLOSE G L, HAMILTON D L, PHILIP A, et al. New strategies in sport nutrition to increase exercise performance[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2016, 98: 144–158.
- [55] DONATI ZEPPA S, AGOSTINI D, GERVASI M, et al. Mutual interactions among exercise, sport supplements and microbiota[J]. Nutrients, 2019, 12(1): 17.
- [56] ESPÍN J C, GONZÁLEZ-SARRÍAS A, TOMÁS-BARBERÁN F A. The gut microbiota: A key factor in the therapeutic effects of (poly) phenols[J]. Biochemical Pharmacology, 2017, 139: 82–93.
- [57] D'ANGELO S. Polyphenols: Potential beneficial effects of these phytochemicals in athletes[J]. Current Sports Medicine Reports, 2020, 19(7): 260–265.
- [58] NISHITSUJI K, WATANABE S, XIAO J, et al. Effect of coffee or coffee components on gut microbiome and short-chain fatty acids in a mouse model of metabolic syndrome[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1–10.
- [59] WANG C C, FANG C C, LEE Y H, et al. Effects of 4-week creatine supplementation combined with complex training on muscle damage and sport performance[J]. Nutrients, 2018, 10(11): 1640.
- [60] KAWAMURA A, NEMOTO K, SUGITA M. Effect of 8-week intake of the n-3 fatty acid-rich perilla oil on the gut function and as a fuel source for female athletes: A randomised trial[J]. British Journal of Nutrition, 2022, 129(6): 1–11.
- [61] SHIGETA M, AOI W, MORITA C, et al. Matcha green tea beverage moderates fatigue and supports resistance training-induced adaptation[J]. Journal of Nutrition, 2023, 22(1): 32.

Research Progress on the Gut Microbiota in Athletes and Its Nutrition Modulation

Gao Jianwei¹, Zhang Lujia¹, Ma Xiangning¹, Jia Lingyu^{2*}, Chen Fang^{1*}

¹College of Food Science and Nutritional Engineering, National Engineering Research Centre for Fruits and Vegetables Processing, China Agricultural University, Beijing 100193

²Sports Department, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract The primary objective of daily management in athletes is to optimize performance during competition and to enhance recovery efficiency during training. Accumulating studies indicate that athletes' gut microbiota composition is closely correlated with their performance. In this article, we summarize the distinct characteristics of athletes' gut microbiota, as well as the mechanisms on enhancing athletic performance modulated by gut microbiota, focusing on promoting lactate metabolism and key roles in regulating glycogen storage and gut barrier function associated with gut microbiota metabolites, such as short-chain fatty acids. Moreover, the progress on nutrition interventions to improve athletic performance through modulating gut microbiota, including probiotics, prebiotics, and dietary supplements for muscle synthesis, has been reviewed. Finally, we provide an outlook on future research and application aiming to enhance endurance and athletic performance through nutrition modulating the gut microbiota.

Keywords athlete; gut microbiota; athletic performance; probiotics; prebiotics