

杨威, 姬红慎, 廖俊辉, 等. 辣椒主要提取物对机体运动表现的影响及潜在机制 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 419–428. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090141

YANG Wei, JI Hongshen, LIAO Junhui, et al. Effects of Main Extracts of Capsicum on Exercise Performance and Its Potential Mechanisms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 419–428. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090141

· 专题综述 ·

辣椒主要提取物对机体运动表现的影响及潜在机制

杨 威^{1,2}, 姬红慎², 廖俊辉³, 赵少聪¹, 孙 健^{2,*}

(1. 厦门理工学院体育部, 福建厦门 361024;
2. 广州体育学院运动训练学院, 广东广州 510500;
3. 三明学院体育与康养学院, 福建三明 365004)

摘 要: 辣椒主要提取物是一系列辣椒素类和辣椒素酯类物质的总称, 了解其对运动表现的影响能够为该物质在运动领域的应用提供依据。本研究对近二十年辣椒主要提取物与运动表现的相关研究进行了梳理与综述, 结果显示: 辣椒主要提取物能够提升机体的有氧耐力、无氧、肌肉力量和高强度间歇等运动表现, 其中肌肉爆发力、最大力量、无氧等短时间高强度运动表现提升的机制与辣椒主要提取物导致的肌浆网 Ca^{2+} 离子浓度和神经肌肉接头乙酰胆碱释放增加有关, 有氧耐力、肌肉耐力、高强度间歇运动等长时间高强度运动表现提升的机制与辣椒主要提取物产生的抗氧化、抗炎、镇痛、扩血管、增加脂肪供能水平等作用有关。辣椒主要提取物与运动表现未来的研究需要聚焦更多运动类型和受试群体、特殊环境、慢性干预、剂-效关系、机制确认、辣椒素酯类物质的应用等方面。综上, 辣椒主要提取物能够提升机体的运动表现, 其在运动领域可能具有广泛的应用前景。

关键词: 辣椒主要提取物, 辣椒素, 辣椒素酯, 运动表现, 运动能力

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)15-0419-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090141

本文网刊:



Effects of Main Extracts of Capsicum on Exercise Performance and Its Potential Mechanisms

YANG Wei^{1,2}, JI Hongshen², LIAO Junhui³, ZHAO Shaocong¹, SUN Jian^{2,*}

(1. Department of Physical Education, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. College of Sports Training, Guangzhou Sport University, Guangzhou 510500, China;
3. School of Physical Education and Recreation, Sanming University, Sanming 365004, China)

Abstract: Understanding the effect of main extracts of capsicum, a general name of a series of capsaicinoids and capsinoids substances, on exercise performance can provide a basis for the application of this substance in sports. This article provides a comprehensive and critical review of the research on main extracts of capsicum and exercise performance based on selected articles published in peer-reviewed journal over the past 20 years. The results show that: The main extracts of capsicum are effective for improving aerobic endurance, anaerobic, muscle strength and high intensity intermittent exercise performance. The mechanism by which the main extracts of capsicum enhancing muscle explosive strength, maximum strength, anaerobic performance is related to the increase of sarcoplasmic reticulum Ca^{2+} concentration and neuromuscular junction acetylcholine release and improving aerobic endurance, muscle endurance, high-intensity intermittent exercise performance is related to its antioxidant, anti-inflammatory, analgesic, vasodilator, and increasing energy contribution from

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 国家社会科学基金项目 (22ATY002); 国家体育总局 2022 年科技创新项目 (22KJCX013); 福建省教育厅 2021 年度省中青年教师教育科研项目 (社科类) 一般项目 (JAS21315)。

作者简介: 杨威 (1989-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 营养与运动表现、竞技体育领域的脑力疲劳, E-mail: yangweisus@163.com。

* 通信作者: 孙健 (1973-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 运动训练、体能训练, E-mail: sunjian@gzsport.edu.cn。

fat. Future research needs to focus on more exercise types and subject groups, special environment, chronic intervention, dose-effect relationship, mechanism confirmation, and application of capsiate. In summary, the main extracts of capsicum can improve the exercise performance, and it may have a wide application prospect in sports.

Key words: main extracts of capsicum; capsaicin; capsiate; exercise performance; exercise ability

辣椒是全世界食用最多的蔬菜或香料^[1-2],有关亚洲和墨西哥人的研究数据发现,该群体每日辣椒的食用量为 5~15 g^[3]。在我国,辣椒同样广受大众喜爱,有报道指出,我国辣椒的种植面积占世界辣椒总种植面积的 35%,产量占世界辣椒总产量的 46%^[4]。辣椒主要提取物对机体健康有着促进作用。辣椒主要提取物是一系列辣椒素类和辣椒素酯类物质的总称(本文辣椒主要提取物专指辣椒素类和辣椒素酯类物质),其中辣椒素类物质包含辣椒素、二氢辣椒素、降二氢辣椒素等,主要提取于红辣椒、哈瓦那辣椒、墨西哥胡椒等辣椒品种,是辣椒中辛辣味道的来源成分^[5-6]。辣椒素酯类物质包含辣椒素酯、二氢辣椒素酯、降二氢辣椒素酯等^[5],主要提取于甜椒等无辛辣味道的辣椒品种,该类物质与辣椒素类物质的化学结构类似,具备辣椒素类物质相似的生物学功能^[7]。

辣椒主要提取物的生物学功能较为广泛。大量研究发现,辣椒主要提取物的服用可以产生镇痛、抗氧化、抗炎、抗癌、抗肥胖、抗结石、保护心脏、调节代谢等一系列功能^[1,6-8],这些功能的存在给辣椒主要提取物带来了广泛的医学应用前景,目前已有多项研究将其用于偏头痛、肥胖、胃溃疡等疾病的治疗^[9-11]。辣椒主要提取物广泛的生物学功能也为其在运动领域的应用提供了支持。近二十年来,以 Kim 等^[12-13]、Oh 等^[14-15]、de Freitas 等^[16-18]为代表的国外学者通过相当数量的动物和人体实验发现,辣椒主要提取物除了可以用于临床疾病的治疗,还能用于机体运动表现的提升,相关研究成果不仅为辣椒主要提取物在运动领域的应用提供了依据,也为大众人群和运动员训练效果、比赛表现的优化提供了新的手段。然而,相比国外相关研究的不断展开和深入,国内对于该领域的了解仍十分有限。本文将对辣椒主要提取物与机体运动表现的研究现状进行综述,为辣椒主要提取物在运动领域的应用及国内后续研究的开展等提供依据。

1 辣椒主要提取物对机体运动表现的影响

1.1 有氧耐力表现

良好的有氧耐力表现于不同人群意义重大,对于健康人群而言,良好的有氧耐力表现能够降低其心血管疾病、糖尿病等疾病的发生概率^[19-20],与脑功能息息相关^[21],并能提升青少年后续的学术能力^[22],对于运动员而言,良好的有氧耐力表现有助于其快速恢复^[23],很多时候甚至能够直接决定比赛的胜负^[24]。由此,如何提升机体的有氧耐力表现一直是科研领域不断探索的议题。众多证据显示,服用辣椒主要提取物可能是其中的有效途径之一(表 1)。对辣椒主要

提取物与有氧耐力表现的关注始于 Kim 等^[12-13,25]的一系列急性干预动物实验研究,他的研究显示,在力竭游泳测试前 2 h 服用 6~10 mg/kg BW(体重)的辣椒素和 0.02~0.033 mmol/L 的辣椒素酯均能显著提升 StdddY 雄性小鼠的力竭时间。Oh 等^[14-15]验证了急性辣椒素补充对有氧耐力表现的作用效果,他针对四周龄雄性 SD 大鼠灌胃辣椒素(实验组)和对照溶液(对照组)的随机平行对照实验发现,15 mg/kg BW 剂量的辣椒素补充可以使大鼠力竭的时间较对照组延长 219%。Haramizu 等^[26]研究了急性辣椒素酯补充对有氧耐力表现的作用效果,结果显示,辣椒素酯补充同样有助于小鼠力竭时间的提升。在这之外,还有研究通过动物实验探究了辣椒主要提取物补充时间和补充剂量对有氧耐力表现提升效果的影响,发现运动前 2~3 h 为该类物质的最佳补充时间^[12],10~15 mg/kg BW(辣椒素)^[12,14]和 0.02~0.033 mmol/L(辣椒素酯)^[13]为该类物质的最佳补充剂量。上述研究证据提示,辣椒主要提取物的服用可能存在剂-效关系(服用剂量-作用效果)和时-效关系(服用时间-作用效果)。

除了明确急性辣椒主要提取物补充对机体有氧耐力表现的影响,还有研究通过动物实验探究了慢性辣椒主要提取物补充对机体有氧耐力表现的影响(表 1)。慢性辣椒主要提取物补充的研究结果与急性研究总体类似^[27-29]。如郭时印^[27]的研究将 168 只雄性昆明小鼠随机分成低(3 mg/kg/d)、中(6 mg/kg/d)、中高(10 mg/kg/d)、高(15 mg/kg/d)剂量四个实验组以及对照组,并让实验组进行持续 28 d 四种剂量的辣椒素灌胃,对照组进行相同时间的蒸馏水灌胃,干预结束让两组小鼠参加爬杆和 5%BW 负重力竭游泳测试,研究结果显示,低、中、中高、高剂量组小鼠爬杆测试和负重力竭游泳两项测试的力竭时间除了低剂量组略高于对照组外,其他组均显著高于对照组,并且研究结果提示 15 mg/kg/d 为慢性干预的较为理想剂量。尽管多数研究表明慢性辣椒主要提取物补充对大/小鼠有氧耐力表现的提升同样具有良好效果,然而,也有个别研究得到了阴性甚至负面的结果。如刘少华^[30]发现连续 28 d,每天灌胃 0.004 mg 的辣椒素并不能有效提升小鼠的游泳力竭时间。Dousset 等^[31]的研究显示,给初生 SD 大鼠连续 3 个月皮下注射 50 mg/kg/d 剂量的辣椒素甚至会导致大鼠力竭跑步的时间下降 8.9%。上述研究结果的出现可能与辣椒主要提取物补充的剂量不足、研究对象为低龄大鼠、补充方式为皮下注射等因素有关。由此可以看出,慢性辣椒主要提取物补充对有氧耐力表

表 1 辣椒主要提取物对机体有氧耐力表现的影响
Table 1 Effects of main extracts of capsicum on aerobic performance

样本情况	研究设计	干预方案	测试方案	结果	文献
动物实验-急性					
M6~8六周龄小鼠	未说明	运动前0.5、1、2、3 h 6 mg/kg辣椒素vs.对照溶液 灌胃	力竭游泳	力竭时间(2)↑	[12]
M6~8六周龄小鼠	未说明	运动前2 h 3、6、10、15 mg/kg辣椒素vs.对照溶液 灌胃	力竭游泳	力竭时间(10)↑	[12]
六周龄雌性小鼠	未说明	运动前2 h 0.033 mmol/kg辣椒素vs.安慰剂 灌胃	力竭游泳	力竭时间↑	[25]
M11六周龄小鼠	PR	运动前2 h 0.033 mmol/kg辣椒素酯vs.对照溶液 灌胃	力竭游泳	力竭时间↑	[13]
M39六周龄小鼠	PR	运动前2 h 0.01、0.02、0.033、0.05 mmol/kg辣椒素酯vs.对照溶液 灌胃	力竭游泳	力竭时间(0.02、0.033)↑	[13]
M102六周龄小鼠	PR	运动前0.5、1、2、3 h 0.033 mmol/kg辣椒素酯vs.对照溶液 灌胃	力竭游泳	力竭时间(2、3)↑	[13]
M49四周龄大鼠	RCT(PR)	运动前2 h 6、10、15 mg/kg辣椒素vs.对照溶液 灌胃	3%BW力竭游泳	力竭时间(15)↑	[14]
M49四周龄大鼠	RCT(PR)	运动前2 h 6、10、15 mg/kg辣椒素vs.对照溶液 灌胃	3%BW力竭游泳	力竭时间(15)↑	[15]
12只五周龄小鼠	PR	未说明 10 mg/kg辣椒素酯vs.氯化钠溶液 正常进食	力竭游泳	力竭时间↑	[26]
动物实验-慢性					
M22初生大鼠	PR	3个月 50 mg/kg/d辣椒素vs.对照溶液 皮下注射	力竭跑步	力竭时间↓	[31]
M168小鼠	RCT(PR)	28 d 3、6、10、15 mg/kg/d四种剂量辣椒素vs.蒸馏水 灌胃	爬杆测试+5%BW力竭游泳	两项测试时间(6~15)↑	[27]
M12六至八周龄小鼠	PR	12个月 常规饮食+0.01%浓度辣椒素vs.常规饮食 正常进食	力竭跑步	力竭时间↑	[28]
六至八周龄雌性小鼠	RCT(PR)	4个月 高脂饮食+0.01%浓度辣椒素vs.高脂饮食 正常进食	力竭跑步	力竭时间↑	[28]
F12八周龄小鼠	RCT(PR)	28 d 205、410、1025 mg/kg/d三种剂量辣椒素vs.赋形剂 灌胃	5%BW力竭游泳	力竭时间(1025)↑	[29]
M50小鼠	RCT(PR)	28 d 0.004 mg/d辣椒素vs.生理盐水 灌胃	力竭游泳	力竭时间 1	[30]
人体实验-急性					
M10经常运动成人	RCT(CR)	运动前45 min 12 mg辣椒素vs.安慰剂 胶囊	1500 m计时跑	完成时间↓	[18]
M12经常运动成人	RCT(CR)	运动前45 min 12 mg辣椒素酯vs.安慰剂 胶囊	3000 m计时跑	完成时间↓	[32]
F5+M8经常运动成人	RCT(CR)	运动前45 min 辣果(含1.2 mg辣椒素)vs.酸果软糖 正常进食	约90%VO _{2max} 力竭骑行	力竭时间 1	[33]
M14成年业余跑者	RCT(CR)	运动前45 min 12 mg辣椒素vs.安慰剂 胶囊	90%VO _{2peak} 力竭跑	力竭时间 1	[34]
M21成年业余运动员	RCT(CR)	运动前45 min+0 min 24 mg辣椒素酯vs.安慰剂 胶囊	10 km计时跑	完成时间 1	[35]
M10经常运动青少年	RCT(CR)	运动前50 min 2.57 mg辣椒素类物质vs.安慰剂 胶囊	85%W _{peak} 力竭骑行	力竭时间 1	[36]

注: M代表男性或雌性, F代表女性或雌性; RCT(CR)代表随机交叉对照实验, RCT(PR)代表随机平行对照实验, 未标注RCT的PR代表一般平行对照或文献未明确有无随机分组; 干预方案的呈现模式为: 补充时间/周期 | 剂量 | 方式; BW-体重, VO_{2max}-最大摄氧量, VO_{2peak}-峰值摄氧量, W_{peak}-峰值功率; ↑或↓代表与对照组或安慰剂组相比有显著差异, 1代表与对照组或安慰剂组相比无显著差异, 结果部分标注括号代表仅在此剂量或时间下与对照或安慰剂组相比有显著差异。

现的作用效果可能与急性补充一样, 也受补充剂量、补充方式、干预对象特征等多种因素影响。在明确慢性辣椒主要提取物补充同样有益于机体有氧耐力表现的同时, 接下来还需要针对慢性干预的作用效果是否优于急性, 慢性干预产生作用的持续时间是否更长, 慢性干预的安全性是否更好(同等作用效果情况下长时间低剂量 vs. 急性较高剂量的副作用哪种更小)等问题进行研究, 才能进一步明确慢性干预的价值和意义。

动物实验呈现的良好效果引发了科研人员开展人体实验的广泛兴趣。从 2017 年开始, 共有 6 项急性研究探究了辣椒主要提取物补充对人体有氧耐力表现的影响(表 1), 其中 2 项研究呈现的结果与动物实验类似。如 de Freitas 等^[18] 针对 10 名经常参加运动成年男性的研究发现, 受试者服用 12 mg 辣椒素 45 min 后进行 1500 m 计时跑测试的完成时间要显著短于服用安慰剂情况。在另外一项有氧耐力表现评价采用 3000 m 计时跑的研究中, Costa 等^[32] 发现 12 mg 辣椒素酯服用同样能有效提升受试者的测试

成绩。不同于 de Freitas 等和 Costa 等的研究, 也有相当数量(4 项)的研究显示^[33-36], 辣椒主要提取物补充对人体有氧耐力表现的作用效果并不理想。

有关动物实验结果未能在人体实验当中很好复现的原因, 本研究认为其可能主要与以下几点有关: a. 辣椒主要提取物的补充时间差异。动物实验证实, 辣椒主要提取物的有效补充时间为运动前的 2~3 h, 而人体实验当中该类物质的补充时间大多为运动前的 45 min, 补充时间上的差异可能影响了该类物质的作用效果; b. 辣椒主要提取物的补充剂量差异。动物实验表明, 6~15 mg/kg BW 似乎是辣椒主要提取物提升机体有氧耐力表现的有效剂量, 而人体实验大多采用了 12 mg 的绝对剂量, 折算成相对剂量约为 0.2 mg/kg BW(假设受试者的平均体重约为 60 kg), 干预剂量远低于动物实验且易受研究对象体重的影响, 由此, 补充剂量上的巨大差异可能同样影响了该类物质的作用效果; c. 受试者特征上的差异。人体与动物虽具有许多共性特征, 但仍然存在诸多差异, 如人体实验中难以有效控制动机因素, 当受试者未全力

参与时,辣椒主要提取物的作用效果难以显现。针对上述问题,其一可以通过辣椒主要提取物的人体代谢实验,探究辣椒主要提取物的有效或者最佳补充时间(辣椒主要提取物摄入后血液当中相关物质浓度出现峰值的时间);其二可以通过“剂-效”关系实验,进一步确定辣椒主要提取物在人体实验中的有效或最佳干预剂量(尤其是有效相对剂量);最后,辣椒主要提取物在人体当中的作用效果大小还需要通过更加严谨的实验设计在控制动机等额外影响因素的前提下,进一步予以验证。另一方面,鉴于目前慢性干预人体实验的缺乏,未来还需进一步探究慢性辣椒主要提取物补充对人体有氧耐力表现的影响。

总体而言,辣椒主要提取物补充能够提升机体的有氧耐力表现,但其作用效果大小可能受补充剂量、时间、方式以及受试者特征等因素影响,对此,在使用辣椒主要提取物提升机体的有氧耐力表现时可能需要同时关注补充剂量、方式以及干预对象特征等因素的影响,以更好的发挥辣椒主要提取物的良好作用,如动物和人体实验的数据表明,辣椒主要提取物的人体干预现阶段可能可以采用 12 mg 的剂量,补充方式不宜采用皮下注射,受众群体应以成年健康受试者或运动员为主。

1.2 无氧表现

与有氧耐力表现一样,无氧表现也是机体需要的重要能力,如对于众多持续时间短(50 m 自由泳等)的运动项目而言,良好的无氧表现是其成功的关键^[37],对于众多持续时间较长的运动项目(篮球等)而言,比赛中良好的无氧表现可以帮助运动员在关键时刻处于有利位置,从而获得战胜对手的机会或优势^[38]。因此,辣椒主要提取物能否提升机体的无氧表现同样值得关注。目前尚无直接针对辣椒主要提取物与无氧表现的研究,但从一项辣椒素酯与 400 m 计时跑(无氧供能主导,测试强度与无氧表现的经典评价方式 Wingate 测试较为接近)的相关研究中似乎可以推测出两者的关系。在该项研究中,Costa 等^[32]让 12 名经常参加运动的成年男性受试者分别在 12 mg 的辣椒素酯和安慰剂服用 45 min 后参加 400 m 计时跑测试,研究结果显示,辣椒素酯服用后受试者 400 m 计时跑的测试成绩显著提升。由此可见,辣椒主要提取物的服用可能也有益于机体无氧表现的提升。尽管如此,鉴于上述研究结果仍属间接证据,未来还需采用无氧表现经典评价方式 Wingate 测试来直接验证两者的关系。在此基础上,辣椒主要提取物提升无氧表现的作用效果是否与有氧耐力表现一样,会受受试者特征、补剂补充特征(方式、时间、剂量)等因素影响,也有待进一步证实。

1.3 肌肉力量

众多证据显示(表 2),辣椒主要提取物补充可能同样有益于机体肌肉力量表现的提升。9 项研究探究了辣椒主要提取物补充对机体肌肉耐力表现的影

响^[16,39-46],其中接近一半的研究显示(4 项)^[16,41,43,46],辣椒主要提取物补充提升了机体的肌肉耐力表现。在这些研究中,较为典型的为 de Freitas 等^[16]针对人体的急性研究。在该项研究中,作者让有抗阻训练的 10 名成年男性受试者以随机、交叉的顺序分别完成 12 mg 的辣椒素或 50 mg 的淀粉补充(胶囊形式),随后参加 4 组 70%1RM 的力竭背蹲测试,测试的结果显示,辣椒素服用后受试者力竭背蹲的总完成重量(总重复次数 x 单次完成的重量)增加了 23.5%^[16]。不同于 de Freitas 等的研究,也有不少研究显示^[39,42,44-45],辣椒主要提取物补充难以提升机体的肌肉耐力表现。如 Simoes 等^[45]开展了一项 de Freitas 等的类似研究,同样探究了 12 mg 辣椒素补充对训练有素男性受试者 4 组 70%1RM 力竭背蹲测试的影响,发现辣椒素补充并不能有效增加受试者力竭背蹲测试的表现。

上述研究结果出现差异的原因一方面可能与受试者的训练水平高低有关,即训练水平高的受试者更加不易受到辣椒主要提取物等营养物质的影响。上述研究中 Simoes 等使用了平均训练年限为 4.5 年的受试者,其训练水平可能高于 de Freitas 等的研究(受试者的平均训练年限为 3.5 年),因此没有观察到辣椒主要提取物的作用效果。该推论已在多项其他营养物质与运动表现的相关研究中得到了证实。如 Saleh 等^[47]针对急性硝酸盐甜菜根晶体补充与不同训练水平受试者有氧耐力表现的研究发现,25 g 的硝酸盐甜菜根晶体补充能够显著提升无训练经验受试者的有氧耐力表现,但对有训练经验受试者的作用似乎不大。在另外一项针对急性咖啡因补充与不同训练水平受试者力量表现的研究中,Brooks 等^[48]也有类似发现。除了训练水平高低,上述研究结果出现差异的原因更有可能与不同受试群体对于辣椒主要提取物的敏感剂量存在差异有关。如 Kazuya 等^[41]探究了两种剂量(10 和 100 mg/kg)辣椒素酯补充对小鼠 6 min 腓肠肌重复等长收缩的影响,发现小鼠肌肉耐力表现提升的敏感剂量为 100 mg/kg。在另外一项肌肉耐力表现评价采用 4 组 70%1RM 力竭卧推的人体实验中,研究人员对比了 6 和 12 mg 两种剂量辣椒素酯补充的作用效果,发现 6 mg 是提升受试者肌肉耐力的敏感剂量^[46]。进一步的遗传学数据显示^[49-50],不同受试者对相关补剂的这种敏感程度差异,可能一定程度源于个体基因型方面的区别。基于此,在使用辣椒主要提取物提升运动员或健康人群的运动表现时,可能还需要进一步考虑受试者的运动训练水平以及个体或群体的敏感剂量差异(如训练水平高的受试者可能需要加大剂量,不同特征的受试群体应采用各自的敏感剂量干预),以提升该物质的作用效果。

与肌肉耐力相比,科研领域对肌肉最大力量的关注相对较少,到目前为止,只有 4 项相关研究探究

表 2 辣椒主要提取物对机体肌肉力量的影响
Table 2 Effects of main extracts of capsicum on muscular strength performance

样本情况	研究设计	干预方案	测试方案	结果	文献
动物实验-急性					
F14大鼠	RCT(PR)	运动前2 h 100 mg/kg辣椒素酯类物质vs.对照溶液 未说明	5.7 min腓肠肌重复等长收缩	AF 1	[39]
M40 三月龄小鼠	RCT(PR)	运动前2 h 10、100 mg/kg辣椒素酯vs.安慰剂 灌胃	6 min腓肠肌重复等长收缩	总峰值力↑和冲力↑(100)	[41]
动物实验-慢性					
F12大鼠	PR	14 d 100 mg/kg/d辣椒素酯类物质vs.对照溶液 未说明	5.7 min腓肠肌重复等长收缩	AF 1	[40]
M23三月龄小鼠	RCT(PR)	14 d 10、100 mg/kg/d辣椒素酯vs.对照溶液 灌胃	6 min腓肠肌重复等长收缩	AF 1、TF 1、FI 1	[42]
F32八周龄小鼠	RCT(PR)	28 d 205、410、1025 mg/kg/d辣椒素vs.赋形剂 灌胃	上肢抓握力量测试	最大力量(1025)↑	[29]
人体实验-急性					
M10抗阻训练成人	RCT(CR)	运动前45 min 12 mg辣椒素vs.安慰剂 胶囊	4组70%1RM力竭背蹲	完成总重量↑	[16]
M11业余抗阻训练成人	RCT(CR)	运动前45 min+0 min 24 mg辣椒素vs.安慰剂 胶囊	4组70%1RM力竭背蹲	完成总重量↑	[43]
F5+M4经常运动成人	RCT(CR)	运动前45 min 辣果(含1.2 mg辣椒素)vs.酸果软糖 实物	膝伸肌等速肌力测试	总扭矩 1、FI 1、峰值扭矩↑	[51]
M10经常运动青少年	RCT(CR)	运动前50 min 2.57 mg辣椒素类物质vs.安慰剂 胶囊	膝伸肌MVC测试	MVC 1、MRFD 1、VMA 1	[36]
M8经常运动健康成人	RCT(CR)	运动前45 min 12 mg辣椒素vs.安慰剂 胶囊	3组70%1RM力竭伸腿	运动重复次数 1	[44]
M11训练有素成人	RCT(CR)	运动前45 min 12 mg辣椒素vs.安慰剂 胶囊	4组70%1RM力竭背蹲	完成总重量 1	[45]
M13力量训练健康成人	RCT(CR)	运动前45 min 12 mg辣椒素酯vs.安慰剂 胶囊	5组膝伸肌MVC测试	峰值力↑、平均力↑、FI↑	[52]
M20力量训练健康成人	RCT(CR)	运动前45 min 6、12 mg辣椒素酯vs.安慰剂 胶囊	4组70%1RM力竭卧推	完成总重量(6)↑	[46]
M12巴西柔道运动员	RCT(CR)	运动前45 min 12 mg辣椒素vs.安慰剂 胶囊	4组60%BW自由卧推	MPO↑、PV↑	[53]

注: M代表男性或雌性, F代表女性或雌性; RCT(CR)代表随机交叉对照实验, RCT(PR)代表随机平行对照实验, 未标注RCT的PR代表一般平行对照或文献未明确有无随机分组; 干预方案的呈现模式为: 补充时间/周期 | 剂量 | 方式; 1RM-最大力量, AF-平均力, TF-总力量, MVC-最大自主收缩力量, MRFD-最大力量变化速率, VMA-自主肌肉激活, MPO-平均功率输出, PV-峰值速度, FI-疲劳指数; ↑代表与对照组或安慰剂组相比有显著差异, 1代表与对照组或安慰剂组相比无显著差异, 结果部分标注符号代表仅在此剂量或时间下与对照或安慰剂组相比有显著差异。

了辣椒主要提取物补充对机体肌肉最大力量的影响^[29,36,51-52], 涉及 1 项慢性动物实验, 3 项急性人体实验, 肌肉最大力量的评价方法包括上肢抓握力量测试(动物实验)、肌伸肌等速肌力测试、最大自主收缩力量(MVC)测试等, 研究的整体结果显示, 辣椒主要提取物补充能够提升机体的肌肉最大力量。此外, 最近的 1 项研究还探究了辣椒主要提取物补充对机体肌肉爆发力的影响。在该项研究中, da Silva 等^[53]发现 12 mg 的辣椒素服用能够显著提升巴西男性成年运动员自由卧推测试向心阶段的平均功率输出(MPO)和峰值速度(PV)。由此可见, 辣椒主要提取物的补充也能提高机体的肌肉爆发力表现。综合肌肉耐力、最大力量和爆发力的研究结果可知, 辣椒主要提取物补充可能能够有效提升机体的肌肉力量表现。基于该结果, 铅球、铁饼、举重等对肌肉力量需求较大的项目可能可以通过辣椒主要提取物的服用直接提升比赛成绩, 同时也可以通过辣椒主要提取物的服用优化每一次力量训练的效果, 间接提升比赛成绩。

1.4 高强度间歇运动表现

除了有氧耐力、无氧、肌肉力量等运动表现, 近年来还有个别研究人员开始关注辣椒主要提取物是否有益于高强度间歇运动表现的提升。2 项研究探究了辣椒主要提取物补充对机体高强度间歇运动表现的影响, 其中 1 项急性干预研究显示, 辣椒主要提

取物的补充可能有益于机体高强度间歇运动表现的提升。在该项研究中^[17], 作者让 13 名经常运动的成年男性分别在 12 mg 的辣椒素和等剂量的淀粉服用后, 参加 15 s:15 s 的高强度间歇跑测试(15 s 120% VO_{2peak} 强度跑步:15 s 被动恢复, 直至不能保持相应强度), 并记录受试者两种情况的持续时间和完成轮数, 结果显示, 辣椒素服用后受试者高强度间歇测试的力竭时间和完成轮数显著高于淀粉服用情况。然而, 另外一项慢性干预研究却得到了不一致的结论。在该研究中, Opheim 等^[54]让 19 名健康成年男性分别在 7 d 25.8 mg/d 的辣椒素和等剂量的安慰剂服用后以最快的速度完成 15 轮含有 35 s 恢复间歇的 30 m 冲刺(15 轮×30 m-35 s 恢复), 期间记录单轮最佳冲刺时间、平均冲刺时间和疲劳指数等指标, 研究结果显示, 7 d 25.8 mg/d 的辣椒素补充并不能提升受试者的高强度间歇运动表现。对于该结果, 作者认为其可能与辣椒素的服用剂量过高有关, 即过高剂量的辣椒素补充易使受试者产生不适(作者的研究显示, 7 d 25.8 mg/d 的辣椒素补充使受试者肠道不适的得分或发生概率较对照情况提高了 6.3 倍), 从而抵消了辣椒素的积极作用。对此, 避免剂量过高导致副作用的出现, 也是辣椒主要提取物应用时需要注意的问题。综合上述证据可以看出, 合适剂量的辣椒主要提取物补充可能同样有益于机体高强度间歇运动表现的提

升。基于上述证据,足球、篮球、网球等间歇性运动项目,可能可以通过辣椒主要提取物的服用直接提升高强度间歇运动表现,增加比赛获胜的概率;对于健康人群,可以通过辣椒主要提取物的补充进一步强化高强度间歇训练的效果,从而获得更多的健康收益(如提升减脂效果)。

2 辣椒主要提取物提升运动表现的潜在机制

2.1 短时间高强度运动表现

肌肉爆发力、最大力量、无氧等短时间高强度运动表现的提升,可能主要与辣椒主要提取物提升肌浆网的 Ca^{2+} 离子浓度和促进神经肌肉接头乙酰胆碱的释放有关(图 1)。研究显示^[52-53,55],辣椒主要提取物服用后能够与机体肌浆网附近和神经肌肉接头处的瞬时受体电位香草酸亚型 1 (TRPV1)受体结合,引起肌浆网处的 Ca^{2+} 离子浓度和神经肌肉接头处的乙酰胆碱释放增加,从而提高肌肉肌动蛋白与肌球蛋白之间的相互作用,最终增加肌肉产生力量的能力。该机制也得到了多项研究的一定程度证实。如 Luo 等^[28]探究了急性辣椒素补充对小鼠骨骼肌 TRPV1 激活和 Ca^{2+} 离子释放的影响,发现辣椒素服用能够使小鼠肌小管内的 Ca^{2+} 离子显著增长,并且当使用 iRTX (TRPV1 拮抗剂)阻塞 TRPV1 受体时,这种现象受到抑制。在人体实验中, Purba 等^[56]通过 22 名 12~17 岁的青少年足球运动员探究了血清钙浓度与下肢肌肉力量的关系,并对两者进行了简单线性回归分析,发现血清钙浓度每提高 2 mg/dl,会使下肢肌肉

力量提升约 13.07 kg。综上,肌肉爆发力、最大力量、无氧等短时间高强度运动表现的提升,可能源于辣椒主要提取物对肌浆网 Ca^{2+} 离子和神经肌肉接头乙酰胆碱释放的促进作用。

2.2 长时间次高强度运动表现

2.2.1 抗氧化作用 有氧耐力、肌肉耐力、高强度间歇运动等长时间次高强度运动表现的提升,可能主要与辣椒主要提取物的抗氧化、抗炎、镇痛、扩血管、增加脂肪供能水平等作用有关(图 1)。抗氧化作用可能是辣椒主要提取物提升长时间次高强度运动表现的重要机制。研究显示^[57-61],当机体进行长时间的次高强度运动(如力竭运动、长时间肌肉训练)时,体内会产生大量的自由基(如活性氧 ROS),过高浓度的自由基会让机体处于氧化应激状态,进而破坏脂质、蛋白和 DNA 的结构,导致衰老、疾病、肌肉损伤、肌肉疲劳和运动表现下降等一系列症状或疾病出现。辣椒主要提取物被证明具有较好的抗氧化作用,其能减轻氧化应激引起的肌肉损伤和运动表现下降^[1,27]。如郭时印^[27]的研究发现,持续 28 d 每天 6~15 mg/kg BW 剂量的辣椒素灌胃能够显著提升小鼠 90 min 游泳后肝脏组织中的 SOD 和 GSH-Px 活性(超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶,反映机体抗氧化能力),显著降低肝脏组织中的 MDA 含量(丙二醛,氧化应激产物)和血浆中的 CK 和 CK-MB 浓度(肌酸激酶和肌酸激酶同工酶,反映肌细胞损伤),即 28 d 的辣椒素灌胃提升了小鼠的抗氧化能

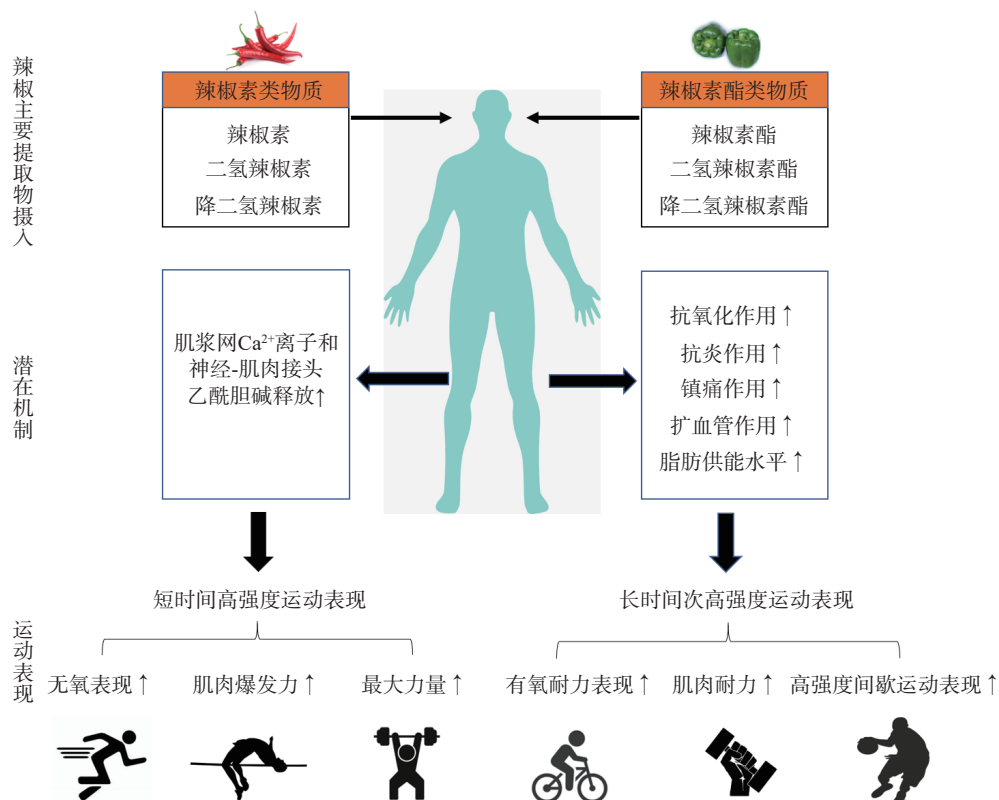


图 1 辣椒主要提取物对机体运动表现的影响及潜在机制^[16,18,32,43,46,51-53,55]

Fig.1 Effects of main extracts of capsicum on exercise performance and its potential mechanisms^[16,18,32,43,46,51-53,55]

力,减轻了大强度运动导致的氧化应激水平,降低了氧化应激引起的肌肉组织损伤。Kogure 等^[62]探究了辣椒素对 ADP/Fe²⁺诱导的大鼠肝脏线粒体脂质过氧化反应(氧化应激反应)的影响,发现辣椒素能够显著抑制肝脏线粒体的脂质过氧化反应,并且相关的数据还显示其发挥的抗氧化作用要优于经典的抗氧化剂维生素 E。综上,辣椒主要提取物的服用可能会通过增强机体的抗氧化能力,提升长时间次高强度运动表现。

2.2.2 抗炎作用 抗炎作用可能是辣椒主要提取物提升长时间次高强度运动表现的另一重要机制。大量的研究显示^[58,63-65],长时间的次高强度运动除了会导致氧化应激反应,还会使机体产生严重的炎症反应,主要表现为肌肉组织结构紊乱、肌细胞凋亡、炎症细胞浸润、血液中 CRP(C 反应蛋白)、TNF- α (肿瘤坏死因子)、IL-6(白细胞介素 6)和 IL-1 β (白细胞介素 1 β)等促炎因子显著增加。近年来,相关证据证实,炎症反应的加剧会导致疲劳的发生^[66],进而会降低机体的运动表现。辣椒主要提取物具有较好的抗炎作用。动物实验表明^[1,6],辣椒素补充能够提高抗炎因子 IL-10(白介素 10)和抑制促炎因子 IL-1 β 、IL-8(白介素 8)的表达,对许多炎症相关疾病(如胃炎)具有良好的治疗效果,并且其产生的治疗效果不亚于吲哚美辛等一些专业的医用抗炎药物。在人体实验中,近期的一项研究同样发现了辣椒素类物质的抗炎作用。在该项研究中,Giuriato 等^[36]让 10 名经常运动的青少年分别在 2.57 mg 的辣椒素类物质(辣椒素+二氢辣椒素)或安慰剂服用后,参加 85% W_{peak}(最大功率)的力竭骑行,并在力竭运动后的不同时间点测定了唾液中的炎症因子水平,发现辣椒素类物质的服用显著降低了受试者力竭运动后促炎因子 IL-1 β 的水平。综上,辣椒主要提取物的服用可能也会通过增强机体的抗炎能力,提升长时间次高强度运动表现。

2.2.3 镇痛作用 辣椒主要提取物还有可能通过镇痛作用提升机体的长时间次高强度运动表现。在临床上,辣椒素常被用于减轻骨关节炎、类风湿关节炎、糖尿病神经病变、带状疱疹后遗神经痛等一系列疾病带来的慢性疼痛或神经性疼痛^[1,6]。一项针对 402 名带状疱疹后遗神经痛病人的临床干预研究显示,60 min 8% 浓度的辣椒素干预可以快速显著地降低受试者的疼痛感,并且这种良好效果可以持续至少 12 周^[67]。在运动领域,辣椒主要提取物可能同样有助于减轻长时间次高强度运动引起的肌肉疼痛和主观不适。如 de Freitas 等^[16,18,43]的多项研究均显示,12~24 mg 的辣椒素服用能够显著降低受试者 4 组 70%1RM 力竭背蹲、1500 m 计时跑、5 km 高强度间歇跑等长时间次高强度运动后的 RPE(主观努力感知)值。根据 Pageaux 等^[68]的研究,运动过程中较低的 RPE 值往往有助于受试者运动的更为长久。

有关辣椒主要提取物发挥镇痛作用的具体机制,de Moura 等^[55]认为,其可能与辣椒主要提取物激活脑部的 TRPV1 受体,产生 Ca²⁺过载,使主要传入神经末梢失活或脱敏有关。

2.2.4 扩血管作用 辣椒主要提取物对长时间次高强度运动表现的正面影响可能也与该类物质的扩血管作用有关。Yang 等^[69]针对细胞和动物的离体和在体实验显示,长期摄入含有辣椒素的膳食能够持续激活 TRPV1 通道,促进蛋白激酶 A(PKA)和内皮一氧化氮合酶(eNO)磷酸化,从而使内皮细胞一氧化氮(NO)产生增多,最后导致血管舒张。运动过程中,血管舒张有利于工作肌肉/肌群获得更多的血流量,这直接提升了工作肌群氧气和营养物质的供应能力以及代谢产物的清除效率^[7,70]。由此,辣椒主要提取物的补充可能会通过扩血管作用,增强工作肌群的能量供应和恢复能力,使机体的运动表现得到提升。该推论一定程度得到了 Haramizu 等^[26]的支持。在他的研究中,作者把 5 周龄的雄性 BALB/c 小鼠随机分成实验组和安慰剂组两组,并让这些小鼠分别在灌胃辣椒素酯和对照溶液后进行 30 min 的游泳,游泳结束,取颈静脉血液测定血乳酸等代谢产物水平,研究结果显示,实验组小鼠运动后的血乳酸水平显著低于对照组。由此可见,辣椒素酯的服用加速了机体运动过程血乳酸等代谢产物的清除。

2.2.5 增加脂肪供能水平 除了上述机制,增加脂肪供能水平在辣椒主要提取物提升长时间次高强度运动表现的众多机制中同样占有一席之地。多项早期的研究指出^[12-13,26],辣椒主要提取物的服用还能通过 TRPV1 受体激活,增加儿茶酚胺(肾上腺素、去甲肾上腺素)分泌,促进脂肪分解,提高脂肪酸利用率等一系列过程,更大程度地动员脂肪供能,实现机体长时间次高强度运动表现的提升。Oh 等^[14-15]的研究一定程度印证了上述观点,他的研究在明确 15 mg/kg 辣椒素提升长时间次高强度运动表现的同时,进一步比较了辣椒素和安慰剂服用时大鼠安静、30 min 游泳运动后、力竭即刻三个时间点血液当中儿茶酚胺、血糖、自由脂肪酸等指标的浓度以及肝脏和腓肠肌中糖原含量的差异,研究结果显示,辣椒素的服用能够显著提升大鼠安静、30 min 游泳运动后和力竭即刻三个时间点血液中的去甲肾上腺素浓度,能够显著提升大鼠 30 min 游泳运动后和力竭即刻两个时间点血液中的血糖和游离脂肪酸浓度以及腓肠肌中的糖原含量,能够显著提升大鼠 30 min 游泳运动后血液中的肾上腺素浓度和肝脏中的糖原含量。基于上述研究证据可以推测,辣椒主要提取物引起的脂肪供能水平增加,可能提升了机体运动时的能量供应能力,从而带来了良好的运动表现收益。

3 辣椒主要提取物服用的安全性考量

众多证据显示^[7,43,71],辣椒主要提取物的服用相对较为安全。尽管如此,也有少部分研究显示,辣椒

主要提取物的服用可能会带来一定程度的副作用。如 Opheim 等^[54]的研究发现,持续 7 d 每天 25.8 mg 的辣椒素补充会使受试者产生肠痉挛、腹泻、恶心呕吐、肠胃胀气、胃不舒适等一系列症状。de Freitas 等^[17]的研究指出,每天超过 33 mg 的辣椒素类物质服用,可以增加受试者的胃蠕动(gastric motility)水平,从而带来不适。针对辣椒主要提取物可能产生的副作用,一方面,科研人员或教练员在使用该物质开展人体实验和提升健康人群/运动员的运动表现时应严格把控剂量,根据现有研究(表 1 和表 2),1.5~24 mg 的剂量似乎是人体急性补充可耐受的安全剂量;另一方面,考虑到辣椒主要提取物副作用的产生主要源于辣椒素类物质,对此,未来在使用辣椒主要提取物开展实验或实践应用时可以更多地采用安全性更高的辣椒素酯类物质。

4 总结与展望

本研究对近二十年辣椒主要提取物与运动表现的相关研究进行了较为系统的梳理和综述,研究结果显示,辣椒主要提取物补充有益于机体有氧耐力、无氧、肌肉力量、高强度间歇等运动表现的提升,其中肌肉爆发力、最大力量、无氧等短时间高强度运动表现的提升,机制涉及该物质带来的肌浆网 Ca^{2+} 离子浓度增高和神经肌肉接头乙酰胆碱释放,有氧耐力、肌肉耐力、高强度间歇运动等长时间次高强度运动表现的提升,机制涉及该类物质产生的抗氧化、抗炎、镇痛、扩血管、增加脂肪供能水平等作用。基于上述结果,辣椒主要提取物在运动领域可能具有广泛的应用前景,如运动员或大众人群可以通过辣椒主要提取物的补充增强运动表现的训练效果,也可以通过辣椒主要提取物的补充提升比赛表现,增加比赛获胜的概率和运动锻炼的健康收益。

现有研究主要基于正常环境下的动物实验探究了急性辣椒主要提取物补充对机体有氧耐力、无氧、肌肉力量、高强度间歇运动等运动表现的影响,所涉及的运动表现类型、受试群体、实验场景等较为有限,使用的辣椒主要提取物成分、干预方式、剂量等较为单一,且未能明确急性与慢性干预的机制异同。对此,辣椒主要提取物与机体运动表现未来的研究需要聚焦更多运动类型(如灵敏、平衡)、受试群体(如女性、运动员)、特殊环境(高温、高湿)、慢性干预、剂-效关系、机制确认、辣椒素酯类物质的应用等方面。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] LU M, CHEN C, LAN Y, et al. Capsaicin-the major bioactive ingredient of chili peppers: Bio-efficacy and delivery systems[J]. Food & Function, 2020, 11(4): 2848–2860.
- [2] CROSBY K M. Vegetables II: Fabaceae, Liliaceae, Solanaceae, and Umbelliferae[M]. New York: Springer, 2008: 221–248.
- [3] SINGLETARY K. Red pepper: Overview of potential health benefits[J]. Nutrition Today, 2011, 46(1): 33–47.
- [4] 刘新华, 曹春信, 王东飞, 等. 辣椒降糖机制研究进展[J]. 辣椒杂志, 2021, 19(4): 1–4, 30. [LIU X H, CAO C X, WANG D F, et al. Research progress of hypoglycemic mechanism of capsicum[J]. Journal of China Capsicum, 2021, 19(4): 1–4, 30.]
- [5] LIMA F S, ROSSI F E, GON ALVES D C, et al. Can capsaicinoids and their analogs affect energy expenditure and substrate oxidation during exercise? A systematic review with acute studies[J]. Human Nutrition & Metabolism, 2022, 29: 200156.
- [6] SRINIVASAN K. Biological activities of red pepper (*Capsicum annuum*) and its pungent principle capsaicin: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(9): 1488–1500.
- [7] GRGIC J, MEMON A R, CHEN S, et al. Effects of capsaicin and capsiate on endurance performance: A meta-analysis[J]. Nutrients, 2022, 14(21): 4531.
- [8] 臧宇凡, 秦虹. 辣椒素酯生理功能及机制研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 289–294. [ZANG Y F, QIN H. Progress in research on physiological functions and mechanisms of capsinoids[J]. Food Science, 2019, 40(5): 289–294.]
- [9] CIANCHETTI C. Capsaicin jelly against migraine pain[J]. International Journal of Clinical Practice, 2010, 64(4): 457–459.
- [10] SATYANARAYANA M N. Capsaicin and gastric ulcers[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2006, 46(4): 275–328.
- [11] ZHENG J, ZHENG S, FENG Q, et al. Dietary capsaicin and its anti-obesity potency: From mechanism to clinical implications[J]. Bioscience Reports, 2017, 37(3): BSR20170286.
- [12] KIM K M, KAWADA T, ISHIHARA K, et al. Increase in swimming endurance capacity of mice by capsaicin-induced adrenal catecholamine secretion[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1997, 61(10): 1718–1723.
- [13] KIM K M, KAWADA T, ISHIHARA K, et al. Swimming capacity of mice is increased by oral administration of a nonpungent capsaicin analog, stearyl vanillylamide[J]. The Journal of Nutrition, 1998, 128(11): 1978–1983.
- [14] OH T W, OHTA F. Dose-dependent effect of capsaicin on endurance capacity in rats[J]. The British Journal of Nutrition, 2003, 90(3): 515–520.
- [15] OH T W, OHTA F. Capsaicin increases endurance capacity and spares tissue glycogen through lipolytic function in swimming rats[J]. Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 2003, 49(2): 107–111.
- [16] DE FREITAS M C, CHOLEWA J M, FREIRE R V, et al. Acute capsaicin supplementation improves resistance training performance in trained men[J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2018, 32(8): 2227–2232.
- [17] DE FREITAS M C, BILLAUT F, PANISSA V L G, et al. Capsaicin supplementation increases time to exhaustion in high-intensity intermittent exercise without modifying metabolic responses in physically active men[J]. European Journal of Applied Physiology, 2019, 119(4): 971–979.
- [18] DE FREITAS M C, CHOLEWA J M, GOBBO L A, et al. Acute capsaicin supplementation improves 1,500-m running time-trial performance and rate of perceived exertion in physically active adults[J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2018, 32

- (2): 572–577.
- [19] CROWLEY E, POWELL C, CARSON B P, et al. The effect of exercise training intensity on VO_{2max} in healthy adults: An overview of systematic reviews and meta-analyses [J]. *Translational Sports Medicine*, 2022; 9310710.
- [20] WEN D, UTESCH T, WU J, et al. Effects of different protocols of high intensity interval training for $VO_{(2)max}$ improvements in adults: A meta-analysis of randomised controlled trials[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2019, 22(8): 941–947.
- [21] RUOTSALAINEN I, GORBACH T, PERKOLA J, et al. Physical activity, aerobic fitness, and brain white matter: Their role for executive functions in adolescence[J]. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2020, 42: 100765.
- [22] ÁLVAREZ-BUENO C, HILLMAN C H, CAVERO-REDONDO I, et al. Aerobic fitness and academic achievement: A systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2020, 38(5): 582–589.
- [23] REINHARDT L, SCHULZE S, KURZ E, et al. An investigation into the relationship between heart rate recovery in small-sided games and endurance performance in male, semi-professional soccer players[J]. *Sports Medicine-Open*, 2020, 6(1): 43.
- [24] VIANA E, BENTLEY D J, LOGAN-SPRENGER H M. Relationship between VO_{2max} under water swim testing and artistic swim solo performance[J]. *Sports Medicine International Open*, 2020, 4(1): E27–E31.
- [25] KIM K M, KAWADA T, ISHIHARA K, et al. Inhibition by a capsaicin antagonist (capsazepine) of capsaicin-induced swimming capacity increase in mice[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 1998, 62(12): 2444–2445.
- [26] HARAMIZU S, MIZUNOYA W, MASUDA Y, et al. Capsiate, a nonpungent capsaicin analog, increases endurance swimming capacity of mice by stimulation of vanilloid receptors[J]. *Bio-science, Biotechnology, and Biochemistry*, 2006, 70(4): 774–781.
- [27] 郭时印. 辣椒素抗疲劳作用及其机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009. [GUO S Y. Studies on the antifatigue effects of capsaicin on mice and its mechanisms[D]. Changsha: Central South University, 2009.]
- [28] LUO Z, MA L, ZHAO Z, et al. TRPV1 activation improves exercise endurance and energy metabolism through PGC-1 α upregulation in mice[J]. *Cell Research*, 2012, 22(3): 551–564.
- [29] HSU Y J, HUANG W C, CHIU C C, et al. Capsaicin supplementation reduces physical fatigue and improves exercise performance in mice[J]. *Nutrients*, 2016, 8(10): 648.
- [30] 刘少华. 辣椒素对运动抗疲劳及生化指标的影响研究[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2018, 41(4): 54–58. [LIU S H. Impacts of capsaicin on anti-fatigue and biochemical indexes after exercise training[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2018, 41(4): 54–58.]
- [31] DOUSSET E, MARQUESTE T, DECHERCHI P, et al. Effects of neonatal capsaicin deafferentation on neuromuscular adjustments, performance, and afferent activities from adult tibialis anterior muscle during exercise[J]. *Journal of Neuroscience Research*, 2004, 76(5): 734–741.
- [32] COSTA L A, FREITAS M C, CHOLEWA J M, et al. Acute capsaicin analog supplementation improves 400 m and 3000 m running time-trial performance[J]. *International Journal of Exercise Science*, 2020, 13(2): 755–765.
- [33] LANGAN S P, GROSICKI G J. Commercially available capsaicin supplement fails to enhance time-to-exhaustion during cycling[J]. *International Journal of Exercise Science*, 2020, 13(2): 225–233.
- [34] PADILHA C S, BILLAUT F, FIGUEIREDO C, et al. Capsaicin supplementation during high-intensity continuous exercise: A double-blind study[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2020, 41(14): 1061–1066.
- [35] VON AH MORANO A E, PADILHA C S, SOARES V A M, et al. Capsaicin analogue supplementation does not improve 10 km running time-trial performance in male amateur athletes: A randomized, crossover, double-blind and placebo-controlled study[J]. *Nutrients*, 2020, 13(1): 34.
- [36] GIURIATO G, VENTURELLI M, MATIAS A, et al. Capsaicin and its effect on exercise performance, fatigue and inflammation after exercise[J]. *Nutrients*, 2022, 14(2): 232.
- [37] KACHAUNOV M, PETROV L. Upper body anaerobic power and freestyle swimming performance[J]. *Journal of Physical Education and Sport*, 2020, 20(4): 1957–1963.
- [38] MANCHA-TRIGUERO D, GARC A-RUBIO J, CALLEJA-GONZ LEZ J, et al. Physical fitness in basketball players: A systematic review[J]. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 2019, 59(9): 1513–1525.
- [39] FARAUT B, GIANNESINI B, MATARAZZO V, et al. Downregulation of uncoupling protein-3 *in vivo* is linked to changes in muscle mitochondrial energy metabolism as a result of capsiate administration[J]. *American Journal of Physiology Endocrinology and Metabolism*, 2007, 292(5): E1474–82.
- [40] FARAUT B, GIANNESINI B, MATARAZZO V, et al. Capsiate administration results in an uncoupling protein-3 downregulation, an enhanced muscle oxidative capacity and a decreased abdominal fat content *in vivo*[J]. *International Journal of Obesity*, 2009, 33(12): 1348–1355.
- [41] KAZUYA Y, TONSON A, PECCHI E, et al. A single intake of capsiate improves mechanical performance and bioenergetics efficiency in contracting mouse skeletal muscle[J]. *American Journal of Physiology Endocrinology and Metabolism*, 2014, 306(10): E1110–9.
- [42] YASHIRO K, TONSON A, PECCHI É, et al. Capsiate supplementation reduces oxidative cost of contraction in exercising mouse skeletal muscle *in vivo*[J]. *PloS One*, 2015, 10(6): e0128016.
- [43] DE FREITAS M C, CHOLEWA J M, PANISSA V L G, et al. Acute capsaicin supplementation improved resistance exercise performance performed after a high-intensity intermittent running in resistance-trained men[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2019, 36(1): 130–134.
- [44] VOLINO-SOUZA M, DE OLIVEIRA G V, DE CARVALHO I H, et al. Capsaicin supplementation did not increase skeletal muscle oxygen saturation and muscular endurance during resistance exercise: A randomized and crossover study[J]. *Sport Sciences for Health*, 2022, 19(3): 889–895.
- [45] SIMOES C B, GOMES P L C, SILVA R A, et al. Acute caffeine and capsaicin supplementation and performance in resistance training[J]. *Motriz: Revista de Educação Física*, 2022, 28: e1021010121.
- [46] DOS SANTOS NUNES D E M H P, CHOLEWA J M, J GER R, et al. Acute low-dose capsiate supplementation improves upper body resistance exercise performance in trained men: A randomized, crossover and double-blind study[J]. *International Journal of Exercise Science*, 2022, 15(2): 1007–1018.
- [47] SALEH M M, DEV R D O, LINOBY A, et al. Endurance

performance with acute ingestion of dietary nitrate supplementation in trained and untrained individuals[J]. *Journal of Physical Education and Sport*, 2023, 23(8): 2023–2033.

[48] BROOKS J H, WYLD K, CHRISMAS B C. Acute effects of caffeine on strength performance in trained and untrained individuals[J]. *Journal of Athletic Enhancement*, 2015, 4: 6.

[49] 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.

[50] GRGIC J, PICKERING C, BISHOP D J, et al. ADOR2A C allele carriers exhibit ergogenic responses to caffeine supplementation[J]. *Nutrients*, 2020, 12(3): 741.

[51] CROSS B L, PARKER D, LANGAN S P, et al. Effect of a commercially available low-dose capsaicin supplement on knee extensor contractile function[J]. *International Journal of Exercise Science*, 2020, 13(2): 312–318.

[52] DOS SANTOS GOMES W, DE FREITAS M C, DUTRA Y M, et al. Effects of capsiate supplementation on maximal voluntary contraction in healthy men[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2022, 43(5): 466–472.

[53] DA SILVA B V C, MOTA G R, MAROCOLO M, et al. Acute supplementation with capsaicin enhances upper-limb performance in male Jiu-Jitsu athletes[J]. *Sports*, 2022, 10(8): 120.

[54] OPHEIM M N, RANKIN J W. Effect of capsaicin supplementation on repeated sprinting performance[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2012, 26(2): 319–326.

[55] DE MOURA E S V E L, CHOLEWA J M, BILLAUT F, et al. Capsaicinoid and capsinoids as an ergogenic aid: A systematic review and the potential mechanisms involved[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2021, 16(4): 464–473.

[56] PURBA A, TARIGAN B. Essential role of serum calcium for muscle strength in football athletes[C]. Mexico City: IOP Publishing, 2017: 012186.

[57] BENTLEY D J, ACKERMAN J, CLIFFORD T, et al. Acute and chronic effects of antioxidant supplementation on exercise performance[M]. Boca Raton FL: CRC Press, 2015: 141.

[58] 吴秀琴, 杨威, 尹玉娇, 等. 茶多酚对一次性力竭运动大鼠氧化应激和炎症反应的影响[J]. *中国体育科技*, 2016, 52(1): 92–95.

[WU X Q, YANG W, YIN Y J, et al. The effects of tea polyphenols on oxidative stress and inflammatory response in rats after exhaustive exercise[J]. *China Sport Science and Technology*, 2016, 52(1): 92–95.]

[59] FINAUD J, LAC G, FILAIRE E. Oxidative stress: Relationship with exercise and training[J]. *Sports Medicine*, 2006, 36(4): 327–358.

[60] FINKLER M, LICHTENBERG D, PINCHUK I. The relationship between oxidative stress and exercise[J]. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, 2014, 25(1): 1–11.

[61] PINGITORE A, LIMA G P, MASTORCI F, et al. Exercise and oxidative stress: Potential effects of antioxidant dietary strategies in sports[J]. *Nutrition*, 2015, 31(7-8): 916–922.

[62] KOGURE K, GOTO S, NISHIMURA M, et al. Mechanism of potent antiperoxidative effect of capsaicin[J]. *Biochimica Et Biophysica Acta*, 2002, 1573(1): 84–92.

[63] CERQUEIRA É, MARINHO D A, NEIVA H P, et al. Inflammatory effects of high and moderate intensity exercise-A systematic review[J]. *Frontiers in Physiology*, 2019, 10: 1550.

[64] 刘宏亮, 凌琳, 丹参酮 II_A 对一次性力竭运动大鼠血清炎症因子水平的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2012, 31(11): 999–1002. [LIU H L, LIN L. The change in serum inflammatory cytokines level after exhaustive exercise based on administration of tanshinone II_A[J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2012, 31(11): 999–1002.]

[65] HA S M, KIM J H, KIM J W, et al. The potential role of Korean mistletoe extract as an anti-inflammatory supplementation [J]. *Journal of Immunology Research*, 2021: 2183427.

[66] KARSHIKOFF B, SUNDELIN T, LASSELIN J. Role of inflammation in human fatigue: Relevance of multidimensional assessments and potential neuronal mechanisms[J]. *Frontiers in Immunology*, 2017, 8: 21.

[67] BACKONJA M, WALLACE M S, BLONSKY E R, et al. NGX-4010, a high-concentration capsaicin patch, for the treatment of postherpetic neuralgia: A randomised, double-blind study[J]. *The Lancet Neurology*, 2008, 7(12): 1106–1112.

[68] PAGEAUX B, LEPERS R, DIETZ K C, et al. Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2014, 114(5): 1095–1105.

[69] YANG D, LUO Z, MA S, et al. Activation of TRPV1 by dietary capsaicin improves endothelium-dependent vasorelaxation and prevents hypertension[J]. *Cell Metabolism*, 2010, 12(2): 130–141.

[70] BESC S R, SUREDA A, TUR J A, et al. The effect of nitric oxide-related supplements on human performance[J]. *Sports Medicine*, 2012, 42(2): 99–117.

[71] VOLPE S L. Capsaicin and exercise performance[J]. *ACSM's Health & Fitness Journal*, 2020, 24(3): 31–32.