



咖啡因对高温环境下耐力性运动表现的影响

王萃萃,周子贵,郑鑫焱*

摘要: 咖啡因作为营养补剂的一种,不仅在普通人群中普遍使用,而且经常被运动员服用以提高运动成绩。有研究指出,咖啡因可以有效地提升常温环境下的耐力性运动表现。但在高温环境下,咖啡因对运动表现尤其是长时间耐力性运动表现的影响及其机制仍存在众多争议。因此,本综述对国内外近十年的相关文献进行收集并系统总结和归纳,回顾了高温环境与运动表现的关系,以及咖啡因对常温环境下耐力性运动表现的影响及其机制,重点探讨了咖啡因对高温环境下耐力性运动表现的影响以及可能的机制,为未来的研究以及相关工作的开展提供参考。

关键词: 咖啡因;高温;耐力性运动表现;多巴胺

中图分类号:G804 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2021)03-0092-07

DOI:10.12064/ssr.20210313

Effect of Caffeine on Endurance Exercise Performance in the Heat

WANG Cuicui, ZHOU Zigui, ZHENG Xinyan*

(Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: As a kind of nutritional supplement, caffeine is widely used not only in the general population, but also taken by athletes to improve their performance. Some studies have pointed out that caffeine can effectively improve endurance performance in normal temperature environment. However, in the heat, there are still many controversies about the effect of caffeine on exercise performance, especially long-term endurance exercise performance. Therefore, this study collected and summarized the relevant literature of recent years at home and abroad, reviewed the relationship between high temperature environment and exercise performance, as well as the effect of caffeine on endurance exercise performance in normal temperature. It focused on the effect of caffeine on endurance exercise performance and possible mechanism in the heat so as to provide a reference for future research and related work.

Key Words: caffeine; high temperature; endurance exercise performance; dopamine

随着全球性气温升高,以夏季奥运会为代表的许多体育赛事都是在炎热的环境下进行,如2008年北京奥运会及2016年里约热内卢奥运会。在热环境中运动并取得较好的成绩,对于足球、马拉松以及长距离公路自行车等室外项目的运动员来说,将是一项巨大的挑战。众所周知,运动员在高温环境下进行运动易产生疲劳,运动表现降低,甚至影响健康^[1-2]。因此,探索高温环境下运动表现降低的原因,提高高温环境下运动员的成绩在体育科学研究中受到越来越多的重视。

咖啡因作为世界上最流行的中枢刺激剂之一,

在自然界中,广泛存在于茶、咖啡豆中,同时也经常被添加到各种饮料中用于提神,越来越多的人热衷于此。在临床应用和研究中,咖啡因已取得不少有益成果,如治疗神经衰弱和昏迷复苏、治疗偏头痛、预防病症、抑制某些严重传染病、加强某些止痛剂的效果以及灭菌杀毒等。然而,咖啡因的使用不仅仅局限于临床研究,因其不受场地设施限制、使用简单方便的特点,近年来,在运动科学领域中也逐渐受到关注。

2004年世界反兴奋剂机构将咖啡因从禁止类药物名单上摘除,重新认定为监管类药物。在此之后,很多运动员都服用咖啡因来提高运动成绩,特别

收稿日期:2020-07-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31701044)。

第一作者简介:王萃萃,女,在读硕士研究生。主要研究方向:运动人体科学。E-mail:19802124842@139.com。

*通信作者简介:郑鑫焱,女,博士,副教授。主要研究方向:运动生理学。E-mail:zhengxinyan0513@163.com。

作者单位:上海体育学院,上海 200438。

是耐力型运动员。据报道,75%的优秀运动员在运动之前或期间使用咖啡因,尤其在耐力性运动中^[3]。大量文献支持摄取咖啡因可以提升耐力性运动表现^[4,6]。有研究指出,摄入低到中剂量的咖啡因提高了常温环境(20°C)下的运动表现。特别是运动持续时间在30 min以上时^[7]。咖啡因已经被证明能够有效地拮抗脑内腺苷受体、促进脑内神经递质的分泌、增强脑活性等,提高常温环境下各种形式的运动表现^[4,8]。

但是,关于咖啡因对高温环境下耐力性运动表现的影响仍存在众多争议,且最佳摄取剂量未知,这些问题仍是未来需要重点关注和研究的方向。本文检索了近几年的相关文献,对高温环境下运动表现降低的原因、咖啡因提高常温环境下耐力性运动表现的机制进行阐述,重点对高温环境下咖啡因对耐力性运动表现的影响的相关研究进行总结归纳。

1 高温环境与耐力性运动表现

人体核心温度指的是人体内部胸腔、腹腔和中枢神经温度的平均温度,正常值约37°C。核心温度过高是指由于各种原因体温调节中枢的调定点上移,导致体温超过正常范围,在中强度运动时会升高到38°C以上。高温环境是指在气温、空气湿度和气流的综合影响下,温度超过人体的舒适程度,并能够引起机体体温过高的环境^[9]。邱仞之^[10]认为,在劳动环境中,气温超过32°C,炎热地区超过35°C,相对湿度超过80%,或者辐射强度超过4.814 J/cm²/min,或通风不良而存在的热源散热量超过83.7 kJ/cm²/min都属于高温劳动的范畴。赵杰修^[11]在综合了国内外大量研究资料后对高温高湿环境进行进一步描述:通常把35°C以上的生活环境和32°C以上的训练环境称为高温环境。当人体处于高温环境时,会产生热应激,在该种情况下,人体的神经系统、免疫系统、内分泌系统等会产生一系列生理性改变,当热应激过强时,甚至会发生病理性变化。在高温环境中,人体会产生过高的热负荷,导致一些生理指标发生变化,如心率、血压、体温、出汗量等^[12]。如果热负荷进一步升高,核心体温达到40°C,则会造成中枢神经系统的紊乱,甚至引发热休克^[13-14]。人体运动过程中体温升高是运动表现增强的生理应答,体温适度升高,特别是骨骼肌温度适度升高,可以增加酶的活性,加快化学反应速度,加快神经传导,增强肌肉收缩。但在高温环境下长时间运动时人的运动表现会降低,其原因在于体温的过度升高^[15-17]。在高温环境下,机体主要通过汗液蒸发方式来散热,人体皮肤与环境的温度梯度减少,使机体的散热受到障碍,加上运动过程

中体内产热过多,当散热作用低于产热作用时,体内热量积蓄直接引起核心体温升高,核心体温超过38°C时即出现运动性高核心体温^[18]。运动中脑部温度和身体核心体温的升高成为了中枢神经系统继续维持机体一定运动强度的限制因素,它们可提前诱发运动性疲劳,以保护大脑不受热损伤,从而降低运动表现^[15]。大量研究评估了高温对力竭运动测试^[19]、时间试验测试^[20]和最大摄氧量测试^[21]的影响,力竭运动和时间试验的研究表明,高温会损害运动表现。Roelands等^[22]研究表明环境温度从20°C升高到40°C时,力竭运动时间(67±1)min降低到(30±3)min。González-Alonso等^[15]的研究指出运动中核心温度越高,运动持续时间越短,在动物实验中同样观察到类似结果^[23]。因此,运动中体温的过度上升被认为是高温环境下运动表现降低的原因之一。运动中核心温度的过度升高使心血管系统负荷增加、诱发脱水、肌肉代谢率减慢等外周性因素的改变,进而引发运动性疲劳(图1)^[24]。然而,Zheng等^[25]指出高体温并没有引起糖原的减少或心血管系统负荷的增加,高体温引起的运动表现降低与中枢机能降低更加相关。近年来,高温环境下运动表现的降低可能与脑内神经递质、脑血流、脑活性等中枢性因素的改变有关。例如,Nybo等^[26]发现高温环境下运动中的脑血流量会随着核心温度的升高而增加,常温环境下并没有发生这样的变化。因此,高温环境下体内核心温度的升高可引起运动中大脑激活低下、脑血流量降低及神经递质分泌的改变引发运动性中枢疲劳,从而降低运动表现^[25]。

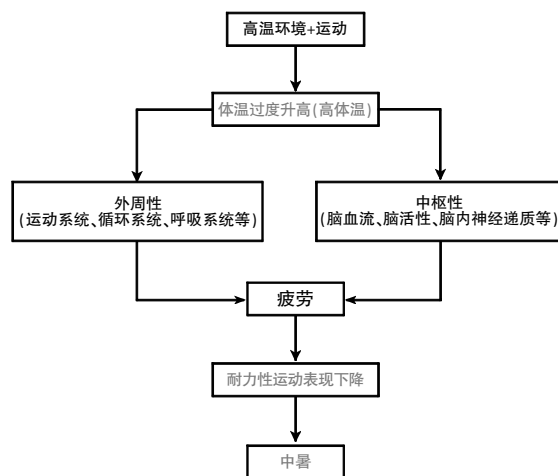


图1 高温环境下运动表现下降的机制

Figure1 Mechanism of Decreased Exercise Performance in the Heat



2 咖啡因与常温环境下的耐力性运动表现

有研究证明咖啡因能提升常温环境下耐力性运动表现,平均改善率为3%~5%,且指出摄取低到中剂量的咖啡因对耐力性运动表现的作用效果更大^[27]。咖啡因能够提高耐力性运动表现的机制涉及到中枢和外周,但主要作用机制可能是中枢机制^[28]。

2.1 咖啡因提高常温环境下耐力性运动表现的外周机制

2.1.1 增加游离脂肪酸的分解,减少血糖、肌糖原以及肝糖原的代谢

运动后 ATP 分解,腺苷生成增加,与受体结合使脂肪酶的活性降低,抑制脂肪动员,肌肉依靠肌糖原分解功能,肌糖原减少导致肌肉收缩功能下降,从而导致运动表现降低^[29]。咖啡因的摄入增加了肾上腺素和去甲肾上腺素的含量,增加了脂肪限速酶的活性或直接作用于脂肪细胞的脂酶,因此脂肪动员加快,从而导致运动开始后血浆中游离脂肪酸增多,使机体对脂肪的利用增加,有效节省糖原,使贮备有限的糖原作用于运动的后半程,从而延缓疲劳的发生,提高了运动表现^[30]。该机制最初是由 Costill 等人提出,他们发现摄入 4~5 mg/kg 体重的咖啡因可以刺激脂肪组织释放游离脂肪酸,减少运动时肌糖原的利用,延长力竭运动时间^[31-32]。然而,在随后的重复研究中发现 6 mg/kg 体重的咖啡因对运动期间的肌糖原的利用无影响,他们提出咖啡因的促进作用可能有其他机制^[33-34]。

2.1.2 咖啡因促进肌质网钙离子的释放

咖啡因并不增加骨骼肌运动神经元和兴奋的传导速度,而是直接作用于肌浆网膜上的兰尼碱受体(RyR)^[35-36]。钙离子是肌肉收缩的始动因素,在肌肉收缩初期,咖啡因达到一定剂量时,兰尼碱受体对肌质中的钙离子敏感性增强,从而影响钙离子通道,促进肌质网钙离子释放,肌肉收缩的兴奋阈值降低,延长肌肉收缩活动的持续时间,使钙离子更利于和肌钙蛋白结合,从而有利于横纹肌进行兴奋收缩耦联,肌肉收缩活动增强^[37]。

2.2 咖啡因提高耐力性运动表现的中枢机制

2.2.1 兴奋中枢神经系统

近年来研究者认为中枢神经系统的激活是由于阻断腺苷受体 A1 和 A2^[38-39]。中枢内腺苷的产生可以抑制大脑内兴奋性神经递质多巴胺(Dopamine, DA)的产生,降低 DA、乙酰胆碱合成,对运动表现

起重要作用^[37]。DA 作为一种兴奋性脑内神经递质,已有研究证实,大脑 DA 与激发、促进作用以及肌肉协调能力密切相关^[40-41]。Bailey 等^[42-43]的研究发现长时间的疲劳性运动使脑干和中脑内 DA 的合成和代谢水平降低,导致运动性疲劳的发生,从而降低运动表现。咖啡因作为非选择性腺苷受体拮抗剂,能够透过血脑屏障,拮抗腺苷受体,促进纹状体、伏隔核、尾状核脑内神经递质的分泌,特别是 DA^[28],从而对运动表现产生作用。

为了具体地探讨咖啡因对运动表现的影响机制,Zheng 等^[44]观察了腹腔注射咖啡因对力竭运动的时间、运动中的体温调节反应及下丘脑内单胺类神经递质分泌的影响。结果表明,咖啡因能够延长运动时间,促进脑内 DA 的分泌,但没有影响去甲肾上腺素及 5-羟色胺的分泌。另外,咖啡因增强的产热高于机体散热,引起核心温度升高。这些结果表明咖啡因可以抑制常温环境下高体温引起的疲劳,提升运动表现,这些与咖啡因促进脑内 DA 分泌有关^[38]。

2.2.2 降低运动疲劳的主观感觉

随着运动疲劳的发生,主观疲劳感觉增加,运动表现下降^[45]。Doherty 等^[46]的研究指出,在恒定负荷运动期间,摄入咖啡因后,主观疲劳感觉系数降低了约 6%,系数的降低可以解释摄入咖啡因后疲劳测试的 30% 差异。在恒定的工作负荷运动中,伴随着较低的主观疲劳感觉,愉悦和唤醒的情感状态会增加,这会进一步增强咖啡因的促进作用即提高运动表现^[47]。Sökmen 等^[48]研究报道服用 3~13 mg/kg 体重的咖啡因可增强各类运动项目的运动表现。另外,与 3 mg/kg 体重(低剂量)和 9 mg/kg 体重(高剂量)相比,6 mg/kg 体重(中剂量)的咖啡因摄取能够更有效地提高常温环境下的耐力性运动表现^[49]。由于高温环境下体温的过度升高会降低运动表现,所以在高温环境下,咖啡因能否有效地抑制高体温引起的疲劳和提高运动成绩有待探讨。

3 咖啡因与高温环境下的耐力性运动表现

近年来,摄入咖啡因对高温下运动表现的影响一直受到人们的关注,同时也存在众多的争议。因此,对近几年的相关文献进行了总结归纳(表 1)。

Chevront 等^[50]在实验中观察到摄取 9 mg/kg 体重的咖啡因并未显著提高高温环境下的耐力性运动表现,其可能原因为咖啡因引起的体温升高,降低了神经驱动和肌肉力量。在类似运动中,Roelands 等^[51]观察到 6 mg/kg 体重的咖啡因摄取同样没有提升高温环境下的耐力性运动表现。Silva 等^[52]进一步比较



表 1 咖啡因对高温环境下的耐力性运动表现及体温调节的影响

Table 1 Effects of Caffeine on Endurance Exercise Performance and Thermoregulation in the Heat

作者	被试	摄取量	运动形式	环境温度	测量部位	主要研究结果
Cohen 等 ^[56]	5 名男性 2 名女性	0.5 mg/kg 9 mg/kg	21 km 公路跑	干球-黑球 温度 24~28 °C	鼓膜	→运动表现,鼓膜温
Del coso 等 ^[5]	7 名男性	6 mg/kg	120 min 恒定负荷自行车运动	36°C	直肠	↑ 运动表现,直肠温
Cheuvront 等 ^[50]	10 名男性	9 mg/kg	30 min 恒定负荷自行车运动+ 15 min 功率自行车计时运动	40°C	直肠	→运动表现,RPE;↑ 直肠温
Ganio 等 ^[57]	12 名男性	3 mg/kg	90 min 恒定负荷自行车运动+ 15 min 功率自行车计时运动	33°C	直肠	→运动表现,平均皮肤温,直 肠温,心率,RPE
Roelands 等 ^[51]	8 名男性	6 mg/kg	60 min 恒定负荷自行车运动+ 30 min 功率自行车计时运动	30°C	直肠	→运动表现,RPE,平均皮肤 温,心率; ↑ 直肠温
Pitchford 等 ^[53]	9 名男性	3 mg/kg	60 min 恒定负荷自行车运动	35°C	直肠	↑ 运动表现; →RPE,心率,直肠温
Suvi 等 ^[52]	13 名男性 10 名女性	6 mg/kg	恒定负荷走	42°C	直肠	→运动表现,直肠温; ↑ 心率; ↓ RPE
Beaumont 等 ^[54]	8 名男性	6 mg/kg	60 min 恒定负荷自行车运动	30°C	食道	↑ 运动表现; →核心温,平均皮肤温
Hanson 等 ^[55]	10 名男性	3 mg/kg 6 mg/kg	10 km 跑	30.6°C	食道	→运动表现,心率,RPE; ↑ 核心温

注:↑ 表示提高;→表示不变;↓ 表示降低。

了男女的差异,指出 6 mg/kg 体重的咖啡因并没有提高男女耐力跑的表现,只是降低了男性的主观疲劳感觉(Rating of Perceived Exertion,RPE)和疲劳程度,没有提高运动表现的原因可能是运动前的进食情况会影响咖啡因的代谢。此外,高皮肤温度影响机体散热,因此可能会抵消低 RPE 对耐热能力的有益影响。Pitchford 等^[53]指出,3 mg/kg 体重的咖啡因摄取降低了 RPE,提升了高温环境下的耐力性运动表现并且没有引起体温的升高,其可能原因为咖啡因对脑的刺激,促进了脑内兴奋性神经递质的释放,进而促进兴奋性突触的传递,降低疲劳感觉。同样,Beaumont 等^[54]指出 6 mg/kg 体重的咖啡因提高了高温环境下的运动表现,但核心温度和皮肤温度没有显著变化。提升运动表现的原因可能是服用咖啡因导致了更高的出汗率,机体通过增加散热带走运动产生的热量,使体温不至于过度升高,从而提升运动表现。运动表现提升的另一个原因可能是摄取咖啡因降低了运动前 60 min 的 RPE。Hanson 等^[55]将低剂量、中剂量的咖啡因应用于自定速度的 10 km 跑中,发现 2 种剂量的咖啡因都没有提升运动表现,6 mg/kg 体重的咖啡因会导致更高的热储备,热储备增加的原因可能是咖啡因通过血脑屏障,拮抗腺苷受体,促进兴奋性神经递质 DA 的释放。脑 DA 对体温调节中起着重要作用,Hasegawa 等^[29]指出在不同环境温度下注射多巴胺/去甲肾上腺素(DA/NE)再摄取抑

制剂-丁氨苯丙酮,大鼠的运动表现增强、大脑和核心温度升高的同时伴随着视前区-下丘脑前部(PO/AH)处 DA 的增加。

将表 1 的研究进行归纳总结后得出,咖啡因的剂量、运动时间以及形式的差异可能会导致不同研究结果之间的相互矛盾,并且咖啡因对运动表现的影响的作用机制未知。低剂量的咖啡因摄取可能会抑制中枢性机能的降低,并不引起体温升高的生理反应,从而抑制高温环境下运动表现的降低,提升运动成绩。中到高剂量的咖啡因摄取可能引起体温的升高从而抵消了咖啡因的促进作用。然而目前为止并没有研究探讨不同剂量的咖啡因摄取对高温环境下运动表现的影响,低剂量的咖啡因的效果并没有被证实。因此,应探索提升高温环境下运动表现的咖啡因最佳剂量。

4 结论与展望

对以往研究进行总结归纳可知,高温环境下进行长时间运动会导致运动性高体温,对肌肉代谢、心血管系统等外周产生影响,同时影响脑血流、脑活性等中枢系统,从而加速了运动疲劳的产生,降低运动表现。咖啡因作为一种非选择性拮抗剂,可阻断腺苷受体,促进兴奋性神经递质的释放,降低 RPE,促进钙离子的释放,增加脂肪的分解,提高常温环境下的耐力性运动表现,同时提高运动表现的最佳剂量为



低到中剂量。但在高温环境下,关于咖啡因对耐力性运动表现的影响仍存在众多争议,且提高运动表现的最佳剂量未知。因此,探索摄取不同剂量咖啡因对高温环境下耐力性运动表现的影响,探究咖啡因抑制高温环境下运动表现降低的最佳摄取剂量及机制,对今后运动员使用咖啡因提升运动成绩提供科学的指导方法、高温环境下提升耐力性项目的运动成绩提供新的理论基础等至关重要。

参考文献:

- [1] Nagelkirk P. R., Hogan K. B., Hoare J. M. Ambient temperature affects thrombotic potential at rest and following exercise[J]. *Thrombosis Research*, 2012, 130(2): 248-252.
- [2] Hillman A. R., Vince R. V., Taylor L., et al. Exercise-induced dehydration with and without environmental heat stress results in increased oxidative stress[J]. *Applied Physiology, Nutrition & Metabolism*, 2011, 36(5):698-706.
- [3] Del Coso J., Estevez E., Mora-Rodriguez R. Caffeine during exercise in the heat: Thermoregulation and fluid-electrolyte balance[J]. *Medicine & science in Sports & Exercise*, 2009, 41(1):164-173.
- [4] 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.
- [5] Spriet L. L. Exercise and sport performance with low doses of caffeine[J]. *Sports Medicine*, 2014, 44(2):175-184.
- [6] Burke L. M. Caffeine and sports performance[J]. *Applied Physiology, Nutrition, & Metabolism*, 2008, 33(6): 1319-1334.
- [7] Keisler B. D., Armsey T. D. Caffeine as an ergogenic aid[J]. *Current Sports Medicine Reports*, 2006, 5(4): 215-219.
- [8] Ellender L., Linder M. M. Sports pharmacology and ergogenic aids[J]. *Primary Care*, 2005, 32(1):277-292.
- [9] 宋志刚,王德华.人的体温[J].*科技与生活*,2011,32(4): 36.
- [10] 邱仞之.环境高温与热损伤[M].北京:北京军事科学院出版社,2000,1-40.
- [11] 赵杰修.高温高湿条件下的训练与比赛[J].*中国体育教练员*,2007,15(4):10-11.
- [12] Goulet E. D. Effect of exercise -induced dehydration on endurance performance: Evaluating the impact of exercise protocols on outcomes using a meta-analytic procedure[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2013, 47(11): 41-45.
- [13] Kenefick R. W., Chevront S. N., Palombo L. J., et al. Skin temperature modifies the impact of hypohydration on aerobic performance[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2010, 109(1):79-86.
- [14] Sawka M. N., Chevront S. N., Kenefick R. W. High skin temperature and hypohydration impair aerobic performance[J]. *Experimental Physiology*, 2012, 97(3): 327-332.
- [15] González-Alonso J., Teller C., Andersen S. L., et al. Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1999, 86(3):1032-1039.
- [16] Galloway S. D., Maughan R. J. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1997, 29(9):1240-1249.
- [17] Wanner S. P., Costa K. A., Soares A. D. N., et al. Physical exercise-induced changes in the core body temperature of mice depend more on ambient temperature than on exercise protocol or intensity[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(6):1077-1085.
- [18] Goel N. K., Stolen R. H., Morgan S., et al. Glossary of terms for thermal physiology. Second edition. Revised by the commission for thermal physiology of the international union of physiological sciences (IUPS thermal commission)[J]. *Archives of pharmacological research*, 1987, 410(4-5):567-587.
- [19] Siegel R., Maté J., Watson G., et al. Pre-cooling with ice slurry ingestion leads to similar run times to exhaustion in the heat as cold water immersion[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2012, 30(2):155-165.
- [20] Tyler C., Sunderland C. The effect of ambient temperature on the reliability of a preloaded treadmill time-trial [J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2008, 29(10):812-816.
- [21] González-Alonso J., Calbet J. A. L. Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans[J]. *Circulation*, 2003, 107(6):824-830.
- [22] Roelands B., Koning J., Foster C., et al. Neurophysiological determinants of theoretical concepts and mechanisms involved in pacing[J]. *Sports Medicine*, 2013, 43(5): 301-311.
- [23] Wanner S. P., Prímola-Gomes T. N., Pires W., et al. Thermoregulatory responses in exercising rats: Methodological aspects and relevance to human physiology[J]. *Temperature*, 2015, 2(4):457-475.



- [24] Hargreaves M., Febbraio M. Limits to exercise performance in the heat[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 1998, 19(Suppl 2):115-116.
- [25] Zheng X.Y., Hasegawa H. Central dopaminergic neurotransmission plays an important role in thermoregulation and performance during endurance exercise[J]. *European Journal of Sport Science*, 2016, 16(7):818-828.
- [26] Nybo L., Rasmussen P., Sawka M. N. Performance in the heat-physiological factors of importance for hyperthermia-induced fatigue [J]. *Comprehensive Physiology*, 2014, 4(2): 657-689.
- [27] 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):1-10.
- [28] Kalmar J. M. The influence of caffeine on voluntary muscle activation[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2005, 37(12):2113-2119.
- [29] Hasegawa H., Takatsu S., Ishiwata T., et al. Continuous monitoring of hypothalamic neurotransmitters and thermoregulatory responses in exercising rats[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2011, 202(2):119-123.
- [30] 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.
- [31] Costill D. L., Dalsky G. P., Fink W. J. Effects of caffeine ingestion on metabolism and exercise performance [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1978, 10(3):155-158.
- [32] 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.
- [33] 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(Pt 3):837-847.
- [34] Laurent D. Effects of caffeine on muscle glycogen utilization and the neuroendocrine axis during exercise[J]. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 2000, 85(6): 2170-2175.
- [35] Tarnopolsky M. A. Effect of caffeine on the neuromuscular system--potential as an ergogenic aid[J]. *Applied Physiology, Nutrition & Metabolism*, 2008, 33(6): 1284-1289.
- [36] Tang W., Sencer S., Hamilton S. L. Calmodulin modulation of proteins involved in excitation-contraction coupling[J]. *Frontiers in Bioscience*, 2002, 7(1-3):d1583-d1589.
- [37] 谌才和.中枢神经递质[J].*武汉体育学院学报*,1995,29(1):46-49.
- [38] Zheng X., Hasegawa H. Administration of caffeine inhibited adenosine receptor agonist-induced decreases in motor performance, thermoregulation, and brain neurotransmitter release in exercising rats[J]. *Pharmacology Biochemistry & Behavior*, 2015, 140:82-89.
- [39] 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 & Comparative Physiology*, 2003, 284(2):R399-R404.
- [40] Chaouloff F., Laude D., Elghozi J. L. Physical exercise: Evidence for differential consequences of tryptophan on 5-HT synthesis and metabolism in central serotonergic cell bodies and terminals[J]. *Journal of Neural Transmission*, 1989, 78(2): 121-130.
- [41] Chaouloff F. Physical exercise and brain monoamines: A review[J]. *Acta Physiologica*, 1989, 137(1):1-13.
- [42] Bailey S. P., Davis J. M., Ahlborn E. N. Neuroendocrine and substrate responses to altered brain 5-HT activity during prolonged exercise to fatigue[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1993, 74(6):3006-3012.
- [43] Bailey S. P., Davis J. M., Ahlborn E. N. Effect of increased brain serotonergic activity on endurance performance in the rat[J]. *Acta Physiologica*, 2010, 145(1):75-76.
- [44] Zheng X., Takatsu S., Wang H., et al. Acute intraperitoneal injection of caffeine improves endurance exercise performance in association with increasing brain dopamine release during exercise[J]. *Pharmacology Biochemistry & Behavior*, 2014, 122:136-143.
- [45] Magkos F., Kavouras S. A. Caffeine use in sports, pharmacokinetics in man, and cellular mechanisms of action [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2005, 45(7-8):535-562.
- [46] Doherty M., Smith P. M. Effects of caffeine ingestion on exercise testing: A meta-analysis[J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2005, 14(6):626-646.
- [47] Duncan M. J., Hankey J. The effect of a caffeinated energy drink on various psychological measures during submaximal cycling [J]. *Physiology & Behavior*, 2013, 116-117:60-65.
- [48] Sökmen B., Armstrong L. E., Kraemer W. J., et al. Caffeine use in sports: Considerations for the athlete[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2008, 22(3):978-986.
- [49] Graham T. E., Spriet L. L. Metabolic, catecholamine, and exercise performance responses to various doses of caffeine[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1995, 78(3):



- 867-874.
- [50] Chevront S. N., Ely B. R., Kenefick R. W., et al. No effect of nutritional adenosine receptor antagonists on exercise performance in the heat[J]. *American Journal of Physiology Regulatory Integrative & Comparative Physiology*, 2009, 296(2): R394-R401.
- [51] Roelands L., De Pauw K., Meeusen R. Neurophysiological effects of exercise in the heat[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2015, 25(1): 65-78.
- [52] Suvi S., Timpmann S., Tamm M., et al. Effects of caffeine on endurance capacity and psychological state in young females and males exercising in the heat[J]. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 2017, 42(1): 68-76.
- [53] Pitchford N. W., Fell J. W., Leveritt M. D., et al. Effect of caffeine on cycling time-trial performance in the heat[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2014, 17(4):445-449.
- [54] Beaumont R. E., James L. J. Effect of a moderate caffeine dose on endurance cycle performance and thermoregulation during prolonged exercise in the heat[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2017, 20(11): 1024-1028.
- [55] Hanson N. J., Martinez S. C., Byl E. N., et al. Increased rate of heat storage, and no performance benefits, with caffeine ingestion before a 10-km Run in hot, humid conditions[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2019, 14(2):196-202.
- [56] Cohen B. S., Nelson A. G., Prevost M. C., et al. Effects of caffeine ingestion on endurance racing in heat and humidity[J]. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 1996, 73(3-4):358-363.
- [57] Ganio M. S., Johnson E. C., Lopez R. M., et al. Caffeine lowers muscle pain during exercise in hot but not cool environments[J]. *Physiology & Behavior*, 2011, 102(3-4): 429-435.

(责任编辑:刘畅)

(上接第 91 页)

- [6] 王志强.短跑地面支撑反作用力研究综述[J].*湖北体育科技*,2010,29(3):328-330.
- [7] Blallner S., Nobel L. Relative effects of isokinetic and plyometric training on vertical jump performance[J]. *Research Quarterly for Exercise and Sports*, 1979, 17(1): 18-23.
- [8] Radcliffe J., Farentinos R. Explosive power training champion human kinetics Publishers Inc[J]. *Exercise and Sports Science*, 1985, 67(4):231-234.
- [9] 许汪宇,潘其乐,蔡广.短跑和中长跑运动员跳深实验中支撑时间特征的研究[J].*体育科研*,2019,40(6): 98-101.
- [10] 周华.优秀中长跑运动员途中跑的步态和足底压力分布特征的研究[D].济南:山东体育学院,2007.
- [11] 苍海,李翰君,高维纬.排球运动员步态支撑期的足底压力特征[J].*沈阳体育学院学报*,2012,31(1):84-87.
- [12] 曾凡辉,王路德,刑文华,等.运动员科学选材:国家体委体育科技成果专辑[M].北京:人民体育出版社,1992: 78-80.
- [13] 蔡广,许汪宇,葛珺.下肢形态等因素与跳深实验中支撑时间关系研究[J].*四川体育科学*,2017,36(1):72-75.
- [14] 蔡广,许汪宇,刘慧琴,等.不同项目足弓形态特点及其与跳深实验中支撑时间的关系[J].*体育科研*,2017,38(2):70-73+77.

(责任编辑:刘畅)