

咖啡因对运动表现的影响：多学科视角下的机制、应用与个性化策略

胡阳鲜 吴佳逊 刘一鸣

四川农业大学体育学院，雅安

摘要 | 近年来，咖啡因提神醒脑和提高运动能力的特性受到了广泛关注。研究表明，咖啡因通过多种分子通路影响运动能力，包括调节能量代谢、改善神经传导、减少疲劳感等。尽管已有大量研究证实咖啡因的有效性，但运动员在实际训练和比赛中如何个性化使用咖啡因来达到最佳运动表现仍然是一个复杂的问题。本文通过综合分析现有文献，旨在揭示咖啡因在运动营养中的应用潜力，探讨咖啡因作为一种重要的兴奋剂在运动表现中的作用及其生物学机制，并提出个性化策略，帮助运动员更有效地利用咖啡因提升运动表现，为运动营养领域提供新的见解。

关键词 | 咖啡因；运动营养；分子通路；运动表现；运动员实践

Copyright © 2025 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



咖啡因是一种广泛使用的兴奋剂，尤其在运动领域。作为一种常见的刺激物，咖啡因可以通过提高注意力、增强耐力和减少疲劳感等方式影响身体反应。研究表明，咖啡因能够有效提升运动表现，尤其是在耐力运动和高强度间歇性训练中，参与者在摄入咖啡因后通常表现出更好的成绩^[1, 2]。此外，咖啡因的使用在运动员中也极其普遍，许多运动员将其视为一种合法的增强运动表现的手段。本文旨在探讨咖啡因在运动中的作用机制、有效性以及个性化策略的重要性。随着对咖啡因影响的研究不断深入，了解其在不同个体中的效果差异以及潜在的个性化应用策略显得尤为重要。例如，个体的咖啡因消费习惯、遗传因素和训练状态都可能会影响其对咖啡因的反应^[3, 4]。

在运动生理学中，咖啡因的作用机制主要包括对中

枢神经系统的刺激、脂肪氧化率的提高以及肌肉收缩力的增强等^[5, 6]。这些机制既有助于提升运动表现，又能在运动恢复和疲劳管理中发挥重要作用。随着越来越多的研究证明咖啡因的益处，运动员和教练在训练和比赛前的补充策略也逐渐丰富完善。

1 咖啡因的生化性质和代谢动力学

1.1 分子结构与受体相互作用

咖啡因（3, 7-二氢-1, 3, 7-三甲基-1H-嘌呤-2, 6-二酮，见图1）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^[7]，其在细胞水平上主要有四种作用机制：①作为细胞肌浆网理阿诺碱受体

通讯作者：胡阳鲜，四川农业大学体育学院学生。

文章引用：胡阳鲜，吴佳逊，刘一鸣. 咖啡因对运动表现的影响：多学科视角下的机制、应用与个性化策略[J]. 中国体育研究, 2025, 7(2): 131-140.

<https://doi.org/10.35534/scps.0702020>

(ryanodine receptor) 的激动剂能引发对ryanodine敏感的钙库释放,从而促使肌浆网释放钙离子,增加细胞内的钙离子浓度,同时增强肌纤维对钙离子的敏感性;②抑制磷酸二酯酶使组织及肌肉内环磷腺苷(cAMP)的浓度升高;③具有 γ 2氨基酸受体拮抗作用;④中枢腺苷受体(A)拮抗剂^[8, 9]。腺苷是一种在体内自然存在的抑制性神经递质,研究表明,咖啡因与腺苷受体结合后,能

够阻止腺苷的抑制作用,从而提高神经元的兴奋性,增强注意力和警觉性^[10]。此外,咖啡因还可能通过影响多巴胺、去甲肾上腺素、52羟色胺、乙酰胆碱、谷氨酸等其他神经递质的释放^[11],进一步增强其兴奋效果,包括提高警觉性、记忆力、信息处理速度等。这种复杂的受体相互作用使得咖啡因在运动表现和认知功能提升方面具有显著的潜力。

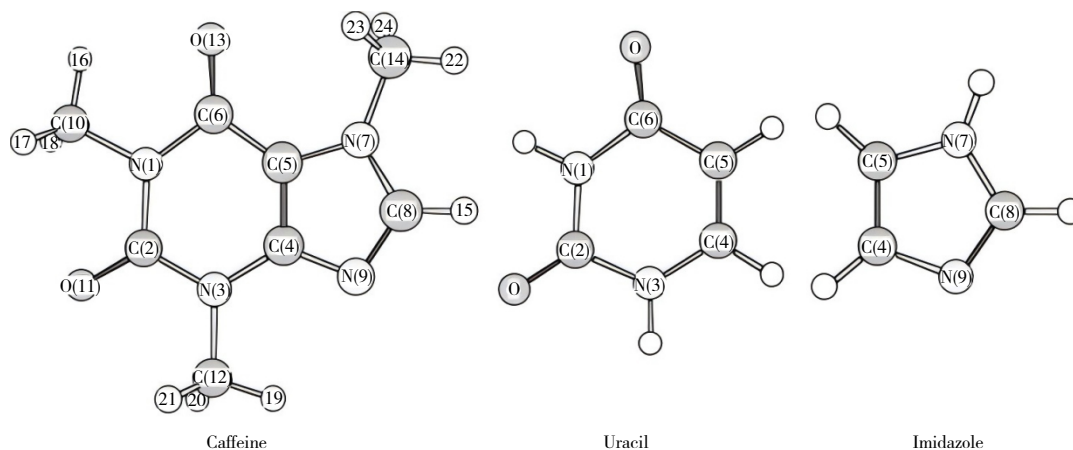


图1 咖啡因和相关分子的分子模型和原子编号(阴影是双键)^[12]

Figure 1 Molecular models and atomic numbering of caffeine and related molecules (shaded areas represent double bonds)

1.2 吸收、分布和消除途径

咖啡因在摄入后会迅速被血液吸收,其中约20%被胃黏膜吸收,其余80%被小肠黏膜吸收,部分咖啡因也可以被口腔黏膜吸收^[13]。咖啡因被吸收后会迅速分布到大多数组织和体液中,在不同的中枢和外周部位发挥各种药理作用。

咖啡因通常在口服后30分钟至2小时内达到吸收峰值,其生物利用度较高,约为99%。咖啡因在体内的分布十分广泛,能够迅速穿透血脑屏障,影响中枢神经系统。其分布容积约为0.5–0.7 L/kg,显示出其在体内的广泛分布。需要注意的是,咖啡因的摄入量不宜过高,单次摄入咖啡因含量超过250mg可能会导致咖啡因中毒,并伴有不安、紧张、失眠、脸红、胃肠道紊乱等症状,健康成年人每日摄入咖啡因剂量应低于400mg^[14]。虽然咖啡因不是一种成瘾性药物,但长期摄入会出现戒断反应,咖啡因戒断则会引起反弹性头痛、嗜睡、情绪低落、疲劳和焦虑,反而对人体健康产生不利影响。

如图2所示,咖啡因的代谢主要是在肝脏内进行,通过细胞色素P450酶系(尤其是CYP1A2)进行氧化代谢,生成主要代谢物,如对甲基咖啡因、茶碱、可可碱、副黄嘌呤等^[15]。其中茶碱具有类似咖啡因的兴奋作用,但

相对较弱,可可碱和副黄嘌呤具有轻微的中枢神经系统刺激作用,能促进呼吸^[16, 17]。咖啡因的半衰期在健康成年人中通常为3~5小时,但是在孕妇或肝功能不全的患者中可能延长^[18]。咖啡因的排泄主要通过肾脏进行,大约有80%以代谢物的形式通过尿液排出,只有少量以未改变的形式排出。这些代谢和排泄特征对于理解咖啡因在运动表现中的作用至关重要。

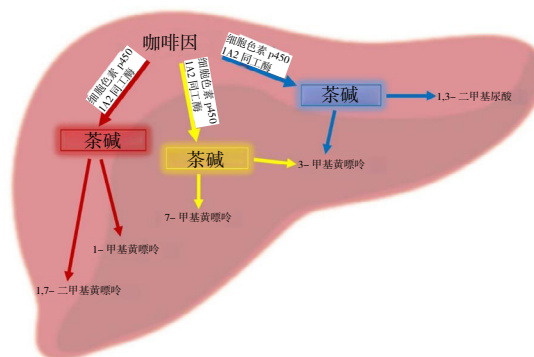


图2 肝脏咖啡因代谢的主要途径^[19]

Figure 2 Main pathways of caffeine metabolism in the liver

2 双重作用机制：能量代谢与神经调节

2.1 咖啡因作为代谢促进剂：脂肪氧化和糖原消耗

咖啡因作为一种广泛使用的兴奋剂，在运动中的代谢促进作用已得到广泛研究。研究表明，咖啡因可以显著提高脂肪氧化率，促进能量代谢，从而改善运动表现。具体表现为，咖啡因通过刺激中枢神经系统，增加肾上腺素的分泌，促进脂肪酸的释放和氧化，减少糖原的消耗。多项研究表明，咖啡因的摄入可以提高运动时的脂肪氧化率，降低呼吸交换比率（RER），这表明身体更倾向于使用脂肪作为能量来源，而非糖原^[20]。此外，咖啡因还能够提高运动后的糖原合成率，这对于运动员的恢复至关重要^[21]。因此，咖啡因作为代谢促进剂的作用，不仅在于提高运动表现，还在于优化能量利用效率，能够为运动员提供更持久的能量支持。

科瓦奇（Kovacs）等人研究表明绿茶中提取的咖啡因对减肥成功病人维持体重有良好效果^[22]。Westerterp-Plantenga等证实高剂量咖啡因摄入组人群的体重、体脂含量、腰围等均小于低剂量组^[23]。杜卢（Dulloo）等研究发现适量的咖啡碱可以通过影响能量代谢预防肥胖^[24]。吉冈（Yoshioka）等通过腹腔注射咖啡碱，发现高浓度的咖啡碱能促进体内能量代谢和减少脂肪蓄积，而低浓度咖啡碱没有明显效果^[25]。杨丽聪等人发现小鼠摄入咖啡因之后，体内脂肪沉积减少^[26]。咖啡因的降脂作用可能有三个机制：促进CA的分泌，通过CAMP蛋白激酶通路，激活脂肪水解酶；与腺苷受体结合阻断腺苷作用，使得环磷酸腺苷含量增加，促进脂解；直接作用于脂肪组织中的酯酶，分解脂肪^[27]。相关

基础研究也认为咖啡因加速代谢的作用机理是其能够促进脂肪组织分解和脂质氧化，缓解肝脏脂肪生成^[28, 29]；可以通过降低食欲，提高基础代谢率，增加食物热效应来改善能量平衡^[30]。但是，也有一些实验表明咖啡因对脂肪代谢并无影响。杜卢等人以健康男性作为实验对象，发现给予咖啡因后，实验对象并没有出现明显的脂肪减少和能量消耗增加的现象^[31]。但是咖啡因是否能降低脂肪积累，促进脂肪代谢，目前尚未有系统具体的研究，并且大部分关于咖啡因对脂代谢的研究仅停留在现象阶段，仍需深入探究。

2.2 神经生理学效应：中枢性疲劳减弱和运动单元的招募

咖啡因的神经生理学效应主要体现在对中枢神经系统的刺激作用上。研究表明，咖啡因可以降低中枢性疲劳的感知，使运动员在高强度训练或比赛中能够更好地维持运动表现，提高运动竞技能力。如图3至图7，显示了咖啡因摄入量对神经肌肉疲劳生理指标（VA、PTw、M波、EMG和PP、MVC）的影响。表明咖啡因能够提高运动皮层的兴奋性，增加运动单元的激活率，从而提高肌肉的力量输出和耐力。在一项研究中，咖啡因的摄入被发现能够显著减少运动后的静息期，这表明其对神经系统的抑制机制有一定调节作用。健康成年人单次摄入75-150 mg咖啡因后，可在摄入后30-120分钟内缓解精神疲劳^[32-35]。咖啡因可用于延缓长跑运动员感知疲劳的时间，从而提高其运动能力^[36]。此外，咖啡因还可能通过改善运动单元之间的协调性来增强肌肉的收缩能力，从而提高整体的运动表现^[37]。这种神经生理学效应的增强，不仅有助于运动员在训练和比赛中表现出更高的耐力、力量，也为运动后的恢复提供了更好的条件，体现了咖啡因在运动中的双重作用机制。

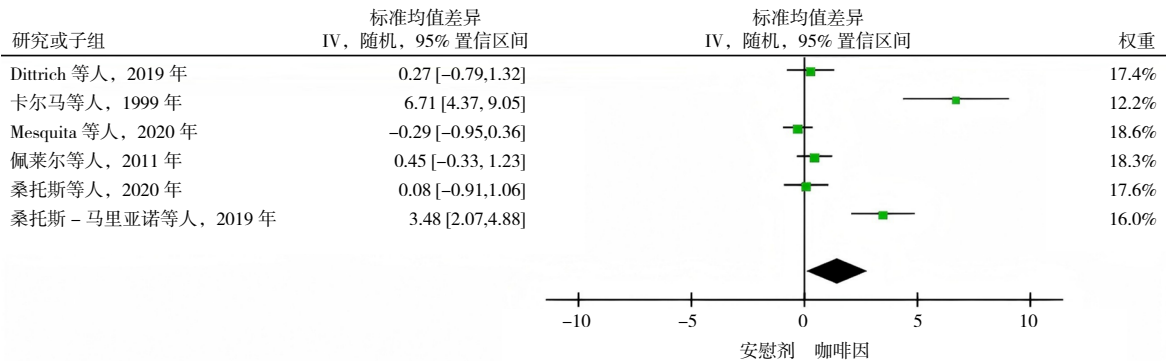


图 3 咖啡因对自愿激活（VA）的影响^[38]

Figure 3 The effect of caffeine on voluntary activation (VA)

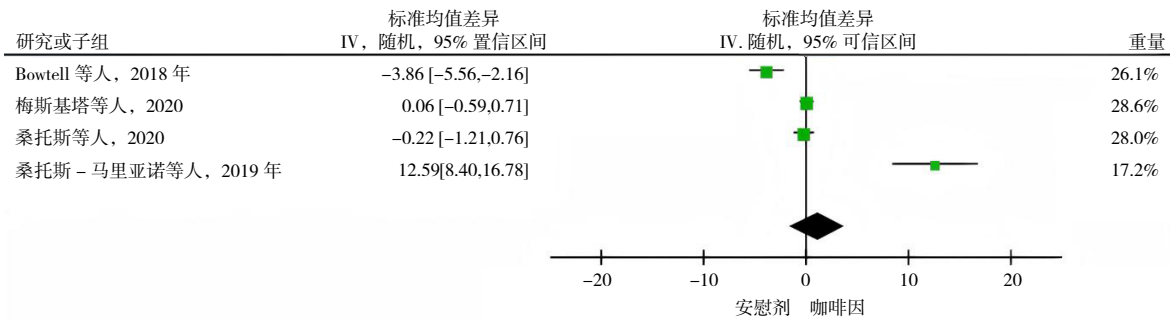


图 4 咖啡因对增强Twitch的影响 (PTw) [38]

Figure 4 The effect of caffeine on enhancing Twitch (PTw)

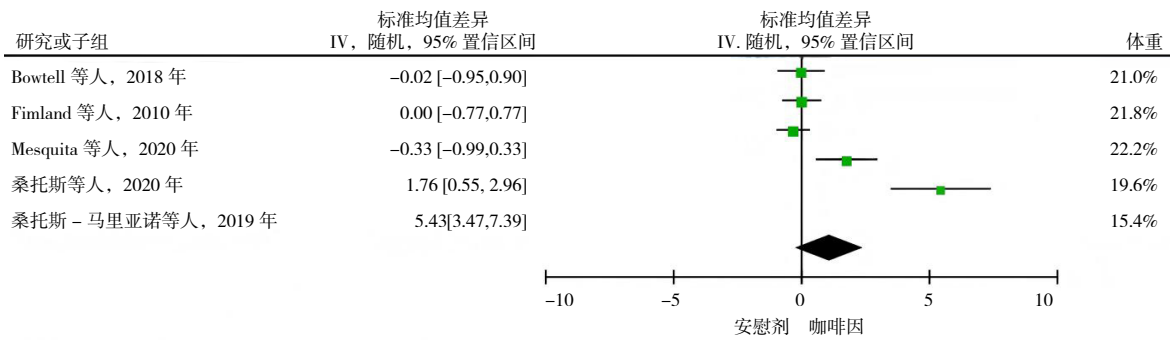


图 5 咖啡因对M波的影响 [38]

Figure 5 The effect of caffeine on the M wave

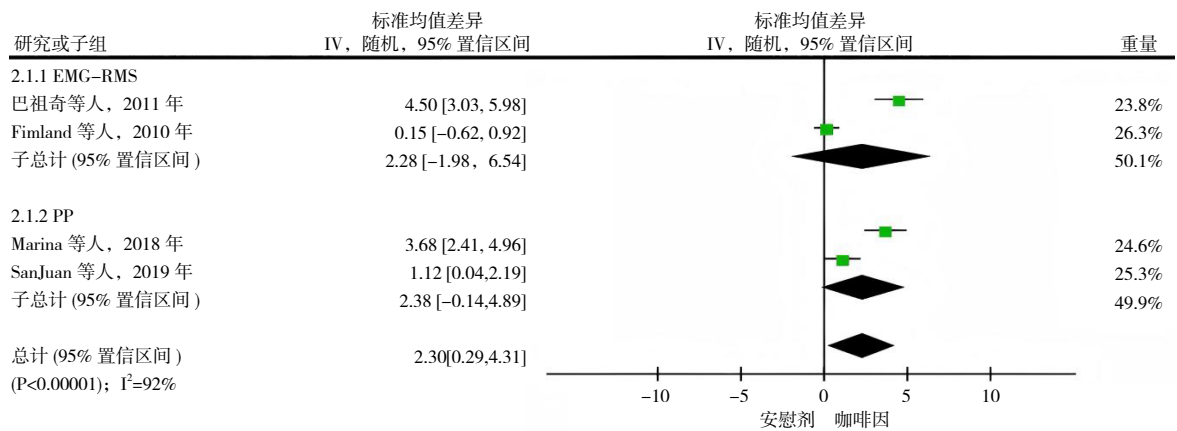


图 6 咖啡因对肌电图均方根 (EMG) 的影响 (RMS)、峰值功率 (PP) [38]

Figure 6 The effect of caffeine on the root mean square (RMS) and peak power (PP) of electromyography

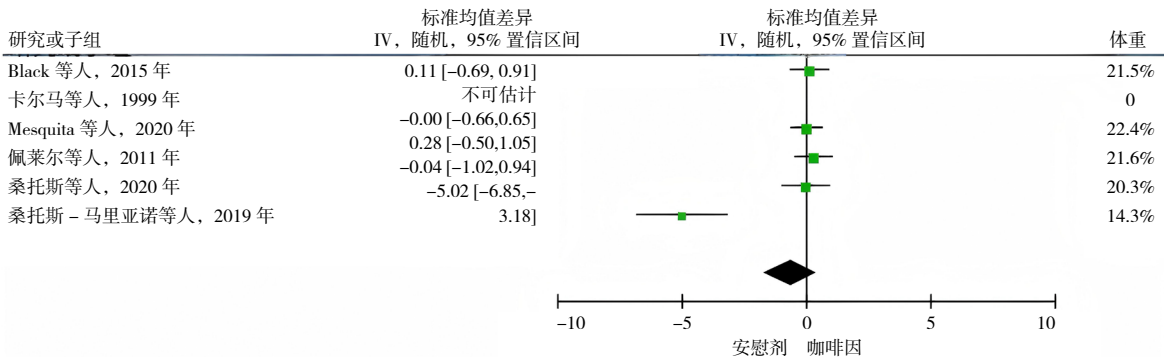


图 7 咖啡因对最大自主收缩 (MVC) 的影响 [38]

Figure 7 The effect of caffeine on maximal voluntary contraction (MVC)

2.3 特定运动应用：耐力和抵抗运动的证据

2.3.1 耐力表现：到达力竭的时间与时间试验的效能

咖啡因作为一种具有功能增进效果的营养补剂，在耐力运动员的训练及比赛中，其摄入被广泛研究，并且证实能够显著提高运动表现。多项研究表明，咖啡因能够延长运动者到达力竭的时间，尤其是在高强度的耐力运动中。一项涉及健康男性的研究发现，摄入咖啡因后，运动者的耐力表现显著提高，在时间试验中的表现也得到了改善。此外，咖啡因的摄入还能够降低运动过程中的感知努力程度，使运动者在相同强度下感受到的疲劳减少，从而可能延长运动持续时间。这种效果在不同的耐力运动项目中均有体现，均表明咖啡因作为一种兴奋剂在耐力运动中的有效性 [39]。

2.3.2 电阻训练：功率输出、重复量和恢复

在电阻训练中，咖啡因的摄入同样显示出潜在的益处。研究表明，咖啡因可以提高训练中的功率输出和重复次数。一项研究发现，摄入咖啡因后，参与者在进行高强度的电阻训练时，能够增加其最大力量和重复次数。此外，咖啡因的摄入还能够加速恢复过程，减少训练后的肌肉酸痛感和疲劳感。这表明，咖啡因不仅能提高电阻训练的表现，还可能通过改善恢复来增强训练效果，进而促进肌肉的生长和适应 [39]。然而，咖啡因对不同个体的影响可能存在差异性，个体的咖啡因耐受性和训练经验可能会影响其效果。

2.4 优化咖啡因补充：从剂量反应到个性化

2.4.1 时间、配方和剂量依赖性

咖啡因的补充在运动表现中展现出显著的剂量反应关系，尤其是在不同的时间和配方下。研究表明，适量的咖啡因（通常为 3–6 mg/kg 体重）在运动前 60 分钟摄入时，能够有效提高运动表现 [40]。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期，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 VO₂max 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 [41]。然而，咖啡因的效果不仅与剂量有关，还受到个体的生理状态、运动类型和环境因素的影响。在高温和高湿环境下，低剂量咖啡因的补充能够改善间歇性运动表现，但不会显著影响体温调节 [42]。此外，不同的咖啡因来源（如咖啡、能量饮料或咖啡因口香糖）也可能影响其吸收速度和效能，因此，在制定补充策略时，选择合适的配方和时间至关重要 [43]。

2.4.2 个体间变异性：CYP1A2 基因型和定居效应

个体对咖啡因的反应存在显著差异，这种变异性主要与 CYP1A2 基因的多态性有关。CYP1A2 基因的不同单核苷酸多态性 (SNPs) 会影响个体对咖啡因的代谢速率，从而导致不同的生理反应。例如，CYP1A2 的快速代谢者 (AA 基因型) 与慢代谢者 (C-等位基因携带者) 在运动表现上可能出现不同的咖啡因反应 [41]。ADORA2A 基因的变异也被发现与个体对咖啡因的敏感性相关，这可能进一步影响其在运动中的表现 [44]。此外，研究表明尽管男性与女性均会因为咖啡因的摄入而出现血压升高，但其发生的血流动力学机制却并不相同：女性持续的血压升高是因为咖啡因引起了持续心输出量增加所致；而男性则是因为引起了持续的血管阻力增加所致。因此，这种因长期咖啡摄入所致心血管效应的性别差异可能会增加女性患高血压病的危险，应引起重视，尤其是女性不能只注意绝经和服用雌激素会增加罹患高血压病的危险，还应当警惕因为长期咖啡因摄入对高血压发病造成的影响 [45]。

总之，使用咖啡因的增效或麦角合成作用可能受到

与咖啡因效应、日常习惯、生理因素和遗传因素相关的因素的影响，如图8所示。因此，个体化的咖啡因补充策略应考虑这些基因型的差异，以优化运动表现并减少

副作用。针对不同基因型的运动员，未来的研究应探索更为个性化的补充方案，以实现最佳的运动效果和健康益处。

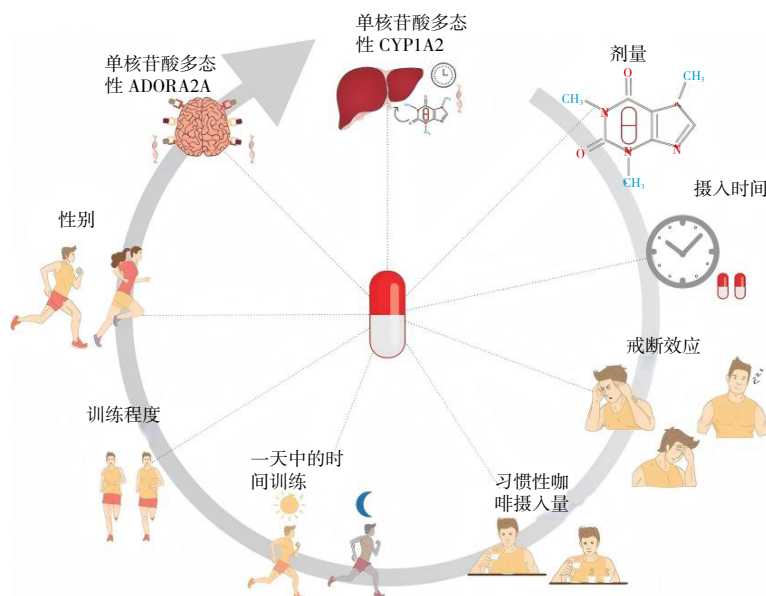


图8 可能涉及咖啡因补充剂对体育锻炼的增效或麦角采作用的主要因素 [46]

Figure 8 The main factors that may involve the synergistic effect of caffeine supplements on physical exercise or the ergogenic effect of ergot alkaloids

2.5 未解决的争议与挑战

2.5.1 长期适应：耐受力发展与累积效益

咖啡因的长期使用在运动表现中的作用仍存在争议，尤其是在耐受力的发展和累积效益方面。研究表明，长期摄入咖啡因可能导致身体对其兴奋作用的耐受性增强，从而降低其对运动员运动表现的积极影响。有研究发现，经过长时间的咖啡因摄入，运动员在高强度运动中的表现提升可能会减弱，表明耐受性的发展可能会抵消咖啡因的初始益处。当咖啡因达到一定剂量就会对真核细胞产生毒害作用，人体高含量摄入咖啡因可引起烦躁、焦虑、失眠、易怒等不良反应^[47]。此外，个体对咖啡因的反应存在显著差异，这与个人的遗传背景、咖啡因摄入习惯以及生理状态密切相关^[48]。如何在长期使用咖啡因的情况下保持其对运动表现的促进作用，仍需进一步的研究。

2.5.2 竞技体育中的伦理和安全考虑

在竞技体育中，咖啡因的使用引发了伦理和安全方面的广泛讨论。尽管咖啡因被广泛认为是合法的兴奋剂，并且在许多运动中被允许使用，但潜在的副作用和滥用风险仍然令人担忧^[49]。过量摄入咖啡因可能导致心律不齐、焦虑以及其他健康问题，这在高强度训练和比赛期间尤其值得关注^[50]。此外，咖啡因的使用可能会影

响运动员的公平竞争原则，尤其是在一些运动项目中，运动员可能通过咖啡因提高表现，对其他未使用咖啡因的运动员造成不公平的竞争优势。在确保运动员健康和公平竞争的前提下如何合理使用咖啡因，是竞技体育界亟待解决的问题。

总而言之，咖啡因作为一种常见的兴奋物质，在耐力运动表现中具有潜在的积极影响。合理地使用咖啡因可能有助于提高运动耐力表现。然而，为了更好地发挥其作用，个体差异、剂型剂量等因素应予以充分考虑。未来的研究可以深入探讨咖啡因的作用机制，以及个体基因型对其影响的调节作用。

3 讨论

3.1 咖啡因的作用机制与运动表现提升

咖啡因通过多重途径影响运动表现，其核心机制包括腺苷受体拮抗、脂肪氧化促进及中枢神经兴奋。腺苷受体抑制可减少疲劳感知，延长高强度运动的耐受时间，而脂肪氧化的增强则有助于节约糖原，延缓能量耗竭。神经肌肉层面的研究表明，咖啡因能提高运动单元募集效率，尤其在抗阻训练中表现为功率输出的提升。然而，这些效应存在剂量依赖性，过量摄入（>9 MG/KG）可能导致副作用（如焦虑、胃肠不适），反而会

削弱运动表现。短期使用，一般在剂量超过1G，血浆浓度超过30MG/l（150Mm）才出现毒性反应，如兴奋、失眠、烦躁不安、神经质、脸面潮红、多尿、胃肠功能失调，严重的还能引起肌肉抽搐、心动过速甚至心律失常，但剂量超过250MG也会有人出现症状；长期摄入大剂量的咖啡因（>600MG/D）能产生类似焦虑状态的综合症，包括焦虑、烦躁不安、失眠。总的来说，一般生理剂量是安全的，长期应用咖啡因并没有明显的毒性^[51]。因此，运动员需要把控好个性化剂量，尽量减少药物带来的风险。

3.2 个体差异对咖啡因反应的影响

个体对咖啡因的反应差异显著，主要受基因型、代谢率及训练状态调节。CYP1A2基因多态性决定了咖啡因的代谢速度，慢代谢者（C-等位基因携带者）可能因血浆咖啡因浓度持续较高而获益更多，但也更易出现不良反应。此外，长期摄入咖啡因的运动员可能产生耐受性，导致相同剂量的效果递减。这一现象表明，间歇性使用或周期化补充可能更有利于维持咖啡因的增益效果。训练水平也是一个关键变量，新手运动员对咖啡因的敏感性通常高于高水平运动员，高水平运动员可能需要更高的剂量才能获得显著提升。

3.3 伦理与健康风险考量

咖啡因自2004年被移出兴奋剂禁用清单后，作为运动增能补剂已被广泛应用于马拉松、铁人三项等耐力运动，并被证实对网球、羽毛球、壁球等持拍类运动具有积极作用^[52]，但它在竞技体育中的使用仍然存在伦理争议。一方面，咖啡因的普及性使得其难以监管，可能导致隐性剂量竞赛；另一方面，过量摄入（如能量饮料滥用）与心血管风险（如心律失常）的关联不容忽视。此外，青少年运动员的咖啡因使用必须格外谨慎，其神经系统发育尚未成熟，更易受到负面影响。未来研究应进一步明确安全剂量范围，并制定针对不同人群（如青少年、女性运动员）的使用指南。

鉴于咖啡因的特殊生理作用，许多国家和地区对咖啡因使用和标识进行较为严格的管理。但是，咖啡因并不是我国食品标签等相关法规、标准中需强制标识的内容，所以目前大部分食品中咖啡因的含量和警示标识并不明确，因此人群经膳食摄入咖啡因的水平亟待关注和评估。目前，美国、欧盟等已有人群膳食咖啡因的摄入量及风险评估的文献报道，从而为明确人群咖啡因的安全摄入量提供了数据支持^[53-57]；但是目前国内尚没有相关评估结果报道。

3.4 未来研究方向

当前研究多聚焦于咖啡因的急性效应，而长期影响（如代谢适应、肠道菌群交互作用）尚未得到广泛研究。新兴领域如“运动-微生物组”研究表明，肠道菌群可能通过调节咖啡因代谢物（如副黄嘌呤）影响其生物

利用度。此外，结合人工智能的个性化营养模型（如基于基因型、代谢组学的剂量预测）或许将成为优化咖啡因应用的突破口。跨学科合作（如运动科学、计算生物学）将推动这一领域从经验性使用迈向精准化干预。

4 结论

咖啡因作为一种广泛应用于运动营养的补剂，其重要性不容忽视。综合现有的研究成果，咖啡因通过多重作用机制显著提升运动表现，包括增强耐力、提高心理专注力以及减少疲劳感等。这些积极影响使得咖啡因在运动员的训练和比赛中被广泛应用。然而，随着研究的深入，咖啡因的作用机制也逐渐被揭示出更为复杂的层面。

近年来，肠道微生物群的研究为我们提供了一个新的视角。肠道微生物群不仅影响宿主的代谢和免疫功能，还可能与咖啡因的代谢和效应密切相关。这一领域的前沿研究表明，个体差异在咖啡因对运动表现的影响中起到了重要作用，肠道微生物群的组成和功能可能是影响这一差异的重要因素。因此，未来的研究可以借助多组学方法，探索咖啡因、肠道微生物群及宿主之间的相互作用，为个性化运动营养方案的制定提供重要依据。

在平衡不同研究观点和发现时，我们应注意咖啡因对运动表现的影响不仅取决于其生物化学机制，还受到个体基因、饮食习惯、训练状态等多种因素的影响。因此，未来的研究应更加注重多因素交互作用的探索，以建立更全面的理论框架。同时，科学合理地引导运动员和公众对咖啡因的使用，确保其在运动营养中的应用是安全且有效的。

总之，咖啡因在运动营养中扮演着重要角色，未来的研究有望通过深入探讨其与肠道微生物群的相互作用，为提升运动表现提供新的思路和方法。这将为运动科学和营养学的交叉研究开辟新的方向，为运动员的表现优化提供更具针对性的指导。

参考文献

- [1] Mesquita R N O, Cronin N J, Kyröläinen H, et al. Effects of caffeine on neuromuscular function in a non-fatigued state and during fatiguing exercise [J]. *Exp Physiol*, 2020, 105 (4): 690-706.
- [2] Rodas L, Martinez S, Aguilo A, et al. Caffeine supplementation induces higher IL-6 and IL-10 plasma levels in response to a treadmill exercise test [J]. *J Int Soc Sports Nutr*, 2020, 17 (1): 47.
- [3] Cristina-Souza G, Santos P S, Santos-Mariano A C, et al. Caffeine Increases Endurance Performance via Changes in Neural and Muscular Determinants of

- Performance Fatigability [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2022, 54 (9) : 1591–1603.
- [4] Sogard A S, Mickleborough T D. The therapeutic potential of exercise and caffeine on attention-deficit/hyperactivity disorder in athletes [J]. *Front Neurosci*, 2022 (16) : 978336.
- [5] Zhan Q Y, Xie L X, Wang C. Promoting critical care system and capacity building in pulmonary and critical care medicine subspecialties [J]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 2023, 103 (40) : 3149–3151.
- [6] Rohloff G, Souza D B, Ruiz-Moreno C, et al. Stimulus Expectancy and Stimulus Response of Caffeine on 4-km Running Performance: A Randomized, Double-blind, Placebo-controlled and Crossover Study [J]. *Int J Exerc Sci*, 2022, 15 (2) : 645–654.
- [7] 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.
- [8] 陈莹, 魏尔清. 中枢兴奋药咖啡因的再评价 [J]. *国外医学·生理、病理科学与临床分册*, 1997, 17 (4) : 375–378.
- [9] Fredholm B B, Battig K, Holman J. Actions of caffeine in the brain with special reference to factors that contribute to its widespread use [J]. *PHARMACOLOGICAL REVIEWS*, 1999, 51 (1) : 83–133.
- [10] Huertas F, Blasco E, Moratal C, et al. Caffeine intake modulates the functioning of the attentional networks depending on consumption habits and acute exercise demands [J]. *Sci Rep*, 2019, 9 (1) : 10043.
- [11] 李丽. 苦参碱和咖啡因化合物晶体结构研究 [D]. 浙江工业大学, 2006.
- [12] Egawa T, Kamiya A, Takeuchi H, et al. Molecular structure of caffeine as determined by gas electron diffraction aided by theoretical calculations [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2006, 825 (1) : 151–157.
- [13] SZLAPINSKI S K, CHARRETTE A, GUTHRIE N, et al. Paraxanthine safety and comparison to caffeine [J]. *Front Toxicol*, 2023 (5) : 1117729.
- [14] JAHRAHI H, AL-MUTARID M, PENSON P E, et al. Intake of Caffeine and Its Association with Physical and Mental Health Status among University Students in Bahrain [J]. *Foods*, 2020, 9 (4) .
- [15] Gonçalves D F, Tassi C C, Amaral G P, et al. Effects of caffeine on brain antioxidant status and mitochondrial respiration in acetaminophen-intoxicated mice [J]. *Toxicol Res (Camb)*, 2020, 9 (5) : 726–734.
- [16] SZLAPINSKI S K, CHARRETTE A, GUTHRIE N, et al. Paraxanthine safety and comparison to caffeine [J]. *Front Toxicol*, 2023 (5) : 1117729.
- [17] BHAT J A, KUMAR M. Neuroprotective effects of theobromine in permanent bilateral common carotid artery occlusion rat model of cerebral hypoperfusion [J]. *Metab Brain Dis*, 2022, 37 (6) : 1787–1801.
- [18] Grimm M, Rump A, Meilicke L, et al. Comparing Salivary Caffeine Kinetics of ¹³C and ¹²C Caffeine for Gastric Emptying of 50 mL Water [J]. *Pharmaceutics*, 2023, 15 (2) .
- [19] Kamil R, Izabela K, Maria E K. Caffeine as a Factor Influencing the Functioning of the Human Body—Friend or Foe? [J]. *Nutrients*, 2021, 13 (9) : 3088.
- [20] Collado-Mateo D, Lavín-Pérez A M, Merellano-Navarro E, et al. Effect of Acute Caffeine Intake on the Fat Oxidation Rate during Exercise: A Systematic Review and Meta-Analysis [J]. *Nutrients*, 2020, 12 (12) .
- [21] Loureiro L M R, Dos Santos Neto E, Molina G E, et al. Coffee Increases Post-Exercise Muscle Glycogen Recovery in Endurance Athletes: A Randomized Clinical Trial [J]. *Nutrients*, 2021, 13 (10) .
- [22] Kovacs E M, Lejeune M P, Nijs I, et al. Effects of green tea on weight maintenance after body-weight loss [J]. *Br J Nutr*, 2004, 91 (3) : 431–437.
- [23] Westerterp-Plantenga M S, Lejeune M P, Kovacs E M. Body weight loss and weight maintenance in relation to habitual caffeine intake and green tea supplementation [J]. *Obes Res*, 2005, 13 (7) : 1195–1204.
- [24] Dulloo A G, Geissler C A, Horton T, et al. Normal caffeine consumption: influence on thermogenesis and daily energy expenditure in lean and postobese human volunteers [J]. *Am J Clin Nutr*, 1989 (49) : 44–50.
- [25] Yoshioka K, Yoshida T, Kamanaru K, et al. Caffeine activates brown adipose tissue thermogenesis and metabolic rate in mice [J]. *J Nutr Sci Vitaminol*, 1990, 36 (2) : 173–178.
- [26] 杨丽聪, 郑国栋, 王纯荣. 咖啡碱与儿茶素组合对小鼠体重和脂类代谢的影响 [J]. *茶叶科学*, 2010, 30 (5) : 374–378.
- [27] 叶立生, 申向军. 咖啡因与运动能力研究进展 [J]. *体育科技*, 1993, 14 (4) : 34–39.
- [28] XU X Y, ZHAO C N, LI B Y, et al. Effects and mechanisms of tea on obesity [J]. *Crit Rev Food Sci*

- Nutr, 2023, 63 (19) : 3716–3733.
- [29] DU X, HUANG Q, GUAN Y, et al. Caffeine promotes conversion of palmitic acid to palmitoleic acid by inducing expression of fat-5 in *Caenorhabditis elegans* and *scd1* in mice [J]. *Front Pharmacol*, 2018 (9) : 321.
- [30] VAN DAM R M, HU F B, WILLETT W C. Coffee, caffeine, and health [J]. *N Engl J Med*, 2020, 383 (4) : 369–378.
- [31] DULLOO A G, DURET C, ROHRER D, et al. Efficacy of a green tea extract rich in catechin polyphenols and caffeine in increasing 24-h energy expenditure and fat oxidation in humans [J]. *Am J Clin Nutr*, 2000, 72 (5) : 1232–1234.
- [32] 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.
- [33] DÍAZ-GARCÍA J, GONZÁLEZ-PONCE I, PONCE BORDÓN J C, et al. Mental load and fatigue assessment instruments: a systematic review [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 19 (1) : 419.
- [34] HASKELL-RAMSAY C F, JACKSON P A, FORSTER J S, et al. The acute effects of caffeinated black coffee on cognition and mood in healthy young and older adults [J]. *Nutrients*, 2018, 10 (10) : 1386.
- [35] REED R A, MITCHELL E S, SAUNDERS C, et al. Acute low and moderate doses of a caffeine-free polyphenol-rich coffeeberry extract improve feelings of alertness and fatigue resulting from the performance of fatiguing cognitive tasks [J]. *Journal of Cognitive Enhancement*, 2019 (3) : 193–206.
- [36] WANG Z, QIU B, GAO J, et al. Effects of caffeine intake on endurance running performance and time to exhaustion: a systematic review and meta-analysis [J]. *Nutrients*, 2022, 15 (1) : 148.
- [37] WALL B T, MACHIN D, DUNLOP M V, et al. Caffeine ingestion stimulates plasma carnitine clearance in humans [J]. *Physiol Rep*, 2023, 11 (4) : e15615.
- [38] RUISHAN S, JUNYA S, JINGQIANG L, et al. Effects of caffeine ingestion on physiological indexes of human neuromuscular fatigue: A systematic review and meta-analysis [J]. *Brain and behavior*, 2022, 12 (4) : e2529.
- [39] VALENZUELA P L, ALEJO L B, MONTALVO-PÉREZ A, et al. Laboratory-based determinants of simulated time trial performance in cyclists [J]. *Biol Sport*, 2023, 40 (4) : 1169–1176.
- [40] CARVALHO A, MARTICORENA F M, GRECCO B H, et al. Can I Have My Coffee and Drink It A Systematic Review and Meta-analysis to Determine Whether Habitual Caffeine Consumption Affects the Ergogenic Effect of Caffeine [J]. *Sports Med*, 2022, 52 (9) : 2209–2220.
- [41] 秦启阳, 陈斌, 郭黎, 等. 咖啡因对耐力运动员运动表现的影响: 效果及机制 [J]. *体育科研*, 2024, 45 (1) : 93–103.
- [42] NAKAMURA D, TANABE Y, ARIMITSU T, et al. Low caffeine dose improves intermittent sprint performance in hot and humid environments [J]. *J Therm Biol*, 2020 (93) : 102698.
- [43] LING TAN P, POH LIM C, ONG S, et al. The Use of Caffeine Citrate for Respiratory Stimulation in Acquired Central Hypoventilation Syndrome: A Case Series [J]. *J Crit Care Med (Targu Mures)*, 2023, 9 (1) : 49–54.
- [44] FUJITA M, YONEKURA Y, NAKAYAMA K. The factors affecting implementing shared decision-making in clinical trials: a cross-sectional survey of clinical research coordinators' perceptions in Japan [J]. *BMC Med Inform Decis Mak*, 2023, 23 (1) : 39.
- [45] CALVO I A, GABRIELLI N, IGLESIAS-BAENA I, et al. Genome-wide screen of genes required for caffeine tolerance in fission yeast [J]. *Plos One*, 2009, 4 (8) : e6619.
- [46] LOUREIRO G M, FRANÇA L P J G, BOIKO H L F, et al. Caffeine and Exercise Performance: Possible Directions for Definitive Findings [J]. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2020 (2) : 2574854.
- [47] 刘光碧. 咖啡因所致心血管效应的性别差异 [J]. *心血管病学进展*, 2005 (1) : 106.
- [48] KAUFMAN M W, ROCHE M, FREDERICSON M. The Impact of Supplements on Sports Performance for the Trained Athlete: A Critical Analysis [J]. *Curr Sports Med Rep*, 2022, 21 (7) : 232–238.
- [49] YAMADA A K, PIMENTEL G D, PICKERING C, et al. Effect of caffeine on mitochondrial biogenesis in the skeletal muscle—A narrative review [J]. *Clin Nutr ESPEN*, 2022 (51) : 1–6.
- [50] ALMASHAQBEH W, ARDAH H, ALASMARI A, et al. The effect of caffeine intake and passive smoking on umbilical cord blood unit's quality parameters [J]. *Cell Tissue Bank*, 2024, 25 (2) : 541–547.
- [51] 武桂新. 运动员使用咖啡因对运动能力的影响

- [J]. 河南师范大学学报(自然版), 2011, 39(6): 164–167.
- [52] VICENTE-SALAR N, SANTOS-SÁNCHEZ G, ROCHE E. Nutritional Ergogenic Aids in Racquet Sports: A Systematic Review [J]. *Nutrients*, 2020, 12(9): 2842.
- [53] EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA), European Food Safety Authority (EFSA. Scientific opinion on the safety of caffeine [J]. *EFSA J*, 2015, 13(5): 4102.
- [54] BRANUM A M, ROSSEN L M, SCHOENDORF K C. Trends in caffeine intake among US children and adolescents [J]. *Pediatrics*, 2014, 133(3): 386–393.
- [55] MITCHELL D C, KNIGHT C A, HOCKENBERRY J, et al. Beverage caffeine intakes in the US [J]. *Food Chem Toxicol*, 2014, 63(1): 136.
- [56] FULGONI V, KEAST D R, LIEBERMAN H R. Usual caffeine intake of U. S. adults: an analysis of NHANES data from 2003–2008 [J]. *FASEB J*, 2011, 25(1): 350–357.
- [57] AHLUWALIA N, HERRICK K, MOSHFEGH A, et al. Caffeine intake in children in the United States and 10-y trends: 2001–2010 [J]. *Am J Clin Nutr*, 2014, 100(4): 1124–1132.

The Impact of Caffeine on Athletic Performance: Mechanisms, Applications, and Personalized Strategies from a Multidisciplinary Perspective

Hu Yangxian Wu Jiaxun Liu Yiming

College of Physical Education, Sichuan Agricultural University, Ya'an

Abstract: In recent years, the properties of caffeine in enhancing alertness and improving athletic performance have received extensive attention. Research indicates that caffeine influences athletic performance through multiple molecular pathways, including regulating energy metabolism, improving neural conduction, and reducing fatigue. Despite numerous studies confirming the effectiveness of caffeine, how athletes can personalize its use in training and competitions to achieve optimal performance remains a complex issue. This article aims to explore the potential of caffeine in sports nutrition by comprehensively analyzing existing literature, discussing its role as an important stimulant in athletic performance and its biological mechanisms, and proposing personalized strategies to help athletes more effectively utilize caffeine to enhance performance, providing new insights for the field of sports nutrition.

Key words: Caffeine; Sports nutrition; Molecular pathways; Sports performance; Athlete practice