



咖啡因对耐力运动员运动表现的影响:效果及机制

秦启阳¹, 陈 斌², 郭 黎³, 曹银行^{1*}

摘要: 咖啡因作为一种功能增进营养补剂, 广泛应用于耐力运动员的训练和竞赛中。通过系统梳理探讨摄入咖啡因对耐力运动员计时赛、恒定负荷运动和递增负荷运动至力竭 3 种类型运动表现影响的相关研究, 总结咖啡因对耐力运动员运动表现的影响规律, 以期为我国教练员和运动员优化营养补剂方案提供理论依据。结果显示, 自行车、中长跑及赛艇等耐力运动员多以胶囊形式摄入低中高剂量咖啡因(3~9 mg/kg)来提高耐力运动表现, 但对于不同类型运动表现的有效剂量及作用机制存在差异。另外, 咖啡因与其他营养补剂混合摄入的效果以及咖啡因不同摄入方式、性别差异、基因组别、安慰剂效应等对其功能增进效果的影响是咖啡因研究领域未来的发展方向。

关键词: 咖啡因; 营养补剂; 耐力性项目; 计时赛; 恒定负荷; 递增负荷

中图分类号: G804 文献标志码: A 文章编号: 1006-1207(2024)01-0093-11

DOI: 10.12064/ssr.2023070601

Effects of Caffeine Ingestion on Endurance Athletic Performance: Effects and Mechanisms

QIN Qiyang¹, CHEN Bin², GUO Li³, CAO Yinhang^{1*}

(1. School of Athletic Performance, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2. Department of Public Physical Education, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. School of Exercise and Health, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: Caffeine is widely used as an ergogenic aid for endurance athletes during training and competition. To systematically review the effects of caffeine intake on athletic performance in time trial (TT), time to exhaustion during constant load (TTE) and graded increasing exercise test performed to exhaustion (GIT), and to summarize the effects of caffeine on endurance performance, the study attempts to provide a theoretical basis for the optimization of nutritional supplement programs for coaches and athletes in China. The results show that most of endurance athletes such as cycling, long distance running, and rowing take capsules containing different doses of caffeine (3~9 mg/kg) to improve their endurance performance. However, there were differences in the effective dose and mechanism of caffeine in improving the performance. Moreover, future research is expected to be focused on the effect of caffeine mixed with other nutritional supplements and the influences of different caffeine intake doses, gender differences, genomic groups, and placebo effects on the function-enhancing effects of caffeine.

Keywords: caffeine; ergogenic aid; time trial; endurance athletes; time to exhaustion; graded incremental exercise

咖啡因(1,3,7-三甲基黄嘌呤)是一种中枢神经系统兴奋性物质,通过阻断中枢和外周腺苷受体发挥作用^[1]。截至目前,将咖啡因应用于体育领域以探讨其功能增进效果的研究已有一个多世纪的历史^[2]。大量研究证实,咖啡因可增加运动单位的募集程度^[3];加速运动初始阶段脂肪的代谢率,有效节省糖原^[4];促进肌浆网中 Ca^{2+} 的释放与回收,保持肌细胞的兴奋性^[5];这些机制可能与咖啡因提高运动表现有关。

但是,目前虽然有大量研究显示摄入咖啡因提高了耐力运动员的运动表现^[6-8],但也有部分研究报道摄入咖啡因对其没有影响^[9-10],结果不一致的原因可能与咖啡因的摄入剂量、运动员等级水平和运动方案的不同有关。评价耐力性运动表现的常用测试方案有计时赛(Time Trial, TT)、恒定负荷运动至力竭(Time to Exhaustion, TTE)和递增负荷运动至力竭(Graded Incremental Exercise Test Performed to Ex-

收稿日期: 2023-07-06

基金项目: 上海体育大学校级科研项目(2022XJ020);上海市人类运动能力开发与保障重点实验室(上海体育大学)资助项目(11DZ2261100)。

第一作者简介: 秦启阳,男,硕士研究生。主要研究方向:运动训练和运动生理学。E-mail:490318751@qq.com。

*通信作者简介: 曹银行,男,博士,副教授。主要研究方向:高原环境下的生理机能反应。E-mail:caoyinhang@sus.edu.cn。

作者单位: 1.上海体育大学 竞技运动学院,上海 200438;2.福建农林大学 公共体育教育部,福建 福州 350002;

3.上海体育大学 运动健康学院,上海 200438。



haustion, GIT)。目前还未有针对耐力运动员探讨咖啡因对其运动表现影响效果的相关综述。因此,本文对试验性研究进行系统综述,总结摄入咖啡因对耐力运动员的 TT、TTE 和 GIT 运动表现的影响规律,探讨可能的作用机制,旨在为使用咖啡因提高运动表现的耐力运动员和教练员提供参考建议,同时也为今后的相关研究提供理论借鉴。

1 研究方法

1.1 文献来源与检索

在 PubMed、Google Scholar、Web of Science、EBSCO、中国知网和万方数据检索有关优秀耐力项目运动员摄入咖啡因的相关文献。检索时间范围为数据库建立至 2023 年 7 月。英文检索词包含:Caffeine、1,3,7-Trimethylxanthine、caffeinated gum、coffee、capsule、sports nutrition、ergogenic aids、runner、swimmer、triathlete、cyclist、rower、canoeists、exercise performance、sports performance、athletic performance、time trial、endurance performance、time to exhaustion、graded incremental exercise test 等。中文检索词包含:咖啡因、1,3,7-三甲基黄嘌呤、咖啡、口香糖、胶囊、营养补剂、耐力运动员、自行车、中长跑、马拉松、游泳、赛艇、铁人三项、运动表现、计时赛、恒定负荷力竭时间、递增负荷、最大输出功率等。

1.2 文献筛选

纳入标准:①研究对象为 18 岁以上的耐力运动员;②干预方式为服用无水咖啡因胶囊或咖啡或咀

嚼含咖啡因的口香糖;③实验条件为常温常氧的正常环境。

排除标准:①研究对象为有疾病或残疾的运动员;②咖啡因与其他物质混合摄入(如碳水化合物、功能饮料等);③学位论文、实验数据不全或者未发表的文献。

检索文献 1 382 篇,追踪参考文献获得相关文献 40 篇。利用 EndnoteX9 文献管理软件进行查重,剔除重复文献 700 篇;通过阅读标题和摘要的方式剔除 640 篇;阅读全文剔除 43 篇,最终纳入 39 篇文献。

1.3 数据提取

对最终纳入的文献逐一进行数据提取,包含:作者、发表时间、研究对象和样本量、咖啡因摄入量、咖啡因摄入形式、运动方案、运动表现、主要结果,利用 Excel 制作数据表。

2 咖啡因对耐力性运动表现的影响效果及相关机制

2.1 计时赛

表 1 总结归纳了以自行车(19 篇)、中长跑(4 篇)、赛艇(4 篇)、铁人三项(1 篇)和越野滑雪(1 篇)运动员为研究对象,探讨摄入低到高剂量(1~9 mg/kg)咖啡因对 TT 运动表现影响效果的 29 篇相关文献。TT 运动表现的评价指标为最快完成设定距离或总功率的时间或在设定时间内完成最长运动距离或最大平均输出功率(Mean Power Output, MPO)。从总结归纳的文献可知摄入 2~9 mg/kg 咖啡因可以提高 TT 的运动表现。

表 1 咖啡因对计时赛运动表现的影响(n=29)

Table1 Effect of caffeine intake on time trial performance (n=29)

作者(发表年份)	被试	摄入剂量	摄入形式	运动方案	运动表现	主要结果
Wiles 等 ^[11] (2006)	8 名男性自行车运动员	6 mg/kg	胶囊	1 km 骑行 TT	↓ TT(71.1 s vs. 73.4 s) ↑ 峰值输出功率(940 W vs. 864 W) ↑ MPO(523 W vs. 505 W)	N.A.
Beedie 等 ^[12] (2006)	6 名男性自行车运动员	4.5 mg/kg 和 9 mg/kg	胶囊	10 km 骑行 TT	↑ MPO(4.5 mg/kg vs. 6 mg/kg vs. placebo; 280.6 W vs. 285.9 W vs. 274.3 W)	→HR、BLA、VO ₂
Jenkins 等 ^[13] (2008)	13 名男性自行车运动员	1 mg/kg、2 mg/kg 和 3 mg/kg	胶囊	80%VO _{2peak} 骑行 15 min + 休息 4 min + 15 min 的骑行 TT	↑ 输出功率(2 mg/kg vs. placebo; 3.08 kJ/kg vs. 2.96 kJ/kg) →输出功率(1 mg/kg vs. 3 mg/kg vs. placebo; 2.94 kJ/kg vs. 3.04 kJ/kg vs. 2.96 kJ/kg)	→HR、RPE、BLA (1 mg/kg 和 2 mg/kg)、BLA (3 mg/kg); →RER、V _E (1 mg/kg)、VO _{2peak} (1 mg/kg 和 3 mg/kg); ↑ V _E (2 mg/kg 和 3 mg/kg)、VO _{2peak} (2 mg/kg)



续表 1

作者(发表年份)	被试	摄入剂量	摄入形式	运动方案	运动表现	主要结果
Kilding 等 ^[14] (2012)	10 名男子自行车运动员	3 mg/kg	胶囊	3 km 骑行 TT	↓ 运动时间 (3.78 min vs. 3.81 min) ↑ MPO(381 W vs. 373 W)	→HR、BLA、血浆 HCO ₃ ⁻ 浓度
Desbrow 等 ^[15] (2012)	16 名男性自行车运动员	3 mg/kg 和 6 mg/kg	胶囊	完成预先设定 (0.75×PPO×3 600) 功率的自行车 TT	↓ TT (3 mg/kg vs. 6 mg/kg vs. placebo, 3 738 s vs. 3 791 s vs. 3 902 s)	↑ HR、GLU(6 mg/kg); →RPE
Astorino 等 ^[16] (2012)	8 名男性耐力项目运动员	5 mg/kg	胶囊	10 km 骑行 TT	↓ TT(17.07 min vs. 17.35 min)	→HR、RPE
Acker 等 ^[17] (2012)	10 名男性自行车运动员	6 mg/kg	胶囊	60% VO _{2max} 恒定负荷骑行 20 min 后, 进行 20 km 骑行 TT	→TT(43.6 min vs. 44.2 min) →MPO(247 W vs. 238 W)	→HR、RPE、GLU; ↑ RER、BLA
Skinner 等 ^[18] (2013)	14 名男子自行车和铁人三项运动员	6 mg/kg	胶囊	a: 摄入咖啡因 1 h 后开始 40 km 骑行 TT b: 血浆咖啡因浓度达到峰值时开始 40 km 骑行 TT	a: ↓ TT(57.93 min vs. 59.10 min), b: →TT(58.47 min vs. 59.08 min)	→HR、RPE; ↑ BLA、GLU (a)、EPI (a)、NEPI(a)
Hodgson 等 ^[19] (2013)	8 名男性自行车运动员	5 mg/kg	胶囊	55% VO _{2max} 恒定负荷骑行 30 min 后, 进行预先设定 (0.7×W _{max} ×2 700) 功率的骑行 TT	↑ MPO(294 W vs. 277 W)	→HR、糖氧化率; ↑ GLU
Santos Rde 等 ^[6] (2013)	8 名男性自行车运动员	5 mg/kg	胶囊	4 km 骑行 TT	↓ TT(6.82 min vs. 6.98 min) ↑ MPO(232 W vs. 219 W)	→HR、RPE、BLA、VO ₂
Miller 等 ^[20] (2014)	6 名男性自行车和铁人三项运动员	2×3 mg/kg(运动前及运动 40 min 后分别摄入 3 mg/kg)	胶囊	65% VO _{2max} 恒定负荷骑行 80 min 后, 进行预先设定总输出功率 (5 kJ/kg) 的骑行 TT	↓ TT(19.7 min vs. 20.5 min)	→HR、RPE、排汗率
Lane 等 ^[21] (2014)	12 名男性和 12 名女性自行车运动员	含 3 mg/kg 咖啡因口香糖	口香糖	男性: 完成 48.83 km 骑行 TT 女性: 完成 29.35 km 骑行 TT	男性: ↓ TT (62.73 min vs. 63.50 min) ↑ MPO (313 W vs. 303 W) 女性: ↓ TT (50.85 min vs. 51.67 min) ↑ MPO(216 W vs. 207 W)	→HR、RPE
Bortolotti 等 ^[10] (2014)	13 名男性自行车运动员	6 mg/kg	胶囊	20 km 骑行 TT	→TT(36.35 min vs. 36.52 min)	→HR、RPE、EMG
Paton 等 ^[22] (2015)	20 名(10 男+10 女)自行车运动员	含 200 mg (女性) 和 300 mg (男性) 咖啡因的口香糖	口香糖	30 km 骑行 TT(每 10 km 的最后 0.2 km 冲刺, 第 1 次冲刺后咀嚼口香糖)	10 km: →MPO (259 W vs. 258 W)、冲刺输出功率(425 W vs. 419 W) 20 km: →MPO(241 W vs. 240 W)、冲刺输出功率(411 W vs. 415 W) 30 km: ↑ MPO(3.8%)、冲刺输出功率(4.0%)	↑ HR; →RPE; ↑ BLA; →VO ₂ 、RER
Oberlin 等 ^[23] (2016)	11 名男性自行车运动员	4×50 mg(0 km、5 km、10 km 和 15 km 时摄入)	胶囊	80% VT ₂ 运动 90 min 后, 进行 20 km 的骑行 TT	→TT(1 940 s vs. 1 947 s)	→HR
Saunders 等 ^[24] (2017)	42 名男性自行车运动员	6 mg/kg	胶囊	完成预先设定 (0.85×W _{max} ×1 500) 功率的自行车 TT	↑ MPO(234.2 W vs. 228.0 W)	N.A.
Larson 等 ^[25] (2018)	9 名男性自行车运动员	5 mg/kg	胶囊	20 km 骑行 TT	↓ TT(33.22 min vs. 34.57 min) ↑ MPO(261 W vs. 250 W)	→HR、RPE; ↑ V _E 、V _{O2} 、BLA
Guest 等 ^[26] (2018)	101 名男性自行车运动员 (49 名 AA, 44 名 AC, 8 名 CC 基因者)	2 mg/kg 和 4 mg/kg	胶囊	10 km 骑行 TT	↓ TT (2 mg/kg vs. 4 mg/kg vs. placebo, AA: 17.0 mg/kg vs. 16.6 mg/kg vs. 17.8 min; AC: 18.6 min vs. 18.4 min vs. 18.0 min; CC: 20.8 min vs. 18.3 min)	AA: →HR、RPE(2mg/kg), ↓ RPE(4 mg/kg); AC: ↑ HR(4 mg/kg), →RPE; CC: ↓ HR(4 mg/kg) →RPE



续表 1

作者(发表年份)	被试	摄入剂量	摄入形式	运动方案	运动表现	主要结果
Santos 等 ^[7] (2020)	a:8 名高水平 男性自行车运 动员 b:8 名低水平 男性自行车运 动员	5 mg/kg	胶囊	4 km 骑行 TT	a:↓ TT(6.09 min vs. 6.18 min); ↑ MPO(329.9 W vs. 316.4 W); ↑ 无氧输出功率 (108.5 W vs. 97.9 W); ↑ 总功(120.1 kJ vs. 117.0 kJ) b:↓ 运动时间(6.70 min vs. 6.88 min) ↑ MPO(247.3 W vs. 232.2 W) ↑ 无氧输出功率(91.5 W vs. 75.1 W) ↑ 总功(99.2 kJ vs. 95.6 kJ)	a:↑ HR; →RPE; ↑ VO ₂ b:↑ HR; →RPE; ↑ VO ₂
Bridge 等 ^[27] (2006)	8 名男性长跑 运动员	3 mg/kg	胶囊	8 km 跑步 TT	↓ TT(31.68 min vs. 32.63 min)	↑ HR; →RPE、BLA
O'Rourke 等 ^[28] (2008)	15 名男性跑 步运动员	5 mg/kg	胶囊	5 km 跑步 TT	↓ TT(17.45 min vs. 17.63 min)	N.A.
Clarke 等 ^[29] (2018)	13 名男性长 跑运动员	9 mg/kg	胶囊	1 英里 (1 609 m) 跑步 TT	↓ TT(4.35 min vs. 4.41 min)	→HR、BLA、GLU; ↑ 唾液咖啡因浓度
Ramos-Campo 等 ^[30] (2019)	15 名男性中 长跑运动员	6 mg/kg	胶囊	800 m 跑步 TT	→TT(122.3 s vs. 122.6 s)	→HR、RPE、BLA
Anderson 等 ^[31] (2000)	8 名女性赛艇 运动员	6 mg/kg 和 9 mg/kg	胶囊	2 km 赛艇 TT	↓ TT(9 mg/kg; -1.3%) →TT(6 mg/kg)	→HR、RPE、BLA、 VO ₂ 、VCO ₂ 、RER; ↑ FFA、V _E (9 mg/kg)
Skinner 等 ^[32] (2010)	10 名男性赛 艇运动员	2 mg/kg、 4 mg/kg 和 6 mg/kg	胶囊	2 km 赛艇 TT	→TT (2 mg/kg vs. 4 mg/kg vs. 6 mg/kg vs. placebo; 6.7 min vs. 6.68 min vs. 6.71 min vs. 6.73 min)	↑ HR(4 mg/kg 和 6 mg/kg); ↑ BLA(6 mg/kg); ↑ GLU(4 mg/kg 和 6 mg/kg); →PI
Carr 等 ^[33] (2011)	6 名男性+2 名女性赛艇运 动员	6 mg/kg	胶囊	2 km 赛艇 TT	↓ TT(6.41 min vs. 6.44 min) ↑ MPO (354 W vs. 344 W)	↓ HR; →RPE; ↑ BLA
Christensen 等 ^[34] (2014)	12 名(11 男+ 1 女)赛艇运 动员	3 mg/kg	胶囊	6 min 赛艇 TT	↑ MPO(400 W vs. 393 W) ↑ 距离(1 878 m vs. 1 865 m)	→RPE
Potgieter 等 ^[35] (2018)	26 名(14 男+ 12 女)铁人三 项运动员	6 mg/kg	胶囊	铁人三项比赛 (1.5 km 游泳+40 km 骑 行+10 km 跑步)	↓ TT 游泳:(33.5 min vs. 34.8 min), TT 骑行:(70.6 min vs. 71.4 min), TT 跑步: (45.6 min vs. 45.9 min)	→RPE; ↑ BLA、PCC、NEUT%、 LYM%
Stadheim 等 ^[3] (2013)	10 名男性越 野滑雪运动员	6 mg/kg	胶囊	8 km 越野滑雪 TT	↓ TT(33.01 min vs. 34.26 min)	→HR、FFA; ↓ RPE; ↑ BLA、GLU、EPI

注:→表示无显著差异;↑表示显著提高;↓表示显著下降;AA表示携带A等位基因的运动员;AC表示携带AC等位基因的运动员;BLA为血乳酸;CC表示携带C等位基因的运动员;EMG为表面肌电;EPI为肾上腺素;FFA为游离脂肪酸;GLU为血糖;HR为心率;LYM%表示淋巴细胞计数;NEPI为去甲肾上腺素;NEUT%表示中性粒细胞计数;PPO为峰值输出功率;PCC为血浆皮质醇;placebo为安慰剂;RER为呼吸交换率;RPE为主观疲劳感觉;VCO₂为二氧化碳呼出量;V_E为每分通气量;VO₂为摄氧量;VO_{2max}为最大摄氧量;VO_{2peak}为峰值摄氧量;W_{max}为最大功率;TT为计时赛。

前期较多研究认为摄入咖啡因可提高骑行 TT 的运动表现。Santos Rde 等^[6]发现,摄入 5 mg/kg 咖啡因可以显著缩短 TT_{4km} (4 km TT 的时间,2.3%)和

MPO_{4km} (4 km TT 的平均输出功率,5.9%),并认为咖啡因可能是通过增加糖酵解参与供能比例而增加中后程的无氧输出功率,进而提高运动表现。Santos 等^[7]



研究证实摄入 5 mg/kg 咖啡因通过相同的机制显著缩短了 TT_{4km} (1.5%)。另外, Jenkins 等^[13]探讨了摄入 3 种不同剂量咖啡因 (1 mg/kg、2 mg/kg、3 mg/kg) 对自行车运动员以 80% VO_{2peak} 强度骑行 15 min 后休息 4 min, 接着进行 15 min 的 TT; 结果表明, 摄入 2 mg/kg 和 3 mg/kg 咖啡因皆可提高 MPO_{15min} (15 min TT 的平均输出功率, 3.9% 和 2.9%), 而 1 mg/kg 咖啡因对 MPO_{15min} 无显著影响。提示, 提高 TT 运动表现的咖啡因有效剂量可能 ≥ 2 mg/kg。但 Bortolotti 等^[10]研究发现摄入 6 mg/kg 咖啡因对 TT_{20km} (20 km TT 的时间) 无影响。推测造成差异的原因可能有两点: ① 该研究没有筛选受试者是否为咖啡因长期使用者, 长期摄入咖啡因会削减咖啡因的功能增进效果^[36], 因此对试验结果可能造成影响; ② 该研究的受试者并非高水平运动员。有研究报道咖啡因对延缓高水平运动员的疲劳效果更明显, 因其体内腺苷受体 (咖啡因作用的靶点) 数量更多^[37]。另外, Paton 等^[22]让自行车运动员在进行 30 km 的 TT 中咀嚼含 3~4 mg/kg 咖啡因口香糖 (每 10 km 的最后 0.2 km 冲刺, 第 1 次冲刺后咀嚼口香糖), 发现 MPO_{0-10km} (0~10 km 的平均输出功率) 与 $MPO_{10-20km}$ (10~20 km 的平均输出功率) 和最后 0.2 km 冲刺输出功率无显著差异, 但 $MPO_{20-30km}$ (20~30 km 的平均输出功率, 3.8%) 和最后 0.2 km 冲刺输出功率 (4.0%) 都显著提高, 据此 Paton 推测咀嚼含咖啡因口香糖可能在 18 min 左右产生功能增进效果。综上所述, 摄入咖啡因可以提高骑行 TT 的运动表现, 但存在剂量效应, 建议摄入咖啡因的剂量为 2~6 mg/kg。另外, 咀嚼含咖啡因的口香糖对提升骑行 TT 的运动表现亦有潜在效果。

多数研究认为摄入咖啡因可提高长跑运动员跑步 TT 的运动表现。O'Rourke 等^[28]研究显示, 摄入 5 mg/kg 咖啡因显著缩短 TT_{5km} (5 km TT 的时间, 1%), 推测运动表现的提高是咖啡因对中枢神经系统 (Central Nervous System, CNS) 和骨骼肌收缩能力的综合影响所致。Bridge 等^[27]摄入 3 mg/kg 和 Clarke 等^[29]摄入 9 mg/kg 的研究也报道了类似结果。咖啡因可阻断游离腺苷, 与脑内腺苷受体结合, 增加神经元放电频率, 并通过皮质脊髓束和脊髓传递到肌肉, 进而增加肌纤维募集程度, 提高肌肉的收缩能力^[38]。另外, 咖啡因可直接作用于肌肉, 如减少肌细胞内的 K^+ 流失程度, 并增强细胞膜对 K^+ 的再吸收能力^[39-40]; 咖啡因还可作用于肌浆网中的兰尼碱受体, 促进 Ca^{2+} 的释放与回收^[5, 41-42], 使肌细胞保持持续兴奋, 进而维持肌肉收缩能力。但仅有 1 项研究发

现, 摄入 6 mg/kg 咖啡因对 TT_{800m} (800 m TT 的时间) 无明显影响^[30]。这可能与该研究专门选取有长期摄入咖啡因习惯的受试者有关。综上, 摄入 3~9 mg/kg 咖啡因可提高无摄入咖啡因习惯的长跑运动员跑步 TT 的运动表现。

多数研究认为摄入咖啡因也可提高赛艇 TT 运动表现。Christensen 等^[34]研究发现, 摄入 3 mg/kg 咖啡因后 MPO_{6min} (6 min TT 的平均输出功率, 1.78%) 显著提高。Carr 等^[33]研究显示摄入 6 mg/kg 咖啡因显著缩短了 TT_{2km} (2 km TT 的时间, 0.46%), 并提高了 MPO_{2km} (2 km TT 的平均输出功率, 2.9%)。该作者同样认为咖啡因通过影响 CNS, 间接降低主观疲劳感觉 (Rating of Perceived Exertion, RPE) 从而提高运动表现。但 Skinner 等^[32]研究发现, 摄入 2 mg/kg、4 mg/kg 和 6 mg/kg 咖啡因对 TT_{2km} 皆无显著影响。从该试验结果可知, 摄入 6 mg/kg 咖啡因的峰值血浆咖啡因浓度 (28 $\mu\text{mol/L}$) 低于同等剂量参考值 (30~35 $\mu\text{mol/L}$)。推测与运动员用餐后立即摄入咖啡因, 从而阻碍了咖啡因的吸收有关。综上, 摄入中高剂量咖啡因可显著提高赛艇 TT 的运动表现, 但需注意的是, 用餐后立即摄入咖啡因可能会削弱其效果。

另外 3 项研究认为摄入咖啡因也可提高铁人三项、游泳和越野滑雪 TT 的运动表现。如 Potgieter 等^[31]研究显示, 摄入 6 mg/kg 咖啡因可以显著缩短奥运会铁人三项的时间 (1.6%)。同样, Stadheim 等^[3]研究显示, 摄入 6 mg/kg 咖啡因显著缩短越野滑雪 TT_{8km} (8 km TT 时间, 3.6%), 该作者认为运动表现的提高主要是由于咖啡因增加了肌肉中运动单位的募集程度, 从而提高了肌肉收缩能力。

综上所述, 以自行车和中长跑为代表的耐力性项目运动员可通过摄入中高剂量 (5~9 mg/kg) 咖啡因来提高更贴近竞赛实战的 TT 运动表现, 但需避免进食后立即摄入咖啡因。另外, 咀嚼含咖啡因的口香糖在提高 TT 运动表现方面亦存在潜在效果, 有无摄入咖啡因习惯可能是影响咖啡因功能增进效果的因素之一, 但今后仍需更多研究来验证上述假设。

2.2 恒定负荷力竭运动

表 2 总结归纳了以中长跑 (4 篇) 和自行车 (3 篇) 运动员为研究对象, 探讨摄入低到高剂量 (3~15 mg/kg) 咖啡因对 TTE 影响效果的 7 篇相关文献。从总结归纳的文献可知 TTE 的改善效果受咖啡因剂量和运动方案因素的影响。



表 2 咖啡因对恒定负荷力竭运动表现的影响 (n=7)

Table2 Effect of caffeine intake on time to exhaustion (n=7)

作者(发表年份)	被试	摄入剂量	摄入形式	运动方案	运动表现	主要结果
McNaughton 等 ^[43] (1986)	12 名男性长跑运动员	10 mg/kg 和 15 mg/kg	胶囊	70%~75%VO _{2max} 强度跑步至力竭	↑ TTE (15 mg/kg; 50.52 min vs. 48.21 min) →TTE (10 mg/kg; 48.49 min vs. 48.21 min)	↑ FFA、TG; ↓ RPE →BLA
Sasaki 等 ^[44] (1987)	5 名男性长跑运动员	384 mg	胶囊	80%VO _{2max} 强度跑步至力竭	↑ TTE (53.02 min vs. 39.45 min)	↑ FFA、脂肪代谢率、BLA (45 min)、GLU; →RER、VO ₂
Graham 等 ^[45] (1991)	7 名 (6 男 +1 女) 跑步运动员	9 mg/kg	胶囊	2 组 85%VO _{2max} 强度分别跑步或骑行至力竭	↑ TTE (跑步: 71.0 min vs. 49.2 min; 骑行: 59.3 min vs. 39.2 min)	→FFA; ↑ RER、血浆甘油浓度、BLA、EPI; →NEPI
Graham 等 ^[46] (1995)	8 名男性中长跑运动员	39 mg/kg、69 mg/kg 和 9 mg/kg	胶囊	85%VO _{2max} 强度跑步至力竭	↑ TTE (3 mg/kg vs. 6 mg/kg vs. placebo; 60 min vs. 60 min vs. 49.4 min) →TTE (9 mg/kg vs. placebo: 55.6 min vs. 49.4 min)	↑ FFA (9 mg/kg); →RER; ↑ 血浆甘油浓度 (9 mg/kg)、BLA、GLU; →VO ₂ ; ↑ EPI (6 mg/kg 和 9 mg/kg); ↑ NEPI (resting)、黄嘌呤 (3 mg/kg 和 6 mg/kg); →黄嘌呤 (9 mg/kg)
Costill 等 ^[47] (1978)	9 名 (7 男 +2 女) 自行车运动员	330 mg	胶囊	80%VO _{2max} 强度骑行至力竭	↑ TTE (90.2 min vs. 75.5 min)	→FFA、HR、BLA、VO ₂ ; ↑ 脂肪代谢率、TG; ↓ RER
Spriet 等 ^[48] (1992)	8 名 (7 男 +1 女) 自行车运动员	9 mg/kg	胶囊	80%VO _{2max} 强度骑行至力竭	↑ TTE (96.2 min vs. 75.8 min)	→FFA、NEPI、血浆柠檬酸; ↑ RER、安静时血浆甘油浓度、BLA、GLU、V _E 、VO ₂ 、EPI; ↓ 肌糖原
Pasman 等 ^[49] (1995)	9 名男性自行车运动员	5 mg/kg、9 mg/kg 和 13 mg/kg	胶囊	80%W _{max} 强度骑行至力竭	↑ TTE (5 min vs. 9 min vs. 13 min vs. placebo; 58 min vs. 59 min vs. 58 min vs. 47 min)	↑ FFA、血浆甘油浓度

注:→表示无显著差异;↑表示显著提高;↓表示显著下降;BLA为血乳酸;CRT为选择反应时间;COGRT为认知负荷反应时间;EPI为肾上腺素;FFA为游离脂肪酸;GLU为血糖;HR为心率;NEPI为去甲肾上腺素;placebo为安慰剂;RER为呼吸交换率;RPE为自感用力度;SRT为简单反应时间;TTE为运动至力竭时间;TG为甘油三酯浓度;VO为摄氧量;VO_{2max}为最大摄氧量;V_E为每分钟通气量;W_{max}为最大功率。

前期研究认为摄入中等剂量咖啡因显著延长 TTE。Costill 等^[47]首次以运动员为研究对象,让自行车运动员摄入 330 mg (5 mg/kg) 咖啡因后进行以 80%VO_{2max} 恒定负荷骑行至力竭测试,结果显示摄入咖啡因没有增加血浆游离脂肪酸 (Free Fatty Acids, FFA) 浓度,但增加了血浆甘油三酯 (Triglyceride, TG) 浓度和脂肪代谢率,显著延长了 TTE (19.5%)。类似结果也在跑步运动员的研究中得到了证实,

Sasaki 等^[44]让长跑运动员摄入 384 mg (5.7 mg/kg) 咖啡因后进行以 80%VO_{2max} 恒定负荷跑至力竭测试,结果显示摄入咖啡因显著增加 FFA 和脂肪代谢率,进而显著延长了 TTE (34.4%)。上述两项力竭运动表现改善的原因可能与咖啡因可刺激肾上腺素和去甲肾上腺素的分泌增加^[50],及作为腺苷受体拮抗剂可直接作用于脂肪细胞脂酶的效果^[51-52]。这些都可增强脂肪酶的活性、加快运动中脂肪的动员速率,进而减



少运动早期肌糖原的过度消耗,使节省的糖原作用于运动后半程,从而延缓运动疲劳的产生^[4],有利于提高 TTE 运动表现^[46,53]。

但是,摄入高剂量(> 6 mg/kg)咖啡因还未得到一致结果。Graham 等^[45]让中长跑运动员摄入 9 mg/kg 咖啡因后进行 85%VO_{2max} 强度下分别骑行和跑步至力竭,结果显示咖啡因摄入显著延长了 TTE(骑行增加 51.3%;跑步增加 44.3%)。同样,Spriet 等^[48]研究显示摄入 9 mg/kg 咖啡因显著延长了 80%VO_{2max} 强度骑行的 TTE(27%)。但 Graham 等^[46]研究显示,相较于 3 mg/kg 和 6 mg/kg 咖啡因,9 mg/kg 咖啡因没有延长男子长跑运动员 85%VO_{2max} 恒定负荷跑的 TTE。通过该研究结果推断运动表现没有改善的原因可能与 9 mg/kg 咖啡因显著增加了血乳酸(Blood Lactate, BLA)浓度有关。有研究报道,BLA 大量堆积会导致肌肉疲劳的产生^[54]。另外,McNaughton 等^[43]探讨了摄入 10 mg/kg 和 15 mg/kg 两种高剂量咖啡因对男子长跑运动员以 70%~75%VO_{2max} 恒定

负荷跑步至力竭运动表现的影响,结果显示两种剂量咖啡因都没有增加 BLA,但只有 15 mg/kg 咖啡因显著延长了 TTE(4.7%)。相较于 Graham 等^[46]的结果,该研究中 BLA 没有增加的原因可能是与运动负荷强度低于前者有关(70%~75%VO_{2max} vs. 85%VO_{2max})。综上,摄入高剂量咖啡因可能增加 BLA,进而削弱咖啡因的功能增进效果,但今后需进一步验证该假设。

通过对以上研究的梳理可以总结出,中低剂量咖啡因(3~6 mg/kg)可显著提高 TTE 运动表现,但对于高剂量咖啡因的影响效果还存在一定的争议,在未来的研究中有待进一步探究。

2.3 递增负荷运动

相较于上述有关 TT 和 TTE 的研究数量,仅有 3 篇研究探讨了摄入咖啡因对 GIT 影响效果(表 3)。从总结归纳的文献可知摄入中低剂量咖啡因(3~5 mg/kg)有改善 GIT 运动表现的倾向。

表 3 咖啡因对递增负荷运动表现的影响(n=3)

Table3 Effect of caffeine intake on graded incremental exercise test performed to exhaustion(n=3)

作者(发表年份)	被试	摄入剂量	摄入形式	运动方案	运动表现	主要结果
Powers 等 ^[57] (1983)	7 名男性自行车运动员	5 mg/kg	胶囊	起始负荷 30 W,之后每 3 min 增加 30 W 的递增负荷骑行至力竭	→运动时间[(22.3±0.8)min vs. (21.9±0.7)min]	↑ 安静时 FFA 和 TG、运动时 TG; →VO ₂ 、HR、运动时 FFA、RER
Lara 等 ^[56] (2020)	13 名女性铁人三项运动员	3 mg/kg	胶囊	在 3 种月经阶段(卵泡早期、排卵期、黄体期),分别做两次起始负荷 50 W 的递增负荷骑行(每分钟递增 25 W)至力竭	↑ W _{max} [(4.13±0.69)W/kg vs. (4.24±0.71)W/kg; (4.14±0.70)W/kg vs. (4.27±0.73)W/kg; (4.15±0.69)W/kg vs. (4.29±0.67)W/kg]	↑ VO _{2max} (卵泡早期)、SBP (排卵期、黄体期)、DBP、MAP、V _E (卵泡早期、黄体期)、血乳酸浓度 (卵泡早期、黄体期)、HR _{max} (黄体期);→RPE、BF _{max}
Stadheim 等 ^[8] (2021)	23 名男性耐力运动员(越野滑雪、中长跑和铁人三项)	4.5 mg/kg	胶囊	起始速度 10 km/h,之后每 30 s 增加 0.5 km/h 的递增负荷跑至力竭	↑ 运动时间(375 s vs. 355 s)	↑ VO _{2max} 、HR _{max} 、V _E max、BLA

注:→表示无显著差异;↑表示显著提高;↓表示显著下降;BLA 为血乳酸;DBP 为舒张压;FFA 为游离脂肪酸;HR_{max} 为最大心率;MAP 为平均动脉压;RER 为呼吸交换率;RPE 为主观疲劳感觉;SBP 为收缩压;TG 为甘油三酯浓度;VO₂ 为摄氧量;VO_{2max} 为最大摄氧量;V_E 为每分通气量;W_{max} 为最大功率。

Stadheim 等^[8]让 23 名优秀耐力运动员(越野滑雪、中长跑和铁人三项)摄入 4.5 mg/kg 咖啡因后,进行递增负荷跑台运动至力竭,结果显示摄入咖啡因显著提高了 VO_{2max} 和 GIT 的时间。该 GIT 运动表现得到改善的原因可能与摄入咖啡因增加了心率(Heart Rate, HR)和 BLA,进而同时促进了有氧和无氧代谢参与能量供应有关。另外,研究显示,优秀耐

力运动员在进行高强度运动时会出现运动诱发低氧血症现象(Exercise Induced Arterial Hypoxemia, EIAH),进而限制运动表现^[55]。该研究结果显示摄入咖啡因还增加了最大通气量,进而可增加动脉血氧饱和度,并有效缓解 EIAH 症状,这也可能是 GIT 得到改善的机制之一。同样,以女性铁人三项运动员为实验对象的研究显示,摄入 3 mg/kg 咖啡因显著增加



了递增负荷骑行至力竭的 VO_{2max} 和最大输出功率^[56]。该 GIT 表现得到改善的原因可能与摄入咖啡因降低了 RPE,进而在和对照组相同 RPE 条件下可完成更高负荷强度运动有关。但是, Powers 等^[57]研究显示,摄入 5 mg/kg 咖啡因没有改善自行车运动员 GIT 运动表现。与上述 2 篇文献结果不一致的原因可能跟递增负荷运动方案不同引起的运动持续时间出现差异有关(每 3 min 增加 30 W、每 1 min 增加 25 W、每 30 s 增加 0.5 km/h)。有研究报道 GIT 测试 VO_{2max} 的最佳运动时间在 8~10 min^[58],而 Powers 等^[57]的运动时间则是 21.9 min,远超 GIT 的最佳测试时间。因此,伴随较长时间的 GIT 引起的其他生理机能反应可能抵消了咖啡因的功能增进效果,但需今后的研究进一步验证该假设。

3 咖啡因的安慰剂效应与副作用

近年来,除上述生理机制外,咖啡因对心理方面的影响效果作为提高运动表现的机制之一开始受到关注。安慰剂效应是指利用药物、手术或者其他在理论上并无治疗效果的手段进行干预,但使受试者相信其接受了有益的治疗,并最终表现出积极干预的效果^[59]。安慰剂效应首先在临床实验中证实可有效减轻患者治疗时的疼痛感^[60],进而得到广泛应用。体育领域中,大量研究表明如碳水化合物、咖啡因和一水肌酸等营养补剂亦存在安慰剂效应^[61]。Pollo 等^[62]的研究表明,当受试者摄入安慰剂,但被“欺骗”其摄入的是高剂量咖啡因后,股四头肌的收缩能力显著提高 11.8%。另外,与安慰剂效应相反,亦存在反安慰剂效应,即受试者相信其未接受有益的治疗,从而出现消极的结果^[63]。Saunders 等^[24]的研究表明,当受试者正确识别自己摄入的是安慰剂时, MPO_{30min} (30 min 骑行 TT 的平均输出功率)出现了一定程度的下降(约 0.8%),提示咖啡因亦存在反安慰剂效应。综上所述,咖啡因的安慰剂与反安慰剂效应亦是影响运动表现的机制之一,不容忽视。因此在未来研究中,需询问受试者认为摄入的是咖啡因还是安慰剂,来更深入探讨咖啡因的安慰剂与反安慰剂效应。

研究显示,摄入高剂量咖啡因(>9 mg/kg)可能会提高出现诸如头痛、胃肠道不适、心悸、失眠和焦虑等副作用的风险^[64]。并且,机体对咖啡因的耐受性存在较大个体差异^[65]。因此,未来咖啡因应用于实践时教练员在考虑摄入剂量的同时也应时刻关注运动员的身体状态,若出现严重的生理应激,则应立即停止摄入咖啡因。

4 总结与展望

咖啡因作为一种具有功能增进效果的营养补剂,广泛应用于耐力运动员的训练及比赛中。摄入中高剂量咖啡因可降低 RPE,进而提高以自行车及中长跑为代表的耐力性项目运动员的 TT;中低剂量咖啡因通过增加脂肪的动员速率,使节省的糖原作用于运动后程,从而延长恒定负荷的力竭时间;中低剂量咖啡因通过增加 HR 和 BLA 及降低 RPE,进而有提高 VO_{2max} 和最大输出功率的倾向。综上,耐力运动员多以胶囊形式摄入低中高剂量咖啡因来提高其耐力运动表现,但需根据不同类型的运动表现测试方案选择合适的剂量。

针对前期研究现状,提出以下展望:①市面上的营养补剂及能量饮料中常含多种物质,今后需探讨咖啡因同其他物质混合摄入时的效果,以便给运动员及教练员提供更多营养补剂方案;②目前针对顶级水平运动员的研究较少,咖啡因的功能增进效果是否同样适用于顶级水平运动员尚不明确;③前期相关研究受试对象多为健康男性运动员,女性极少,而女性的咖啡因代谢速率低于男性,咖啡因是否也能提高女性的运动表现及对应的咖啡因有效摄入量 and 最佳摄入时间还有待进一步探究;④咖啡因的耐受性及代谢速率与个体基因有关,今后可从基因层面甄别更易获得咖啡因功效的运动员特征;⑤运动员在高温环境下竞赛成为趋势,但特殊环境(高温及低氧)下的研究较少,尤其是国内相关研究成果鲜见报道,尚存在大量研究空白;⑥日中不同时间段(上午、下午)摄入咖啡因及咀嚼含咖啡因口香糖或凝胶、安慰剂效应的效果还有待进一步探讨与研究。

参考文献:

- [1] DAVIS J M, ZHAO Z, STOCK H S, et al. Central nervous system effects of caffeine and adenosine on fatigue [J]. American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2003, 284(2):R399-R404.
- [2] GOLDSTEIN E R, ZIEGENFUSS T, KALMAN D, et al. International society of sports nutrition position stand: Caffeine and performance[J]. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2010, 7(1):5.
- [3] STADHEIM H K, KVAMME B, OLSEN R, et al. Caffeine increases performance in cross-country double-pole time trial exercise[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2013, 45(11):2175-2183.
- [4] 刘军,乔德才,刘晓莉.咖啡因延缓运动疲劳作用及机制



- 研究进展[J].中国运动医学杂志,2018,37(9):791-796.
- [5] TARNOPOLSKY M, CUPIDO C. Caffeine potentiates low frequency skeletal muscle force in habitual and non-habitual caffeine consumers[J]. *Journal of Applied Physiology*(1985), 2000, 89(5):1719-1724.
- [6] SANTOS RDE A, KISS M A, SILVA-CAVALCANTE M D, et al. Caffeine alters anaerobic distribution and pacing during a 4000-m cycling time trial[J]. *PLoS One*, 2013, 8(9): e75399.
- [7] SANTOS P S, FELIPPE L C, FERREIRA G A, et al. Caffeine increases peripheral fatigue in low-but not in high-performing cyclists[J]. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 2020, 45(11):1208-1215.
- [8] STADHEIM H K, STENSRUD T, BRAGE S, et al. Caffeine increases exercise performance, maximal oxygen uptake, and oxygen deficit in elite male endurance athletes[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2021, 53(11):2264-2273.
- [9] CHA Y S, CHOI S K, SUH H, et al. Effects of carnitine coingested caffeine on carnitine metabolism and endurance capacity in athletes[J]. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology(Tokyo)*, 2001, 47(6):378-384.
- [10] BORTOLOTTI H, ALTIMARI L R, VITOR-COSTA M, et al. Performance during a 20-km cycling time-trial after caffeine ingestion[J]. *Journal of the International Society Sports Nutrition*, 2014, 11:45.
- [11] Wiles J D, Coleman D, Tegerdine M, et al. The effects of caffeine ingestion on performance time, speed and power during a laboratory-based 1 km cycling time-trial [J]. *Journal of Sports Sciences*, 2006, 24(11):1165-1171.
- [12] BEEDIE C J, STUART E M, COLEMAN D A, et al. Placebo effects of caffeine on cycling performance [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2006, 38(12): 2159-2164.
- [13] JENKINS N T, TRILK J L, SINGHAL A, et al. Ergogenic effects of low doses of caffeine on cycling performance[J]. *International Journal of Sport Nutrition Exercise Metabolism*, 2008, 18(3):328-342.
- [14] KILDING A E, OVERTON C, GLEAVE J. Effects of caffeine, sodium bicarbonate, and their combined ingestion on high-intensity cycling performance[J]. *International Journal of Sport Nutrition Exercise Metabolism*, 2012, 22(3):175-183.
- [15] DESBROW B, BIDDULPH C, DEVLIN B, et al. The effects of different doses of caffeine on endurance cycling time trial performance[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2012, 30(2):115-120.
- [16] ASTORINO T A, COTTRELL T, TALHAMI LOZANO A, et al. Effect of caffeine on RPE and perceptions of pain, arousal, and pleasure/displeasure during a cycling time trial in endurance trained and active men[J]. *Physiology & Behavior*, 2012, 106(2):211-217.
- [17] ACKER-HEWITT T L, SHAFER B M, SAUNDERS M J, et al. Independent and combined effects of carbohydrate and caffeine ingestion on aerobic cycling performance in the fed state[J]. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 2012, 37(2):276-283.
- [18] SKINNER T L, JENKINS D G, TAAFFE D R, et al. Coinciding exercise with peak serum caffeine does not improve cycling performance[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2013, 16(1):54-59.
- [19] HODGSON A B, RANDELL R K, JEUKENDRUP A E. The metabolic and performance effects of caffeine compared to coffee during endurance exercise[J]. *PLoS One*, 2013, 8(4):e59561.
- [20] MILLER B, O'CONNOR H, ORR R, et al. Combined caffeine and carbohydrate ingestion: Effects on nocturnal sleep and exercise performance in athletes[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2014, 114 (12): 2529-2537.
- [21] LANE S C, HAWLEY J A, DESBROW B, et al. Single and combined effects of beetroot juice and caffeine supplementation on cycling time trial performance [J]. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 2014, 39 (9):1050-1057.
- [22] PATON C, COSTA V, GUGLIELMO L. Effects of caffeine chewing gum on race performance and physiology in male and female cyclists[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2015, 33(10):1076-1083.
- [23] OBERLIN-BROWN K T, SIEGEL R, KILDING A E, et al. Oral presence of carbohydrate and caffeine in chewing gum: Independent and combined effects on endurance cycling performance[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2016, 11(2):164-171.
- [24] SAUNDERS B, DE OLIVEIRA L F, DA SILVA R P, et al. Placebo in sports nutrition: A proof-of-principle study involving caffeine supplementation[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2017, 27 (11): 1240-1247.
- [25] LARSON E. Exercise Performance and perception of breathlessness after caffeine ingestion in cyclists [D]. Boone: Appalachian State University, 2018.
- [26] GUEST N, COREY P, VESCOVI J, et al. Caffeine, CYP1A2 genotype, and endurance performance in athletes[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2018, 50(8):1570-1578.



- [27] BRIDGE C A, JONES M A. The effect of caffeine ingestion on 8 km run performance in a field setting[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2006, 24(4): 433-439.
- [28] O'ROURKE M P, O'BRIEN B J, KNEZ W L, et al. Caffeine has a small effect on 5-km running performance of well-trained and recreational runners[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2008, 11(2):231-233.
- [29] CLARKE N D, RICHARDSON D L, THIE J, et al. Coffee ingestion enhances 1-mile running race performance[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2018, 13(6):789-794.
- [30] RAMOS-CAMPO D J, PÉREZ A, ÁVILA-GANDÍA V, et al. Impact of caffeine intake on 800-m running performance and sleep quality in trained runners [J]. *Nutrients*, 2019, 11(9):E2040.
- [31] ANDERSON M E, BRUCE C R, FRASER S F, et al. Improved 2000-meter rowing performance in competitive oarswomen after caffeine ingestion[J]. *International Journal of Sport Nutrition Exercise Metabolism*, 2000, 10(4):464-475.
- [32] SKINNER T L, JENKINS D G, COOMBES J S, et al. Dose response of caffeine on 2000-m rowing performance [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2010, 42(3):571-576.
- [33] CARR A J, GORE C J, DAWSON B. Induced alkalosis and caffeine supplementation: Effects on 2,000-m rowing performance[J]. *International Journal of Sport Nutrition Exercise Metabolism*, 2011, 21(5):357-364.
- [34] CHRISTENSEN P M, PETERSEN M H, FRIIS S N, et al. Caffeine, but not bicarbonate, improves 6 min maximal performance in elite rowers[J]. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 2014, 39(9):1058-1063.
- [35] POTGIETER S, WRIGHT H H, SMITH C. Caffeine improves triathlon performance: A field study in males and females[J]. *International Journal of Sport Nutrition Exercise Metabolism*, 2018, 28(3):228-237.
- [36] BEAUMONT R, CORDERY P, FUNNELL M, et al. Chronic ingestion of a low dose of caffeine induces tolerance to the performance benefits of caffeine [J]. *Journal of sports sciences*, 2017, 35(19):1920-1927.
- [37] MIZUNO M, KIMURA Y, TOKIZAWA K, et al. Greater adenosine A(2A) receptor densities in cardiac and skeletal muscle in endurance-trained men: A [11C]TMSX PET study[J]. *Nuclear Medicine and Biology*, 2005, 32(8): 831-836.
- [38] MEEUSEN R, ROELANDS B, SPRIET L L. Caffeine, exercise and the brain[J]. *Nestle Nutrition Institute Workshop Series*, 2013, 76:1-12.
- [39] MACINTOSH B R, WRIGHT B M. Caffeine ingestion and performance of a 1,500-metre swim[J]. *Canadian Journal of Applied Physiology-Revue Canadienne De Physiologie Applique*, 1995, 20(2):168-177.
- [40] LINDINGER M I, GRAHAM T E, SPRIET L L. Caffeine attenuates the exercise-induced increase in plasma [K⁺] in humans[J]. *Journal of Applied Physiology*(1985), 1993, 74(3):1149-1155.
- [41] LOPES J M, AUBIER M, JARDIM J, et al. Effect of caffeine on skeletal muscle function before and after fatigue [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1983, 54(5):1303-1305.
- [42] KALMAR J M, CAFARELLI E. Effects of caffeine on neuromuscular function[J]. *Journal of Applied Physiology* (1985), 1999, 87(2):801-808.
- [43] MCNAUGHTON L R. The influence of caffeine ingestion on incremental treadmill running[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 1986, 20(3):109-112.
- [44] SASAKI H, MAEDA J, USUI S, et al. Effect of sucrose and caffeine ingestion on performance of prolonged strenuous running[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 1987, 8(4):261-265.
- [45] GRAHAM T E, SPRIET L L. Performance and metabolic responses to a high caffeine dose during prolonged exercise[J]. *Journal of Applied Physiology*(1985), 1991, 71(6):2292-2298.
- [46] GRAHAM T E, SPRIET L L. Metabolic, catecholamine, and exercise performance responses to various doses of caffeine[J]. *Journal of Applied Physiology*(1985), 1995, 78(3):867-874.
- [47] COSTILL D L, DALSKY G P, FINK W J. Effects of caffeine ingestion on metabolism and exercise performance[J]. *Medicine and Science in Sports*, 1978, 10(3): 155-158.
- [48] SPRIET L L, MACLEAN D A, DYCK D J, et al. Caffeine ingestion and muscle metabolism during prolonged exercise in humans[J]. *The American Journal of Physiology*, 1992, 262(6 Pt 1):E891-E898.
- [49] PASMANN W J, VAN BAAK M A, JEUKENDRUP A E, et al. The effect of different dosages of caffeine on endurance performance time[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 1995, 16(4):225-230.
- [50] RUIZ-MORENO C, GUTIÉRREZ-HELLÍN J, AMAROGAHETE F J, et al. Caffeine increases whole-body fat oxidation during 1 h of cycling at Fatmax[J]. *European Journal of Nutrition*, 2021, 60(4):2077-2085.
- [51] GRAHAM T E, MCLEAN C. Responses to Caffeine[J]. *Gender Differences in Metabolism: Practical and Nutritional Implications*, 2020:301.



- [52] HULTON A T, VITZEL K, DORAN D A, et al. Addition of caffeine to a carbohydrate feeding strategy prior to intermittent exercise[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2020, 41(9):603-609.
- [53] ESSIG D, COSTILL D, VAN HANDEL P. Effects of caffeine ingestion on utilization of muscle glycogen and lipid during leg ergometer cycling[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 1980, 1(2):86-90.
- [54] 王静,刘洪涛.脑乳酸对运动性中枢疲劳的作用及影响[J].*中国临床康复*,2004(22):4572-4573.
- [55] DEMPSEY J A, WAGNER P D. Exercise-induced arterial hypoxemia[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1999, 87(6):1997-2006.
- [56] LARA B, GUTIÉRREZ-HELLÍN J, GARCÍA-BATALLER A, et al. Ergogenic effects of caffeine on peak aerobic cycling power during the menstrual cycle[J]. *European Journal of Nutrition*, 2020, 59(6):2525-2534.
- [57] POWERS S, BYRD R, TULLEY R, et al. Effects of caffeine ingestion on metabolism and performance during graded exercise[J]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1983, 50(3):301-307.
- [58] YOON B K, KRAVITZ L, ROBERGS R. VO_{2max} , protocol duration, and the VO_2 plateau[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2007, 39(7):1186-1192.
- [59] 张莹,黄希庭.关于安慰剂效应的研究[J].*心理科学*, 2008,31(1):214-217,252.
- [60] TURNER J A, DEYO R A, LOESER J D, et al. The importance of placebo effects in pain treatment and research[J]. *JAMA*, 1994, 271(20):1609-1614.
- [61] BEEDIE C J, FOAD A J. The placebo effect in sports performance: A brief review [J]. *Sports Medicine*, 2009, 39(4):313-329.
- [62] POLLO A, CARLINO E, BENEDETTI F. The top-down influence of ergogenic placebos on muscle work and fatigue[J]. *European Journal of Neuroscience*, 2008, 28(2): 379-388.
- [63] 魏华,唐丹丹,夏晓磊,等.疼痛背景下的反安慰剂效应:从发生机制到临床启示[J].*中国疼痛医学杂志*, 2015,21(11):801-805.
- [64] WIKOFF D, WELSH B T, HENDERSON R, et al. Systematic review of the potential adverse effects of caffeine consumption in healthy adults, pregnant women, adolescents, and children[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2017, 109(Pt 1):585-648.
- [65] SOUTHWARD K, RUTHERFURD-MARKWICK K J, ALI A. The effect of acute caffeine ingestion on endurance performance: A systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Medicine*, 2018, 48(8):1913-1928.
- (责任编辑:刘畅)

(上接第 84 页)

- strings eccentric strength and functional performance: A randomized controlled trial [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2020, 34(7):2031-2039.
- [31] KELLIS E. Intra- and inter-Muscular Variations in hamstring architecture and mechanics and their implications for injury: A narrative review[J]. *Sports Medicine*, 2018, 48(10):2271-2283.
- [32] ARNOLD A S, SALINAS S, ASAKAWA D J, et al. Accuracy of muscle moment arms estimated from MRI-based musculoskeletal models of the lower extremity[J]. *Computer Aided Surgery*, 2000, 5(2):108-119.
- [33] THELEN D G, CHUMANOV E S, SHERRY M A, et al. Neuromusculoskeletal models provide insights into the mechanisms and rehabilitation of hamstring strains [J]. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 2006, 34(3):135-141.
- [34] MAGNUSSON S P, AAGAARD P, SIMONSEN E B, et al. Passive tensile stress and energy of the human hamstring muscles in vivo[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2000, 10(6):351-359.
- [35] VAN DER MADE A D, WIELDRAAIJER T, KERKHOFFS G M, et al. The hamstring muscle complex[J]. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 2015, 23(7):2115-2122.
- [36] ARYA S, KULIG K. Tendinopathy alters mechanical and material properties of the Achilles tendon[J]. *Journal of Applied Physiology*(1985), 2010, 108(3):670-675.
- [37] DOLMAN B, VERRALL G, REID I. Physical principles demonstrate that the biceps femoris muscle relative to the other hamstring muscles exerts the most force: Implications for hamstring muscle strain injuries [J]. *Muscles Ligaments Tendons Journal*, 2014, 4(3):371-377.
- (责任编辑:刘畅)