DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260504001
引用格式: 杨春白雪, 关博骏, 仪淑敏, 等. 咖啡因对运动表现和心脑血管系统的影响及运动食品设计展望[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 151–161.
Yang Chunbaixue, Guan Bojun, Yi Shumin, et al. Effects of caffeine on exercise performance and the cardiovascular and cerebrovascular systems and future prospects for sports food design [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(15): 151–161. (in Chinese with English abstract).

咖啡因对运动表现和心脑血管系统的影响及运动食品设计展望

杨春白雪[1], 关博骏[2], 仪淑敏[2], 徐 杨[1], 朱英伟[1*]
(1. 渤海大学体育学院, 锦州 121013; 2. 渤海大学食品科学与工程学院, 锦州 121013)

摘 要: 咖啡因作为一种广泛存在于咖啡、茶、可乐型饮料和部分运动营养食品中的物质, 已经成为专业竞技运动人群常用的功能性成分之一。适量摄入咖啡因可以在一定的程度上改善运动员的耐力、间歇和部分力量项目等比赛的表现, 但其产生的交感兴奋、血压升高、睡眠干扰以及脑血流改变等效应也提示, 运动增效并不等同于心脑血管安全。当前, 传统含咖啡因的饮品中存在剂量波动较大、复配成分复杂和个体化不足等问题, 而专业的补剂虽在剂量精准上具备优势, 但其在食品属性、适口性和安全性等方面仍需进一步优化。因此, 如何平衡心脑血管风险控制与食品工程可行性在专业运动员在竞技运动方面的表现, 已成为咖啡因运动食品设计的重要问题。本文围绕咖啡因对运动人群心脑血管健康的影响, 分析了其吸收代谢规律、腺苷受体拮抗作用及对血流动力学、代谢内分泌和运动表现的生理机制, 综述了传统饮品、专业补剂及新型运动食品载体的应用特点和局限, 进一步讨论了未来咖啡因食品在个体化剂量推荐、食品载体缓释或靶向化, 以及针对不同运动需求与其他增能物质进行科学复配的未来发展方向, 旨在为咖啡因相关运动食品的功能开发、风险评估和科学剂量使用提供科学理论参考。

关键词: 咖啡因; 运动表现; 心脑血管健康; 运动食品; 运动营养; 食品设计
中图分类号: TS218 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)15–0151–11

Effects of caffeine on exercise performance and the cardiovascular and cerebrovascular systems and future prospects for sports food design

YANG Chun-Bai-Xue[1], GUAN Bo-Jun[2], YI Shu-Min[2], XU Yang[1], ZHU Ying-Wei[1*]
(1. *School of Physical Education*, *Bohai University*, *Jinzhou* 121013, *China*; 2. *College of Food Science and Engineering*, *Bohai University*, *Jinzhou* 121013, *China*)

ABSTRACT: Caffeine, a bioactive compound widely present in coffee, tea, cola-type beverages and some sports nutrition products, has become one of the most commonly used functional ingredients among competitive athletes.

收稿日期: 2026-05-04
第一作者: 杨春白雪(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为运动营养与健康促进。E-mail: 985057671@qq.com
***通信作者:** 朱英伟(1976—), 女, 教授, 主要研究方向为运动人体科学与健康促进。E-mail: zhuyingwei@qymail.bhu.edu.cn

Moderate caffeine intake can improve performance in endurance, intermittent and some strength-based events to a certain extent. However, its sympathoexcitatory effects, potential to increase blood pressure, disturb sleep and alter cerebral blood flow indicate that ergogenic benefits do not necessarily equate to cardiovascular and cerebrovascular safety. At present, traditional caffeinated beverages are limited by large variations in caffeine dose, complex co-formulated ingredients and insufficient individualization, whereas professional supplements offer greater dosing precision but still require further optimization in terms of food properties, palatability and safety. Therefore, balancing cardiovascular and cerebrovascular risk control with food-engineering feasibility and competitive performance needs has become an important issue in the design of caffeine-containing sports foods. This review focused on the effects of caffeine on cardiovascular and cerebrovascular health in physically active populations. It analysed caffeine absorption and metabolism, adenosine receptor antagonism, and the physiological mechanisms through which caffeine affects haemodynamics, metabolic and endocrine responses and exercise performance. It also summarized the application characteristics and limitations of traditional beverages, professional supplements and emerging sports-food delivery systems. Finally, this review discussed future directions for caffeine-containing foods, including individualized dose recommendations, sustained-release or targeted food carriers, and rational combinations with other ergogenic substances tailored to different sporting demands. These perspectives aim to provide a theoretical basis for the functional development, risk assessment and scientifically guided dosing of caffeine-related sports foods.

KEY WORDS: caffeine; exercise performance; cardiovascular and cerebrovascular health; sports food; sports nutrition; food design

0 引 言

咖啡因(1,3,7-三甲基黄嘌呤)是一类存在于植物和果实中的天然生物碱物质。随着现代饮食的更迭，咖啡因已成为人们日常膳食和运动补充中较常见的功能性成分[1–2]。按食品来源划分，咖啡因既包括天然咖啡因，也包括人工合成的咖啡因。天然咖啡因主要存在于咖啡树、茶树和可乐果等植物中；而人工合成的咖啡因，则因低成本和高稳定性被广泛应用于各式食品添加剂中。咖啡等传统食品载体的安全加工不仅取决于咖啡因含量，还与食品的原料处理、运输储存和食品添加剂的使用密切相关。已有研究指出，咖啡在加工过程中需要重点关注丙烯酰胺形成的与真菌毒素对其的污染，以及食品添加剂使用等安全问题，需要不断完善加工卫生规范，加强全过程质量检测控制[3]。

在咖啡因作用过程中(图 1)，咖啡因摄入人体后可与腺苷受体结合[4–5]，减弱腺苷对人体神经活动的抑制，并促进多巴胺、去甲肾上腺素、血清素和乙酰胆碱等兴奋神经递质的释放[6–7]。这种作用通常表现为人体的警觉性和注意力上涨，疲劳感和疼痛感知下降[8–9]。对专业竞技运动人群而言，摄入科学剂量的咖啡因可能有助于提高其在耐力、冲刺及肌肉力量上的指标[10–12]。但这一结果受细胞色素 P450 1A2 (cytochrome P450 1A2, *CYP1A2*)基因型、日常摄入习惯、运动类型、周边环境温度或身体状况等个体差异性因素影响，应谨慎解释其结果[10,13]。例如，CYP1A2 AA 型运动员可能更容易获得耐力收益，而慢代谢型的个体运动员改善效果并不明显[14–15]。一般认为当人体摄入量大于等于 9 mg/kg 体重或每日摄入总量大于 600~800 mg 时，不会额外带来运动能力提升，咖啡因的副作用会显著增加[5,16]。

目前专业竞技运动人群常见的补剂主要以胶囊、口香糖和能量饮料为主。为了使运动人群达到最佳的咖啡因摄入量，胶囊的形式更加精准可控，效果稳定但其吸收较慢，缺乏食品带来的满足感，并容易引起胃肠道不适[17–19]。口香糖形式通过口腔黏膜吸收，可快速达到血浆峰值(约 15~30 min)，适合赛前临时使用[18]。但口香糖中咖啡因的摄入量不够稳定，可能因咀嚼不充分导致剂量残留[5,20]。运动饮料不光可以提供咖啡因，也包括了碳水化合物、电解质等对运动有益成分。但运动人群摄入每瓶的咖啡因剂量不精准未按体重个性化。并且饮料中其他成分如牛磺酸、糖等与咖啡因的交互作用及长期安全性需要考虑[21–22]。因此，本文从咖啡因对运动人群的影响、心脑血管的作用机制和目前常见咖啡因食品进行介绍，以期为国内开展相关研究及未来咖啡因食品设计提供思路。

1 运动人群的特别考量：表现、风险与个性化策略

1.1 咖啡因在不同类型运动中的机制差异

咖啡因对竞技运动员的影响不能简单归结于摄入剂量。其作用需要取决于其在人体内的动力学过程。咖啡因经过人体口服后，被胃和小肠迅速吸收，在大约 30~120 min 内达到血浆峰浓度，并能较快地通过血脑屏障，来进入中

枢神经系统[23–24]。随后，咖啡因主要在肝脏经 CYP1A2 代谢，生成副黄嘌呤、可可碱和茶碱等代谢产物[24–25]。成人体内咖啡因的半衰期通常约为 3~6 h[26–27]，但该过程受 *CYP1A2* 基因型、习惯性摄入、性激素状态、睡眠、比赛时段及药物使用等综合因素的影响，可能会在运动员体内形成不同的血药浓度曲线和持续时间，甚至导致不良反应。对于专业竞技运动员而言，咖啡因补充策略应结合项目类型、比赛时间、既往摄入习惯和个体敏感性，而非依赖固定剂量。对于运动表现来说，咖啡因的运动增效与运动类型密切相关。已有研究表明，赛前摄入咖啡因(约 3~6 mg/kg，赛前 1 h)可以改善耐力运动表现，提高在跑步、骑行、游泳等耐力项目中约 2%~4%的比赛成绩[5]。相比之下，有氧间歇、高强度间歇及力量的比赛项目中，咖啡因增益幅度往往较小，且个体差异更明显[12,26]。团队球类等间歇运动也可能获益，但其效果通常低于传统耐力项目[24]。

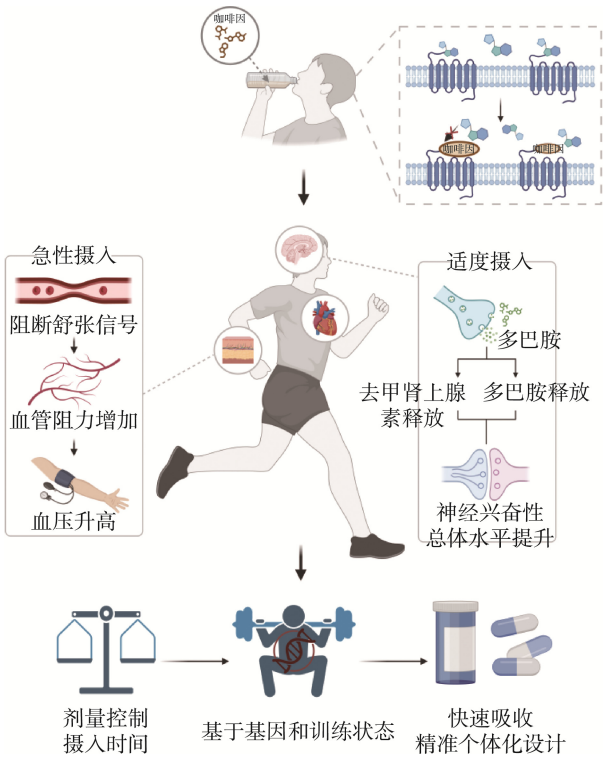


图 1　咖啡因作用过程图

Fig.1　Diagram of the process of caffeine action

在常用的运动营养剂量范围内，腺苷 A_1 和 A_2A 受体被认为是咖啡因最重要的作用靶点。腺苷通常参与中枢抑制、疲劳感形成和血管调节舒张；咖啡因作为非选择性腺苷受体拮抗剂，可阻断腺苷与受体结合，减缓其对神经递质释放的抑制作用。同时，多巴胺、去甲肾上腺素等兴奋性神经递质活动增强，促使运动员的警觉性提高，降低其主观用力感和疼痛感知。对于耐力项目而言，这种神经效应有助于延缓中枢性疲劳；对团队球类、格斗和技能主导型项目而言，注意力、反应速度和决策效率的改善同样具有重要的价值意义[28]。

咖啡因还可通过交感神经兴奋促进儿茶酚胺释放，并动员脂肪，影响底物的利用和代谢内分泌反应。早期观点认为，脂肪氧化的增加和肌糖原消耗的减少是耐力改善的表现[29]。但后续研究则提示，在常用剂量下，咖啡因的增效作用并不完全依赖于工作肌肉底物利用的改变，而是更倾向于中枢神经的调节贡献[30]。对于短时高强度或抗阻运动来说，外周神经肌肉机制可能也参与其中，它会使骨骼肌 Ca^{2+}的释放增加、兴奋-收缩耦联效率得到改善，提升运动单位的募集能力[8]。

专业竞技运动员由于长期处于高训练负荷和高交感的兴奋状态，其心率、血压、心输出量、外周血管阻力、脑血流调节等功能，都会受到项目特征、周期和赛事压力所影响。因此，咖啡因在提高竞技表现的同时，也可能通过交感神经兴奋、腺苷介导的血管舒张受阻和脑血流重新分配等途径，改变心脑血管系统负荷。基于此，咖啡因在专业竞技运动人群中的应用评价不应仅观察运动成绩、力竭时间或主观疲劳感，还应结合血压、心率、心电图、脑血流等指标，综合判断其运动增效效果对心脑血管负荷的影响[31–32]。

从现有证据来看，咖啡因对耐力运动的影响主要表现为延缓中枢神经疲劳、降低主观疲劳感和疼痛感；而团队球类和格斗类项目则更依赖于神经递质活动增强带来的警觉性和反应速度的提升。因此，不同运动干预方式的咖啡因剂量应综合考虑运动持续时间和能量供应特点，同时还要注意血压、心率、心脑血管等安全指标的变化，在维持咖啡因运动增效作用的同时，尽可能降低其伴随的心脑血管负荷。

1.2　运动表现提升与心脑血管负担的权衡

咖啡因有助于改善人体的运动能力，但会导致其交感兴奋效应的激增，并伴随心血管相关疾病风险。研究显示，摄入咖啡因后，超一半的观察结果报告了运动员收缩压、舒张压显著升高[33]。部分敏感个体还可能出现心悸、心律不齐等表现[34]。高剂量含咖啡因的能量饮料的摄入，已被报道与室性心律失常及校正 QT 间期(corrected QT interval，QTc)延长等心电异常相关[35]，这提示过量摄入咖啡因，会对心脏电生理稳定性造成潜在威胁。

咖啡因对脑血流的作用同样值得我们关注。由于其可诱导脑血管收缩的特性，在静息状态下，中等剂量的咖啡因摄入(如一杯含 250 mg 咖啡因的咖啡)也会导致大脑灰质区血流量下降约 20%~30%[36]。中枢神经兴奋有助于提高人体警觉和大脑注意力，但在长时间剧烈运动过程中，这种血流量的变化可能对脑供血调节带来不利影响。对于存在脑血管基础疾病或相关风险因素的运动人群来说，更需谨慎评估大剂量咖啡因所可能带来的急性脑灌注变化风险。

除过量咖啡因摄入导致的急性心脑血管反应外，长

期、重复使用咖啡因对训练适应的影响同样不容忽视。有研究发现, 若运动员在每次训练前均常规摄入咖啡因, 经过 6 周高强度训练后, 原本应降低的运动中收缩压反而显著升高, 同时双重乘积(心率×收缩压)下降这一有益适应也被阻断[37]。这提示, 习惯性训练前使用咖啡因, 可能会削弱运动训练对心血管系统的保护适应性。因此, 竞技运动员在利用咖啡因提升成绩时, 仍应密切关注和监测心血管指标的变化, 并依据个体健康状况控制摄入剂量及频率, 降低急性高血压、心律紊乱或脑供血不足的风险。

1.3 剂量、摄入方式与急慢性影响

咖啡因补充策略的制定, 需同时考虑剂量、摄入形式以及急性或长期摄入对风险效益的不同影响。目前普遍认可的有效剂量范围为 3~6 mg/kg[11]。在此范围内, 多数运动员可获得较明显的性能提升和较少的副作用[14]。但大于等于 9 mg/kg 的高剂量咖啡因会显著增加运动员焦虑、震颤和血压过度升高等不良反应, 其效果也低于中等剂量[14]。有研究认为, 2 mg/kg 甚至更低的咖啡因剂量同样可能产生一定的效果增益。例如力量训练中, 约 1.5 mg/kg 的咖啡因剂量可能是拮抗腺苷作用的最低有效剂量[26]。其原因可能在于, 小剂量摄入会产生更少的不良反应, 减少心悸、失眠等事件的发生[19]。

不同形式的剂量摄入可能导致不同的起效时间。无水咖啡因胶囊因剂量精确且成分单一, 常用于科研等标准化流程当中[38]。咖啡、浓茶、能量饮料大多被使用于真实运动场景, 但由于缺少标准化, 咖啡因的含量差异波动也较大。例如, 一杯浓缩咖啡的咖啡因含量可含 58.1~185.0 mg[21]; 部分预调饮料或补剂的实际咖啡因含量也可能与标示不完全一致[39]。相比之下, 含咖啡因口香糖和漱口液可经黏膜吸收, 起效更快, 适合赛前期更短的比赛项目[40]。值得注意的是, 急性和慢性效应效果需单独看待。单次摄入咖啡因可在无明显耐受时产生强兴奋作用, 而长期高频高剂量摄入可能会诱导机体耐受, 降低咖啡因的作用效果[41–42]。不过, 最新的一项 Meta 分析认为, 习惯性咖啡因摄入并不一定显著削弱急性运动的增效效果[21], 反而获得了较高的表现收益, 这可能与咖啡因的合理使用与标准化有关。对于长期备赛的运动员来说, 应尽量减少日常训练过程中服用咖啡因的频率, 减弱其对日常训练适应的干扰[37]。

1.4 个体化差异与调节因子

不同个体对咖啡因的反应差异明显。遗传、性别、年龄、睡眠状况和环境等因素, 均可能影响咖啡因的增效程度与不良反应风险。在遗传多态性方面, *CYP1A2* 和腺苷 A_2A 受体基因(adenosine A_2A receptor gene, *ADORA2A*)是目前研究较多的两个调节因子。*CYP1A2* 多态性主要影响咖啡因代谢速度。具有 *CYP1A2* AA 型, 即通常所称“快代谢者”的个体, 往往更易从咖啡因中获得耐力表现提升; 携带 C 等位基因者, 如 1F 型“慢代谢者”, 其效果则可能较弱。在长时间耐力项目中, 这种差异尤为明显。一些研究仅在快代谢型运动员中观察到显著表现改善, 而慢代谢型个体则明显无变化, 甚至表现略有下降[43]。不过, 也有研究未发现 *CYP1A2* 基因型对短时高强度任务或抗阻运动表现产生稳定影响, 提示该基因作用可能受运动类型、剂量和样本特征共同调节[10,43]。总体而言, *CYP1A2* 多态性仍被认为是影响咖啡因助运动效应个体差异的重要因素之一。制定补给方案时, 可将基因检测结果作为参考, 慢代谢型运动员可考虑适当降低剂量。

ADORA2A 基因编码腺苷 A_2A 受体, 其多态性主要影响个体对咖啡因中枢神经效应的敏感性。一项初步研究发现, 在耐力测试中, 携带 *ADORA2A* TT 基因型的女性摄入咖啡因后表现均有改善, 而携带 C 等位的基因者仅少数获益。这提示, 某些 *ADORA2A* 变异可能削弱咖啡因对运动表现的促进作用。由于现有的样本量较为有限, 该结论仍需更大规模的研究验证。副作用方面, *ADORA2A* 多态性与咖啡因诱发的焦虑和睡眠反应关系密切。*ADORA2A* TT 基因型者对咖啡因诱导的焦虑不安反应相对较轻, 而携带 C 等位基因者更易出现入睡困难和睡眠质量下降等问题[44]。因此, 对于已知 *ADORA2A* 敏感基因型, 如 CT 或 CC 型的运动员, 晚间比赛或夜间训练前应尽量避免摄入咖啡因, 以减少睡眠干扰。

性别与年龄也可能会影响咖啡因反应。现有研究总体认为, 男性与女性在咖啡因上获得的增益幅度大致相当[5], 青年人与老年人之间的效果差异也不显著[45]。但在生理反应层面, 仍存在一些细微差别。一项 Meta 分析研究发现, 摄入同等剂量的咖啡因, 男性运动员比女性有更显著的血压升高作用[46]。女性受雌激素影响, 其对咖啡因的代谢速率可能随月经周期和口服避孕药使用而变化, 但这种变化对运动表现的影响证据尚不充分。

睡眠状态是另一个重要的调节因素。对于赛前睡眠不足或存在时差疲劳的运动员, 咖啡因通常用来提神醒脑。适量摄入可在睡眠剥夺状态下部分恢复警觉性和认知功能, 维持机体的技术判断和动力输出[47]。但应避免在傍晚或夜间摄入, 这可能会扰乱正常的睡眠节律[8]。因此, 晚间比赛或训练后的咖啡因使用应更加谨慎, 以免影响赛后恢复。有研究表明, 运动员在约 35 ℃条件下摄入 6 mg/kg 咖啡因, 可使其耐力表现提升约 2%的同时提升核心体温[39]。但在更炎热的环境中, 5 mg/kg 咖啡因却加重了热应激负担[48]。在高海拔低氧环境中, 咖啡因则可能改善困倦和耐力下降, 相关共识建议可酌情使用 4~6 mg/kg, 以对抗缺氧造成的不利影响[31]。因此, 咖啡因的个体化应用需要综合考虑遗传、睡眠状态、环境和比赛等因素, 而非依据单一基因型或固定剂量进行粗略判断, 在安全范围内发挥其运动营养价值。

1.5 专业补剂

专业咖啡因补剂的主要价值在于剂量的控制更加容易, 并且可以对起效时间进行大致预测。相较于普通饮品

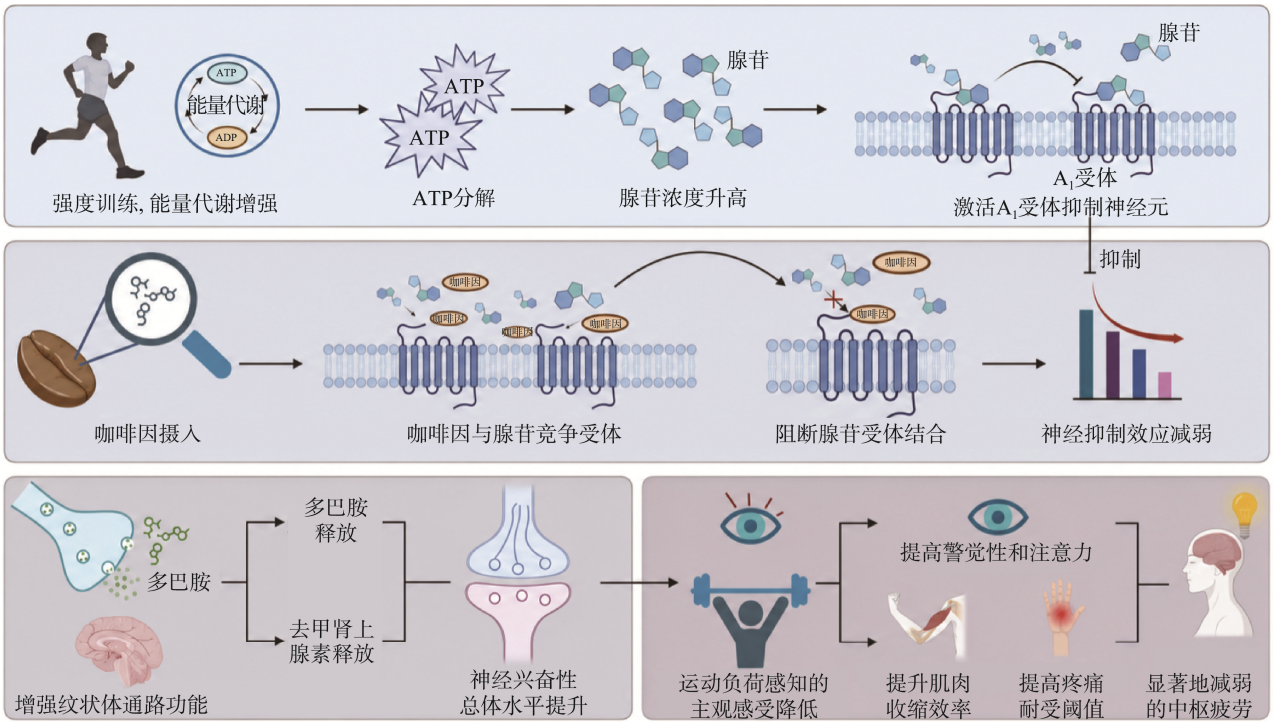
来说，这类补剂可能更适合那些需要明确剂量的竞技运动人群[18]。目前，常见的补剂形式主要包括胶囊、片剂、口香糖、漱口液、凝胶和喷雾等[17]，而不同类型的补剂，其主要差异集中在吸收和便捷性上。咖啡因胶囊一般在摄入后约 60 min 达到血浆峰值，作用持续时间较长，因而更适用于赛前已有明确补充安排的项目[49]。相比之下，含咖啡因的口香糖和漱口水可通过口腔黏膜吸收，部分绕过首过效应，并在 10~15 min 内起效，这种类型的补给更加适合赛中临时需要提神，或者需要短时间反应的运动[50]。现有研究表明，在计时赛类耐力运动中，低剂量的咖啡因胶囊(约 3 mg/kg)对缩短完成时间和提升平均输出功率十分有效，其表现甚至优于中剂量胶囊或口香糖[17]。国际运动营养学会建议，咖啡因的推荐摄入剂量为 3~6 mg/kg 体重，并于赛前 60 min 使用[5]。超过该剂量则会导致运动员在赛后出现失眠、焦虑、胃肠道不适等不良反应[33]。并且，由于咖啡因的半衰期通常在 3~6 h 左右，晚间训练时运动员更应注意咖啡因的摄入量，应尽量避免过度摄入从而影响赛后恢复[24–25]。因此，专业补给的使用应以低剂量为起点，根据运动员反应逐步提升，以寻求运动成绩和赛后状态恢复的最佳平衡点[31]。

2　膳食咖啡因影响心脑血管的生理机制

2.1　腺苷受体拮抗

腺苷是一种内源性神经调制物和血管调节因子[31]。在中枢神经系统中，腺苷可通过激活突触前和突触后的 A_1 受体，抑制兴奋性神经递质释放[51]。这种抑制会降低人体警觉性，提升主观疲劳感，进而导致中枢神经疲劳的形成[52]。长时间或高强度运动时，机体细胞能量代谢加快，三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)分解增强，ATP 代谢产生的腺苷水平也随之上升[31]。如图 2 所示，腺苷浓度上升后，其对中枢神经活动和外周血管舒张的调节作用也更加明显。

咖啡因的化学结构与腺苷极为相似。因此，在运动前摄入一定剂量咖啡因，会导致其与内源性腺苷竞争 A_1 和 A_2A 受体。咖啡因与这些受体结合后并不激活相应的受体反应，而是阻断腺苷与受体结合。腺苷在中枢产生的神经抑制效应以及在外周产生的血管舒张信号被削弱，疲惫感也随之下降[11,53]。当突触前 A_1 受体介导的抑制作用减弱后，神经元的活动受限也相应减少[54]，多巴胺、去甲肾上腺素等兴奋性神经递质释放增加[52]。咖啡因对 A_2A 受体的拮抗作用也可间接增强多巴胺通路功能[55]。这些神经化学变化共同提高了警觉性，使注意力更加集中[2]。腺苷抑制作用被减弱后，运动员在相同强度下会感觉更加轻松[8]。这是由于中枢兴奋性的提高，会改善运动单位募集和放电同步性，进而影响肌肉收缩效率与力量输出[52]。咖啡因也具有一定的镇痛作用，能降低运动所带来的不适感和肌肉疼痛，提高疼痛耐受阈值[31]。多巴胺和去甲肾上腺素被激活增强后，运动员的注意力、积极性和反应水平等均可以得到改善，这对团队运动、技能类项目以及长时间的耐力训练均具有重要意义[9]。



注: ADP 为二磷酸腺苷(adenosine diphosphate)。

图 2　腺苷受体拮抗的核心通路

Fig.2　Core pathways of adenosine receptor antagonism

2.2 对血流动力学的急性影响

咖啡因对血管系统的调节具有显著的部位差异，腺苷对冠状动脉、脑血管和部分外周血管具有舒张作用，其含量积累有助于增加相应器官的血流量，以满足局部代谢需求[56]。如图 3 所示，人体在急性摄入咖啡因后运动时，咖啡因通过拮抗脑血管平滑肌的 A_2A 和 A_2B 受体，阻断了腺苷介导的生理性血管舒张，从而诱发脑血流量显著减少，可达 20%~30%[42,57]。运动状态下，皮肤血管扩张是散热的主要途径，而咖啡因造成的人体血管收缩效应会显著抑制皮肤下的血流量。有研究表明，高温下运动时，咖啡因可使皮肤血流量减少约 0.63 L/min。这种作用削弱了人体的散热能力，加速了核心体温升高，增加热衰竭及中暑的风险[36]。在外周血管系统中，咖啡因同样通过拮抗 A_2A 受体引发全身血管阻力升高。在多项研究显示，急性摄入 3~6 mg/kg 体重的咖啡因时，可显著提高静息及运动状态下的血压水平[42,56,58]。同时，咖啡因摄入后刺激中枢交感神经系统，促使肾上腺素和去甲肾上腺素释放[59]。有研究指出，咖啡因的升压效应并非源于心肌收缩力或心输出量增加，而主要由全身血管阻力升高所致。这使得心脏每搏做功增加，心率可能因血压升高而反射性减慢[56]。这种效应给运动人群带来效益的同时，会损害了冠状动脉在运动中的血流储备。由于咖啡因拮抗了腺苷扩张冠状动脉以增加血流量的机制，这对冠心病患者是明确的负面效应[60]。对于健康运动员，尤其是代谢较慢的个体，也可能构成潜在风险，并可能是其运动表现不升反降的原因之一。并且过量的使用咖啡因可引起普遍的脑血管收缩[55]。摄入 250 mg 咖啡因可使大脑灰质血流量平均减少约 27%。这可能导致大脑在面对血流需求增加时，大脑的剧烈运动与思考并行的调节能力受限[29]。

2.3 代谢与内分泌效应

咖啡因的摄入可以促进脂肪氧化、改变能量底物利用，但其对工作肌肉的直接作用目前存在一些争议[5]。一些研究证实摄入常见剂量咖啡因(3~6 mg/kg)后，在休息和低中强度运动(<60~80% VO_{2max})中，通过拮抗脂肪细胞的腺苷 A_1 受体，直接激活激素敏感脂肪酶，抑制磷酸二酯酶，增加了细胞内环磷酸腺苷(cyclic adenosine monophosphate, cAMP)水平[61–62]。同时刺激儿茶酚胺(如肾上腺素)分泌，通过 β-肾上腺素受体通路激活脂肪分解[63]，造成了血浆游离脂肪酸和甘油浓度显著升高；呼吸交换率降低，表明身体脂肪氧化比例增加；肌糖原消耗减少，运动至力竭时间延长[5,45,61]。在传统观点中认为这些机制节省了工作肌肉的糖原，是其提升耐力的核心的关键[64]。但有研究指出，摄入 6 mg/kg 咖啡因后，虽然血浆中的游离脂肪酸(free fatty acid, FFA)升高，但受监测的运动腿部肌肉本身的碳水化合物和脂肪代谢速率变化较小[46]。咖啡因在脂肪中的作用可能主要来自不运动的脂肪组织和肝脏，而提升运动表现的核心机制有可能是中枢神经系统效应，而非直接改变工作肌肉的能源选择[63]。

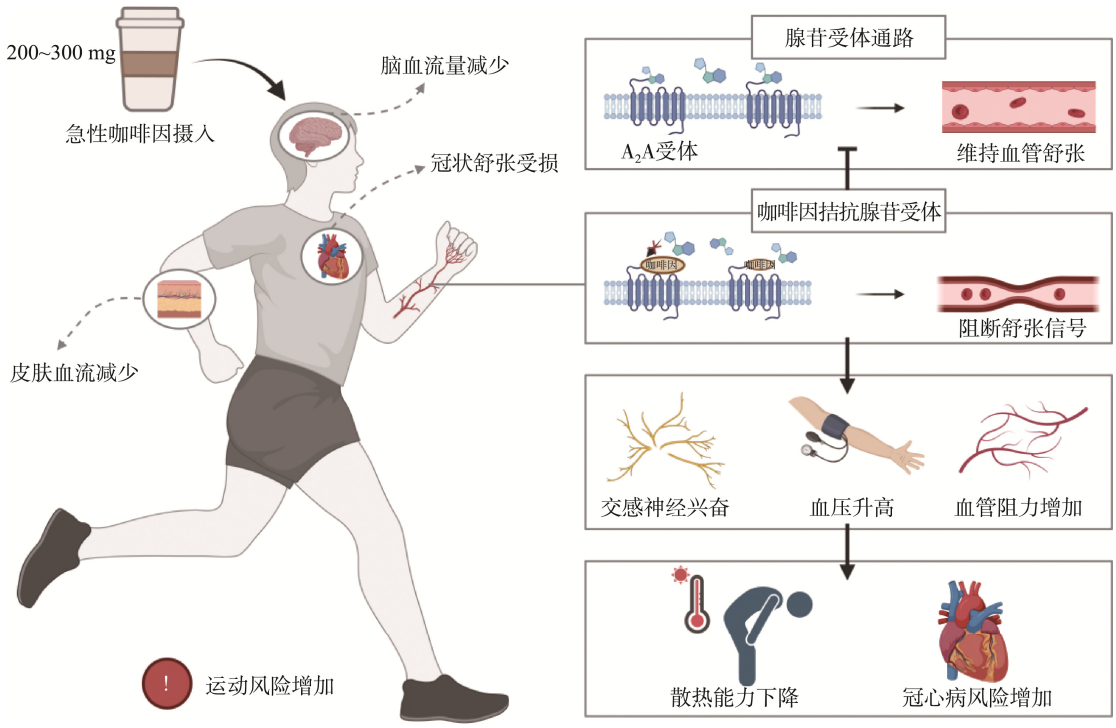


图 3 对血流动力学的急性影响

Fig.3 Acute effects on hemodynamics

3　传统咖啡因饮品与未来食品设计

3.1　传统饮品

咖啡、茶和能量饮料等是运动员摄入咖啡因最常见来源。与标准化的补剂相比, 这些饮品更易获得, 符合日常的饮食习惯, 但在竞技运动场景中存在明显局限。其原料配比和加工方式会导致, 不同饮品之间的咖啡因含量及其他成分差异较大[5,13]。例如, 一杯 240 mL 冲泡咖啡中的咖啡因含量在 58 mg 至 259 mg, 红茶约为 47 mg, 能量饮料则通常为 80~300 mg[62,65]。这种波动使运动员难以准确估算其实际摄入量, 造成预期效果未达标或诱发心悸、失眠和血压升高等风险疾病[31]。

运动饮料中成分相对复杂, 咖啡中的绿原酸、茶中的茶多酚、以及能量饮料中的糖分和牛磺酸, 均可能导致饮料中咖啡因在吸收、代谢或心血管反应中产生相互影响[5], 不同咖啡因饮料中成分的差异会影响其起效速度和反应强度。有研究认为, 酸性物质和多酚类成分可能轻微延缓咖啡因吸收, 长期习惯性饮用还会增加咖啡因耐受性[66]。对于经常饮用咖啡的运动员来说, 腺苷受体可能发生上调, 需要提高剂量才能获得相同的作用效果[67]。在重要比赛前采用 4~7 d 的戒断, 可以恢复身体对咖啡因的敏感性, 否则可能诱发头痛、疲劳等戒断症状, 影响赛前状态[48]。因此, 依赖传统饮品进行赛前咖啡因补充, 会使剂量设计和管理变得更加复杂。

咖啡因饮料同时作为具有社交属性的饮品, 可为部分运动员提供赛前安定感, 调节运动员的情绪[13]。能量饮料同时含有碳水化合物和咖啡因, 能够在长时间的耐力运动中兼顾能量供应和中枢神经刺激[9]。但高糖摄入可能诱发胃肠道不适, 糖分、牛磺酸与咖啡因的叠加也可能增强心率和血压反应[33]。在团队运动或技能主导型比赛项目中, 含咖啡因的能量饮料可以改善冲刺跑距离, 提升跳跃高度和认知功能, 但也可能造成能量供给波动, 并增加运动后疲劳[68–69]。因此, 为运动员制定个体化咖啡因补充策略时, 应综合考虑饮品的来源、剂量和健康风险等因素, 降低错误使用导致的风险。不同咖啡因载体在常见规格、咖啡因含量(每份)、主要优缺点方面的比较见表 1。

3.2　针对运动人群的未来咖啡因食品设计

未来咖啡因食品的开发, 应转向精准化和场景化设计, 以更好适配不同运动项目的需求[67]。

3.2.1　基于基因型与代谢表型的个性化剂量控制

个体化剂量推荐将是重要方向。基因检测结果、代谢表型以及日常咖啡因摄入习惯, 可共同用于评估运动员对咖啡因的反应强度和不良反应风险[52,77]。在此基础之上, 产品就可以根据不同类型提供具体的剂量区间和使用建议, 而非单一固定剂量。根据 *CYP1A2* 和 *ADORA2A* 等基因不同, 将消费者分为快速代谢型、慢速代谢型和中等代谢型。

表 1　不同咖啡因载体中咖啡因含量及其特点

Table 1　Caffeine content and characteristics of different caffeine carriers

载体类别	代表形式	常见规格(每份)	咖啡因含量(每份)	主要优点	主要不足/局限	参考文献
传统饮品	冲煮咖啡	1 杯(约 240 mL)	平均约 80 mg/杯; 不同制备条件下波动明显, 部分单份可大于 200 mg	易获得, 社会接受度高	标准化差, 受豆种、萃取方式和杯量影响大	[70–71]
传统饮品	红茶/黑茶	6~8 oz(约 180~240 mL)	约 14~61 mg/份; 平均约 29 mg/杯	刺激较温和, 适合作为低剂量来源	受浸泡时间与茶叶种类影响明显	[70,72]
传统饮品	含咖啡因碳酸饮料	1 份(产品依赖)	约 0~48.2 mg/份	适口性较好, 获取方便	咖啡因通常较低, 且常伴糖负荷	[73]
能量饮料	能量饮料	1 罐/1 零售单位	分析研究约 0~141.1 mg/份零售单位总体可达 10~300 mg/单位	即饮便携, 适用于赛前快速摄入	产品间差异大, 常与其他刺激性成分并存	[74]
能量补充	能量 shot	1 shot	研究中示例为 80 mg/shot 或 140 mg/shot	体积小, 摄入迅速	单位体积咖啡因密度高, 易低估总摄入	[75]
专业补剂	咖啡因胶囊/片剂	1 粒/片	产品依赖; 研究中常见绝对剂量约 200 mg 或相对剂量约 3 mg/kg	剂量精确, 便于标准化和科研使用	起效主要依赖胃肠吸收, 个体差异仍存在	[18]
快速递送	咖啡因口香糖	1~2 片或研究设定剂量	产品依赖; 研究中常见约 200 mg 或约 3 mg/kg	吸收较快, 适合赛前短时应用	品牌差异较大, 标准化弱于胶囊	[18,76]

针对不同的基因型开发不同的模块化咖啡粉，通过混合比例调整实现精准的产品剂量。同时，咖啡因进入人体代谢循环后，CYP1A2 酶代谢产生副黄嘌呤，占据咖啡因代谢产物的大多数，也是发挥兴奋作用的主要活性物质[5,31]。研究表明，副黄嘌呤的急性毒性显著低于咖啡因，且在体外实验中对肝细胞的细胞毒性最小，CYP1A2 慢代谢型人群对咖啡因转化为副黄嘌呤的效率较低，导致咖啡因积累功效减弱[78–80]。可通过提取副黄嘌呤作为食品成分，绕过个体的代谢平静，获得稳定安全的效果。在咖啡烘焙和生豆加工中，可通过烘焙程度控制，冷萃工艺等优化咖啡因的加工工艺，对剂量和风味进行微调[81]。

3.2.2 递送系统与复合配方设计

为减少极性咖啡因摄入导致的血压升高，脑血流锐减以及皮肤散热下降等风险，并延长咖啡因的有效作用适配长时间项目，未来食品载体可采用多层微胶囊、脂质体、乳液形成复合物载体，实现精准释放和多重作用[82–84]。可采用淀粉或壳聚糖等作为壁材制备咖啡因微胶囊，通过调控壁材厚度、交联度等，制备在 30 min 快速释放、60 min 后缓释的咖啡因载体。将其制备成咀嚼片或填充于能量胶中，避免因急性摄入导致的运动风险[85–88]。同时维持整个运动周期内的稳定中枢神经兴奋与疲劳延缓效果。咖啡因可与其他增能物质进行科学复配，以满足不同类型运动的需求。有研究表明，咖啡因与 β-丙氨酸及硝酸盐的复合配方，能够有效对抗中枢疲劳、缓解代谢酸化并改善氧利用效率，从而增加人体耐力[76]。咖啡因与肌酸、聚葡萄糖的复合配方在部分研究中显示出提升跳跃与冲刺表现的潜力[77]。咖啡因与 *L*-茶氨酸、磷脂酰丝氨酸的复配形式，则适用于射击、电竞、球类等需要高精度决策功能的运动项目[52]。

3.2.3 口感风味改良技术

传统咖啡因载体多重视运动表现，而造成口感上酸涩感，回味泛苦，影响了摄入体验[89]。利用乳液和脂质体可将咖啡因溶解于水相中，经油相二次乳化后制成乳液，可显著降低咖啡因与口腔中苦味受体的直接接触[90–91]。利用 β-环糊精能够将咖啡因包入疏水空腔，提到苦味阈值[92]。通过喷雾干燥或冷冻干燥制备包合物粉末，可直接用于压片、口溶膜或饮料基底。利用乳清蛋白、多酚等形成非共价复合物用于包裹咖啡因，在降低苦味的同时增加抗氧化活性[93–94]。此外，已有研究采用淀粉基材料(如多孔淀粉、V 型结晶淀粉)对咖啡因进行微胶囊化处理，通过物理吸附与包埋作用，控制咖啡因在口腔中的释放速率，从而实现苦味的有效抑制[95]。在运动状态下，运动员唾液分泌减少，口腔敏感度增加，可加入黄原胶、交联淀粉等制备膜片，减少食用过程中粘连[96–98]。同时引用薄荷醇、柠檬酸、苹果酸等中和苦味，增加果味感知[99]。在产品设计中，可采用3D食品打印技术，通过设计多孔结构，在减少剂量等的同时还可保持体积感[100]。

4 结束语

咖啡因在运动场景中具有较明确的促表现潜力，但这种增效作用并不等同于绝对安全。其生理效应不仅表现为中枢兴奋和疲劳感下降，还涉及脑血流、血压调节、外周血管阻力及代谢内分泌反应的变化，因此在高剂量摄入、夜间比赛、高温或低氧环境以及存在基础心血管风险的人群中应更加谨慎。与此同时，不同咖啡因载体并非只是摄入形式不同，而是直接关系到剂量精准性、吸收速度、安全边界及运动情境适配性。专业补剂更适合标准化和个体化管理，传统饮品虽具有日常化和便利性优势，但咖啡因含量波动较大，且常伴随糖、牛磺酸等共存成分，增加了实际应用中的不确定性。未来研究与应用应进一步从运动营养食品和功能食品设计角度推进咖啡因产品开发，重点围绕精准剂量标示、分阶段或缓释递送、低糖与电解质协同、风味优化及个体化复配等方向进行改进，并加强对血压、心电、脑血流和睡眠等结局的系统监测。只有在兼顾运动表现、心脑血管安全与食品工程可行性的前提下，咖啡因相关食品才能更好地服务于运动人群的实际需求。

参考文献

[1] Heckman M A, Weil J, De Mejia E G. Caffeine (1,3,7-trimethylxanthine) in foods: a comprehensive review on consumption, functionality, safety, and regulatory matters [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(3): R77–R87.

[2] 中国食品科学技术学会. 咖啡因的科学共识[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6): 498–504.
Chinese Institute of Food Science and Technology. Scientific consensus on caffeine [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6): 498–504.

[3] 鲁燕骅, 张雪媛, 赵昱, 等. 咖啡加工卫生规范标准制定的研究和建议[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 296–301.
Lu Yanhua, Zhang Xueyuan, Zhao Yu, et al. Research and suggestions on the establishment of hygiene standards for coffee processing [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 296–301.

[4] Fredholm B B. Adenosine, adenosine receptors and the actions of caffeine [J]. Pharmacology & Toxicology, 1995, 76(2): 93–101.

[5] Guest N S, VanDusseldorp T A, Nelson M T, et al. International society of sports nutrition position stand: caffeine and exercise performance [J]. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2021, 18(1): 1.

[6] Davis J K, Green J M. Caffeine and anaerobic performance: ergogenic value and mechanisms of action [J]. Sports Medicine, 2009, 39(10): 813–832.

[7] Koppelstaetter F, Poeppel T D, Siedentopf C M, et al. Caffeine and cognition in functional magnetic resonance imaging [J]. Journal of Alzheimer's Disease, 2010, 20(Suppl 1): S71–S84.

[8] Doherty M, Smith P M. Effects of caffeine ingestion on rating of perceived exertion during and after exercise: a meta-analysis [J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2005, 15(2): 69–78.

[9] Diaz-Lara J, Nieto-Acevedo R, Abian-Vicen J, et al. Can caffeine change

the game effects of acute caffeine intake on specific performance in intermittent sports during competition: a systematic review and meta-analysis [J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2024, 19(11): 1180–1196.

[10] Grgic J, Pickering C, Del Coso J, et al. CYP1A2 genotype and acute ergogenic effects of caffeine intake on exercise performance: a systematic review [J]. European Journal of Nutrition, 2021, 60(3): 1181–1195.

[11] 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.

[12] Salinero J J, Lara B, Del Coso J. Effects of acute ingestion of caffeine on team sports performance: a systematic review and meta-analysis [J]. Research in Sports Medicine, 2019, 27(2): 238–256.

[13] Pickering C, Grgic J. Caffeine and exercise: what next [J]. Sports Medicine, 2019, 49(7): 1007–1030.

[14] 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.

[15] Womack C J, Saunders M J, Bechtel M K, et al. The influence of a CYP1A2 polymorphism on the ergogenic effects of caffeine [J]. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2012, 9(1): 7.

[16] Irwin C, Khalesi S, Desbrow B, et al. Effects of acute caffeine consumption following sleep loss on cognitive, physical, occupational and driving performance: a systematic review and meta-analysis [J]. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 2020, 108: 877–888.

[17] Xue Ruiguo, Huang Jin, Chen Bin, et al. Effects of caffeine dose and administration method on time-trial performance: a systematic review and network meta-analysis [J]. Nutrients, 2025, 17(23): 3792.

[18] Wickham K A, Spriet L L. Administration of caffeine in alternate forms [J]. Sports Medicine, 2018, 48(1): 79–91.

[19] Lynn A, Shaw C, Sorsby A C, et al. Caffeine gum improves 5 km running performance in recreational runners completing parkrun events [J]. European Journal of Nutrition, 2024, 63(4): 1283–1291.

[20] Spriet L L. Exercise and sport performance with low doses of caffeine [J]. Sports Medicine, 2014, 44(2): 175–184.

[21] Maughan R J, Burke L M, Dvorak J, et al. IOC consensus statement: dietary supplements and the high-performance athlete [J]. International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism, 2018, 28(2): 104–125.

[22] Grasser E K, Miles-Chan J L, Charrière N, et al. Energy drinks and their impact on the cardiovascular system: potential mechanisms [J]. Advances in Nutrition, 2016, 7(5): 950–960.

[23] White J R J, Padowski J M, Zhong Yili, et al. Pharmacokinetic analysis and comparison of caffeine administered rapidly or slowly in coffee chilled or hot versus chilled energy drink in healthy young adults [J]. Clinical Toxicology, 2016, 54(4): 308–312.

[24] Arnaud M J. Pharmacokinetics and metabolism of natural methylxanthines in animal and man [M]. Methylxanthines. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 33–91.

[25] Nehlig A. Interindividual differences in caffeine metabolism and factors driving caffeine consumption [J]. Pharmacological Reviews, 2018, 70(2): 384–411.

[26] Grgic J. Effects of caffeine on resistance exercise: a review of recent research [J]. Sports Medicine, 2021, 51(11): 2281–2298.

[27] Delleli S, Ouergui I, Messaoudi H, et al. Acute effects of caffeine supplementation on physical performance, physiological responses, perceived exertion, and technical-tactical skills in combat sports: a systematic review and meta-analysis [J]. Nutrients, 2022, 14(14): 2996.

[28] Mandato J, Kola R, Tyson T, et al. The effects of energy drinks on the cardiovascular system: a systematic review [J]. Current Cardiology Reports, 2025, 27(1): 156.

[29] Addicott M A, Yang L L, Peiffer A M, et al. The effect of daily caffeine use on cerebral blood flow: how much caffeine can we tolerate [J]. Human Brain Mapping, 2009, 30(10): 3102–3114.

[30] West K S, Helwig N J, Schwager L E, et al. Habitual preexercise caffeine supplementation prevents exercise training-induced attenuation of exercising systolic blood pressure and double product [J]. Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md, 2025, 138(2): 358–365.

[31] Silva H, Del Coso J, Pickering C. Caffeine and sports performance: the conflict between caffeine intake to enhance performance and avoiding caffeine to ensure sleep quality [J]. Sports Medicine, 2025, 55(7): 1579–1592.

[32] 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 Medicine, 2022, 52(9): 2209–2220.

[33] De Souza J G, Del Coso J, Fonseca F D S, et al. Risk or benefit side effects of caffeine supplementation in sport: a systematic review [J]. European Journal of Nutrition, 2022, 61(8): 3823–3834.

[34] Ali Abbas-Hashemi S, Hosseininasab D, Rastgoo S, et al. The effects of caffeine supplementation on blood pressure in adults: a systematic review and dose-response meta-analysis [J]. Clinical Nutrition ESPEN, 2023, 58: 165–177.

[35] Naulleau C, Jeker D, Pancrate T, et al. Effect of pre-exercise caffeine intake on endurance performance and core temperature regulation during exercise in the heat: a systematic review with meta-analysis [J]. Sports Medicine, 2022, 52(10): 2431–2445.

[36] John K, Kathuria S, Peel J, et al. Caffeine ingestion compromises thermoregulation and does not improve cycling time to exhaustion in the heat amongst males [J]. European Journal of Applied Physiology, 2024, 124(8): 2489–2502.

[37] Grgic J, Grgic I, Pickering C, et al. Wake up and smell the coffee: caffeine supplementation and exercise performance-an umbrella review of 21 published meta-analyses [J]. British Journal of Sports Medicine, 2020, 54(11): 681–688.

[38] Aguilar-Navarro M, Muñoz G, Salinero J J, et al. Urine caffeine concentration in doping control samples from 2004 to 2015 [J]. Nutrients, 2019, 11(2): 286.

[39] Shah S A, Szeto A H, Farewell R, et al. Impact of high volume energy drink consumption on electrocardiographic and blood pressure parameters: a randomized trial [J]. Journal of the American Heart Association, 2019, 8(11): e011318.

[40] Caldeira D, Martins C, Alves L B, et al. Caffeine does not increase the risk of atrial fibrillation: a systematic review and meta-analysis of observational studies [J]. Heart, 2013, 99(19): 1383–1389.

[41] Debrah K, Haigh R, Sherwin R, et al. Effect of acute and chronic caffeine

use on the cerebrovascular, cardiovascular and hormonal responses to orthostasis in healthy volunteers [J]. Clinical Science (London, England, 1995, 89(5): 475–480.

[42] Shepley B R, Milne K J, Bain A R. Caffeine in cerebrovascular research: to withdraw or not to withdraw [J]. Experimental Physiology, 2026, 111(2): 335–339.

[43] Tallis J, Yavuz H C M. The effects of low and moderate doses of caffeine supplementation on upper and lower body maximal voluntary concentric and eccentric muscle force [J]. Physiologie Appliquee, Nutrition et Metabolisme, 2018, 43(3): 274–281.

[44] Astorino T A, Roberson D W. Efficacy of acute caffeine ingestion for short-term high-intensity exercise performance: a systematic review [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2010, 24(1): 257–265.

[45] 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.

[46] Graham T E, Helge J W, MacLean D A, et al. Caffeine ingestion does not alter carbohydrate or fat metabolism in human skeletal muscle during exercise [J]. The Journal of Physiology, 2000, 529(Pt3): 837–847.

[47] Bell D G, McLellan T M. Exercise endurance 1,3, and 6 h after caffeine ingestion in caffeine users and nonusers [J]. Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md, 2002, 93(4): 1227–1234.

[48] Ganio M S, Klau J F, Casa D J, et al. Effect of caffeine on sport-specific endurance performance: a systematic review [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2009, 23(1): 315–324.

[49] Sökmen B, Armstrong L E, Kraemer W J, et al. Caffeine use in sports: considerations for the athlete [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2008, 22(3): 978–986.

[50] Tallis J, Guimaraes-Ferreira L, Clarke N D. Not another caffeine effect on sports performance study-nothing new or more to do [J]. Nutrients, 2022, 14(21): 4696.

[51] Gaspar C, Rocha C, Balteiro J, et al. Effects of caffeine on cerebral blood flow [J]. Nutrition, 2024, 117: 112217.

[52] 娄丽. 咖啡因摄入对脑力疲劳篮球运动员运动表现的影响研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2025: 1.
Lou Li. Study on the influence of caffeine intake on the sports performance of basketball players with mental fatigue [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2025: 1.

[53] Kennedy D O, Wightman E L. Mental performance and sport: caffeine and co-consumed bioactive ingredients [J]. Sports Medicine, 2022, 52(1): 69–90.

[54] Jones G. Caffeine and other sympathomimetic stimulants: modes of action and effects on sports performance [J]. Essays in Biochemistry, 2008, 44: 109–123.

[55] Correa M, SanMiguel N, López-Cruz L, et al. Caffeine modulates food intake depending on the context that gives access to food: comparison with dopamine depletion [J]. Frontiers in Psychiatry, 2018, 9: 411.

[56] Echeverri D, Montes F R, Cabrera M, et al. Caffeine's vascular mechanisms of action [J]. International Journal of Vascular Medicine, 2010, 2010: 834060.

[57] Pelligrino D A, Xu Haoliang, Vetri F. Caffeine and the control of cerebral hemodynamics [J]. Journal of Alzheimer's Disease, 2010, 20(s1): S51–S62.

[58] Pincomb G A, Lovallo W R, Passey R B, et al. Effects of caffeine on vascular resistance, cardiac output and myocardial contractility in young men [J]. The American Journal of Cardiology, 1985, 56(1): 119–122.

[59] Smits P A B M. Coffee and blood pressure: a pharmacological study on the circulatory effects of coffee and caffeine [D]. Nijmegen: Catholic University Nijmegen, 1986: 1.

[60] Voskoboinik A, Koh Y, Kistler P M. Cardiovascular effects of caffeinated beverages [J]. Trends in Cardiovascular Medicine, 2019, 29(6): 345–350.

[61] Ryu S, Choi S K, Joung S S, et al. Caffeine as a lipolytic food component increases endurance performance in rats and athletes [J]. Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 2001, 47(2): 139–146.

[62] Tarnopolsky M A. Caffeine and creatine use in sport [J]. Annals of Nutrition & Metabolism, 2010, 57(Suppl 2): 1–8.

[63] Stuart G R, Hopkins W G, Cook C, et al. Multiple effects of caffeine on simulated high-intensity team-sport performance [J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2005, 37(11): 1998–2005.

[64] Davis J M, Zhao Zuowei, 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.

[65] 宫郁郁, 房彦军. 咖啡因在军用食品中的应用及展望[J]. 解放军预防医学杂志, 2020, 38(9): 142–145.
Gong Yuyu, Fang Yanjun. Application and prospect of caffeine in military food [J]. Journal of Preventive Medicine of Chinese PLA, 2020, 38(9): 142–145.

[66] Nehlig A, Debry G. Caffeine and sports activity: a review [J]. International Journal of Sports Medicine, 1994, 15(5): 215–223.

[67] Pickering C, Kiely J. Are the current guidelines on caffeine use in sport optimal for everyone inter-individual variation in caffeine ergogenicity, and a move towards personalised sports nutrition [J]. Sports Medicine, 2018, 48(1): 7–16.

[68] Muñoz A, López-Samanes Á, Pérez-López A, et al. Effects of caffeine ingestion on physical performance in elite women handball players: a randomized, controlled study [J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2020, 15(10): 1406–1413.

[69] Lara B, Gonzalez-Millán C, Salinero J J, et al. Caffeine-containing energy drink improves physical performance in female soccer players [J]. Amino Acids, 2014, 46(5): 1385–1392.

[70] Lelo A, Miners J O, Robson R, et al. Assessment of caffeine exposure: caffeine content of beverages, caffeine intake, and plasma concentrations of methylxanthines [J]. Clinical Pharmacology and Therapeutics, 1986, 39(1): 54–59.

[71] Wierzejska R E, Gielecińska I. Evaluation of the caffeine content in servings of popular coffees in terms of its safe intake-can we drink 3-5 cups of coffee per day, as experts advise [J]. Nutrients, 2024, 16(15): 2385.

[72] Chin J M, Merves M L, Goldberger B A, et al. Caffeine content of brewed teas [J]. Journal of Analytical Toxicology, 2008, 32(8): 702–704.

[73] McCusker R R, Goldberger B A, Cone E J. Caffeine content of energy drinks, carbonated sodas, and other beverages [J]. Journal of Analytical Toxicology, 2006, 30(2): 112–114.

[74] Schubert M M, Astorino T A, Azevedo J L. The effects of caffeinated "energy shots" on time trial performance [J]. Nutrients, 2013, 5(6):

2062–2075.

[75] Barreto G, Loureiro L M R, Reis C E G, et al. Effects of caffeine chewing gum supplementation on exercise performance: a systematic review and meta-analysis [J]. European Journal of Sport Science, 2023, 23(5): 714–725.

[76] Jiménez S L, Díaz-Lara J, Pareja-Galeano H, et al. Caffeinated drinks and physical performance in sport: a systematic review [J]. Nutrients, 2021, 13(9): 2944.

[77] Li Yanfeng, Qiu Bopeng, Kuai Hongyan, et al. The acute effects of caffeine, creatine, and carbohydrate mouth rinse combined with conditioning activity on subsequent sports performance: a systematic review and Bayesian meta-analysis [J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 12: 1669004.

[78] Szlapinski S K, Charrette A, Guthrie N, et al. Paraxanthine safety and comparison to caffeine [J]. Frontiers in Toxicology, 2023, 5: 1117729.

[79] Główka N, Malik J, Anioła J, et al. The effect of caffeine dose on caffeine and paraxanthine changes in serum and saliva and CYP1A2 enzyme activity in athletes: a randomized placebo-controlled crossover trial [J]. Nutrition & Metabolism, 2024, 21(1): 90.

[80] Lajin B, Schweighofer N, Goessler W, et al. The determination of the paraxanthine/caffeine ratio as a metabolic biomarker for CYP1A2 activity in various human matrices by UPLC-ESIMS/MS [J]. Talanta, 2021, 234: 122658.

[81] Maksimowski D, Pachura N, Oziembłowski M, et al. Coffee roasting and extraction as a factor in cold brew coffee quality [J]. Applied Sciences, 2022, 12(5): 2582.

[82] Nikoo A M, Kadkhodaee R, Ghorani B, et al. Electrospray-assisted encapsulation of caffeine in alginate microhydrogels [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 116: 208　216.

[83] Janik M, Hanula M, Khachatryan K, et al. Nano- microcapsules, liposomes, and micelles in polysaccharide carriers: applications in food technology [J]. Applied Sciences, 2023, 13(21): 11610.

[84] Briones S C, Mussagy C U, Farias F O, et al. Functional hydrogels in food applications: a review of crosslinking technologies, encapsulation trends, and emerging challenges [J]. Polymers, 2025, 17(21): 2955.

[85] Rana V, Rai P, Tiwary A K, et al. Modified gums: approaches and applications in drug delivery [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(3): 1031–1047.

[86] Desai K G H, Jin Park H. Recent developments in microencapsulation of food ingredients [J]. Drying Technology, 2005, 23(7): 1361–1394.

[87] Bernkop-Schnürch A, Dünnhaupt S. Chitosan-based drug delivery systems [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2012, 81(3): 463–469.

[88] Baker L B, Jeukendrup A E. Optimal composition of fluid-replacement beverages [J]. Comprehensive Physiology, 2014, 4(2): 575–620.

[89] Drewnowski A, Gomez-Carneros C. Bitter taste, phytonutrients, and the consumer: a review 1 2 3 [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2000, 72(6): 1424–1435.

[90] Kaushik P, Verma R, Mittal V, et al. Flavor microencapsulation for taste masking in medicated chewing gums: recent trends, challenges, and future perspectives [J]. Coatings, 2022, 12(11): 1656.

[91] Taylor T M, Weiss J, Davidson P M, et al. Liposomal nanocapsules in food science and agriculture [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2005, 45(7–8): 587–605.

[92] Szejtli J, Szente L. Elimination of bitter, disgusting tastes of drugs and foods by cyclodextrins [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2005, 61(3): 115–125.

[93] Tenney K, Hayes J, Euston S, et al. Binding of caffeine and quinine by whey protein and the effect on bitterness [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(2): 509–516.

[94] Xie Hujun, Wang Han, Huang Min, et al. Encapsulation of EGCG by whey protein isolate and β-cyclodextrin nano complexes: a strategy to mask the bitter and astringent taste and increase the stability in beverages [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110760.

[95] 邵苗, 李松南, 张斌, 等. 咖啡因-淀粉微胶囊的制备、结构表征及形成机理[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(4): 7–12.
Shao Miao, Li Songnan, Zhang Bin, et al. Preparation, structural characterization and formation mechanism of caffeine-starch microcapsules [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(4): 7–12.

[96] Chicharro J L, Lucía A, Pérez M, et al. Saliva composition and exercise [J]. Sports Medicine, 1998, 26(1): 17–27.

[97] Ntovas P, Loumprinis N, Maniatakos P, et al. The effects of physical exercise on saliva composition: a comprehensive review [J]. Dentistry Journal, 2022, 10(1): 7.

[98] Rostamabadi H, Demirkesen I, Colussi R, et al. Recent trends in the application of films and coatings based on starch, cellulose, chitin, chitosan, xanthan, gellan, pullulan, Arabic gum, alginate, pectin, and carrageenan in food packaging [J]. Food Frontiers, 2024, 5(2): 350–391.

[99] Fabela-Morón M F. Bioactive compounds, sensory attributes, and flavor perceptions involved in taste-active molecules in fruits and vegetables [J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1427857.

[100] Lombardi L, Gala L D, Esposito C, et al. Porous architecture in 3D food printing: advances in formulation, process control, and sustainable structural design [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(6): e70304.

(责任编辑: 曹岱琳　蔡世佳)