

文章编号: 1004-7220(2023)01-0202-07

经颅直流电刺激对下肢耐力表现影响的系统综述

沈斌, 肖松林, 于常晓, 王宝峰, 傅维杰

(上海体育学院 运动健身科技省部共建教育部重点实验室, 上海 200438)

摘要: 下肢疲劳是影响运动表现的重要因素之一, 如何提升下肢在耐力运动过程中的抗疲劳能力是人体运动生物力学研究领域的重点。本文对经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS) 干预下肢耐力表现的相关文献进行系统综述, 总结 tDCS 干预下肢耐力表现的效果, 分析影响因素及潜在机制。结果发现: tDCS 干预对下肢整体耐力表现有显著影响, 对膝关节耐力表现的影响无统一结论, 研究人员认为 tDCS 可提高初级运动皮层兴奋性从而降低辅助运动区激活, 在耐力运动中产生更低的主观感觉疲劳分级, 但却无法影响耐力运动中肌肉疼痛感知, 且各研究中刺激方案不一, 可能是部分原因。本研究可为探究 tDCS 提升耐力表现的中枢机制、针对不同人群制定康复和运动训练方案及开发新型刺激设备以增强人体抗疲劳能力提供理论依据。

关键词: 经颅直流电刺激; 下肢; 耐力表现; 膝关节

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.01.030

Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on Endurance Performance of Lower Limbs: A Systematic Review

SHEN Bin, XIAO Songlin, YU Changxiao, WANG Baofeng, FU Weijie

(Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: Sports fatigue of the lower limbs is one of the important factors affecting sports performance. How to improve the anti-fatigue ability of the lower limbs during endurance exercise is the focus of the research field of human sports biomechanics. This study systematically reviewed the relevant literature about transcranial direct current stimulation (tDCS) intervention on lower limb endurance performance, summarized the effects of tDCS on lower limb endurance performance, and analyzed the influencing factors and potential mechanisms. The results show that tDCS intervention has a significant effect on the endurance performance of the whole lower limbs, but there is no unified conclusion about the effect on endurance performance of the knee joint. The researchers deem that tDCS can increase the excitability of the primary motor cortex and reduce the activation of the supplementary motor area and premotor area, and a lower rating of perceived exertion is produced during endurance exercise, but cannot affect the perception of exercise-induced pain, and stimulation protocols varied across studies, which may be partly responsible. This study can provide a theoretical basis for exploring the central mechanism of tDCS to improve endurance performance, formulating rehabilitation and sports training programs for different groups of people, and developing new stimulation equipment to enhance the human body's anti-fatigue ability.

Key words: transcranial direct current stimulation (tDCS); lower limbs; endurance performance; knee joint

收稿日期: 2021-12-08; 修回日期: 2022-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(12272238, 11932013), 上海市青年拔尖人才开发计划

通信作者: 傅维杰, 教授, 博士生导师, E-mail: fuweijie@sus.edu.cn

疲劳是影响运动表现的重要因素之一。下肢的运动疲劳会导致下肢力学特征改变,同时也伴随着平衡功能、本体感觉功能下降,这些改变严重制约健康成年人尤其是运动员获得更好的运动表现与竞技成绩^[1-5]。因此,如何提升下肢在耐力运动过程中的抗疲劳能力是人体运动生物力学研究领域的重点。

现阶段,经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)作为一项非侵入式神经调控技术,能依据刺激电极的极性不同引起神经元静息膜电位超极化或去极化的改变,从而降低或增加神经兴奋性,并因其安全、价廉以及较易控制刺激参数等优点被广泛应用于诸多领域^[6]。近年来,上述技术已作为一项神经生物力学增能技术被引入提升人体能力的研究中,如 tDCS 能提高初级运动皮层兴奋性、提升平衡表现、加快动作学习等^[7-10]。在耐力表现方面,目前研究多为在实验室中进行上肢或下肢单关节的运动测试,以探究单次 tDCS 对耐力表现的影响。研究表明, tDCS 可显著提升耐力运动的任务失败时间(time to task failure, TTF)^[11-14];然而,也有部分研究认为, tDCS 未能提升耐力运动的 TTF^[15-16]。此外,仅有少量研究结合脑成像技术探究 tDCS 作用的皮质层面机制,认为 tDCS 是通过提高皮质脊髓兴奋性而改善耐力表现^[12, 14, 17];但也有研究表明,耐力表现的提升与皮质脊髓兴奋性无显著性关联^[11]。由此可见,目前对于 tDCS 影响耐力表现的结果存在不一致,其潜在的可能机制尚不明确。而现有综述只是总结 tDCS 对上下肢综合运动能力(如肌力、耐力、爆发力等)的结果,未能形成精准调控某项表现的短、长期刺激方案,缺乏针对 tDCS 干预下肢某项重要能力(如耐力)的系统性总结与潜在机制探讨^[18-19]。

本文通过检索国内外关于 tDCS 干预健康成年人下肢耐力表现的文献,对纳入研究进行系统评价,总结 tDCS 对下肢整体和下肢单一关节(膝、踝)耐力表现的影响;并结合纳入文献的实验设计,探讨 tDCS 影响下肢耐力表现的潜在机制和不同刺激方案的可能作用,旨在为 tDCS 干预下肢耐力表现的研究提供一定参考。

1 方法

1.1 检索策略

在英文数据库 PubMed、Web of Science、EBSCO、ScienceDirect 和中文数据库 CNKI、万方中以关键词进行检索,时间为建库截至 2021 年 12 月,英文检索关键词为(“endurance” OR “fatigue”) AND (“tDCS” OR “transcranial direct current stimulation”) AND (“leg” OR “lower limb” OR “knee” OR “ankle” OR “foot”),中文检索关键词为“经颅直流电刺激”“下肢耐力”“下肢疲劳”,此外,追溯筛查纳入文献的参考文献,以补充获取相关文献。

1.2 文献筛选和资料提取

文献纳入标准为:① 随机对照试验;② 受试者为健康成年人;③ 对照组为假刺激条件;④ 测试指标为下肢肌肉耐力表现指标;⑤ 已发表的中英文期刊文献。排除综述、会议、个案报告等类型文章。文献筛选时首先通过阅读文章题目和摘要纳入相关的文献,再进一步阅读全文以最终确定是否符合上述纳入标准。资料提取的主要内容为:① 文献的基本信息;② 受试者基本特征;③ 刺激方案;④ 偏倚风险评价的主要支持点。

文献筛选和资料提取过程由 2 名本专业研究人员分别独立完成,当出现争议时,由第 3 位经验丰富研究人员进行评估决定。

1.3 文献质量评价

文献质量评价采用 Cochrane 系统评价手册中随机对照试验偏倚风险的评估工具进行,对所纳入文献从以下几个方面进行偏倚风险评估:随机序列生成、受试者分配隐藏、参与者的盲效、结果评估的盲效、结果数据的完整性、选择性报告、其他偏倚,每一个偏倚风险在 Review Manager 5.4 软件中可被选择为高风险(+)、低风险(-)和风险不明(?)。文献质量评价由 2 名本专业研究人员分别独立完成,当出现争议时,由第 3 位经验丰富研究人员进行评估达成一致意见。

2 结果

2.1 文献检索结果

共检索到相关文献 96 篇(其中 20 篇来自

PubMed, 32 篇来自 WoS, 30 篇来自 EBSCO, 9 篇来自 ScienceDirect, 5 篇来自 CNKI), 追溯纳入文献的参考文献列表补充纳入 1 篇文献。通过 EndNote X9 文献管理软件去除重复文献后得到 51 篇文献, 根据纳入标准最终确定 17 篇相关英文文献纳入系统评价 (见图 1)。

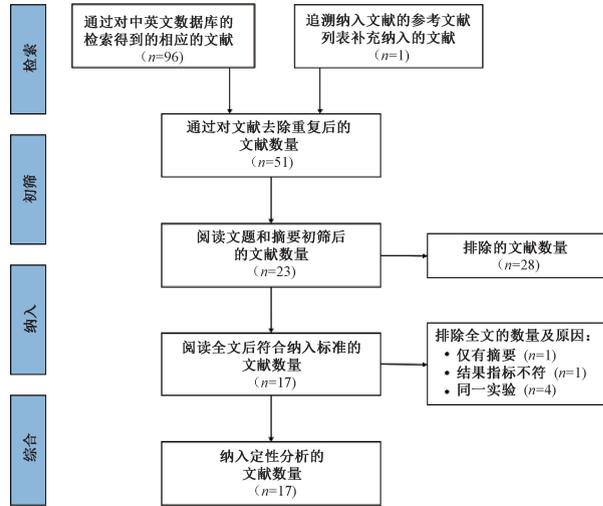


图 1 文献纳入流程

Fig. 1 Flow chart of literature inclusion

表 1 下肢整体耐力表现相关文献特征

Tab. 1 Literature characteristics of endurance performance of whole lower limbs

文献	样本量	年龄/岁	刺激方案				疲劳方案	主要结果
			电极位置	S/cm ²	I/mA	t/min		
[14]	8 男 4 女	24±5	A: 双侧 M1 区, C: 双侧肩部/A: 双侧肩部, C: 双侧 M1 区	A: 35, C: 25/ A: 25, C: 35	2	10	70% 最大功率骑行	TTF ↑; RPE ↓ 皮质脊髓兴奋性 ↑; 血乳酸积累 ↑;
[13]	11 男	26±4	A: Cz; C: 枕骨隆突/C: Cz; A: 枕骨隆突	A: 36; C: 35	2	13	80% 最大功率骑行	TTF ↑; 峰值功率 ←; RPE ←; 心率 ←; 肌电均方根 ←
[20]	9 男 3 女	23±3	A: F3; C: Fp2	A: 35; C: 25	2	30	70% 最大功率骑行	TTF ↑; RPE ↓; 心率 ↓; 血乳酸积累 ↑;
[21]	12 男	20.8±0.4	A: 左侧 M1; C: 右侧上区	25	2	10	80% 最大功率骑行	TTF ↑; RPE ←; 心率 ←
[23]	17 男 6 女	21~30	A: 头顶点; C: 右侧前额/C: 头顶点; A: 右侧前额	35	2	15	30 s 最大强度冲刺骑行	合并平均功率 ←; 峰值功率 ←
[22]	17 男	30.9±6.5	神经刺激耳机; Cz, C1~C6	3×28	2	20	改良的 Bruce 跑台方案	最大摄氧量 ↑; RPE ↓

注: S 为电极面积, I 为电流强度, t 为时间; A 为阳极, C 为阴极; M1 为初级运动皮层; Cz, C1, C6, F3, Fp2 等位点均为国际脑电图 10-20 系统电极放置位点; TTF 为任务失败时间; RPE 为主观感觉疲劳分级; 与假刺激组相比, tDCS 干预后, ↑ 为显著上升, ↓ 为显著下降, ← 为无显著改变。

2.2 tDCS 对下肢耐力表现的影响

纳入系统综述的 17 项研究中, 共包含 310 位健康成年受试者, 年龄 18~40 岁。实验均为随机交叉设计, 受试者分多次访问实验室, 随机接受单次阳极 tDCS 条件和短暂提供相同强度电流的假刺激 (Sham) 条件, 对比不同刺激条件对下肢耐力表现的即刻影响。其中, 按疲劳方案不同可将纳入研究分为涉及下肢整体和仅涉及下肢单关节的研究。

2.2.1 tDCS 对下肢整体耐力表现的影响 此部分 6 项研究中, 最主要的刺激脑区是 M1 区 (5 项, 83.3%), 5 项研究采用大电极片, 电极片面积为 25 cm² 或 35 cm², 电流强度 2 mA, 刺激持续时间 10~30 min, 均采用先接受刺激后执行疲劳方案的离线刺激模式。4 项研究采用 70%~80% 最大功率骑行疲劳方案, 结果显示, tDCS 可显著提升骑行的 TTF^[13-14, 20-21], 降低骑行过程主观感觉疲劳分级 (rating of perceived exertion, RPE)^[14, 20]。1 项采用改良 Bruce 跑台方案的研究报告最大摄氧量显著提升和 RPE 呈下降趋势^[22], 但另一项研究未发现 tDCS 对 30 s 冲刺骑行功率表现的显著提升^[23] (见表 1)。

2.2.2 tDCS 对下肢单关节耐力表现的影响 此部分 11 项研究中,主要的刺激脑区同样为 M1 区(8 项,72.7%),9 项研究采用大电极片,电极片面积 12~100 cm²;10 项研究采用 2 mA 电流强度,刺激持续时间 10~30 min;有 4 项研究采用电刺激与疲劳同时执行的在线刺激模式。4 项研究未能显著提升膝关节 20%~30% MVC 等长收缩的 TTF^[24-27],其中两项也未能影响肌肉疼痛与疲劳感知^[24,27]。

但两项研究显示,tDCS 可分别显著提升膝关节的等长收缩 TTF 和短期耐力指数,并且均显著降低 RPE^[28-29]。4 项研究采用下肢单关节快速疲劳方案,其中采用膝关节最大强度疲劳方案的实验中 tDCS 都未能显著提升疲劳指数、总做功量等表现^[30-33];而 1 项研究的疲劳方案聚焦于足踝部,结果显示 tDCS 可提升足踝部维持快速敲击频率的能力^[34](见表 2)。

表 2 下肢单关节/环节耐力表现相关文献特征

Tab. 2 Literature characteristics of endurance performance of single joint/segment of lower limbs

文献	样本量	年龄/岁	刺激方案				疲劳方案	主要结果
			电极位置	S/cm ²	I/mA	t/min		
[27]	11 男 12 女	26±5	A: F3; C: Fp2	35	2	20	25% MVC 等长伸膝	TTF←; MVC←; 肌肉疼痛强度←
[28]	9 男	23±2	A: 左侧 M1 区; C: R-DLPFC/ A: 左侧 M1 区; C: 左侧肩部	12	2	10	20% MVC 等长伸膝	TTF↑; RPE↓; 头部放置; 肌肉疼痛←
[24]	11 男 9 女	23.8±4.7	A: 右股外侧肌热点; C: 左三角肌	35	1, 2	10	20% MVC 等长伸膝	TTF←; 肌电均方根←; 动作诱发电位←; 疲劳感知←; MVC←
[25]	7 男 13 女	20.6±1.7	A: R-DLPFC; C: 距离阳极 3.5 cm	4×1 HD-tDCS	2	10 + (在线)	30% MVC 等长伸膝	TTF←; RPE←
[26]	12 男	24.4±3.9	A: C3 或 C4; C: Cz, F3, T7, P3/ Cz, F4, T8, P4	4×1 HD-tDCS	2	20	30% MVC 等长伸膝	TTF←; 内源性疼痛抑制↑; MVC←
[29]	12 男	18~40	A: M1 和 T3; C: 双侧肩部	A: 35; A, C: 16	2	13	30% 1 RM 伸膝至力竭	短期耐力指数↑; RPE↓; 心率↓; 最大力量↑; 股四头肌肌电均方根↑
[30]	14 男	26±3	A/C: 股外侧肌热点; C/A: 对侧眶额叶	35	2	10 (在线)	35 次 5 s MVC 等长伸膝	最大自主收缩振幅↓; 股外侧肌肌电均方根↓
[31]	10 男 10 女	21.0±1.5	A: T3; C: Fp2/ A: T4; C: Fp1	25	2	30	50 次最大强度等速膝屈伸	疲劳指数←; 心率变异性←; 平均力矩积分←
[32]	13 男	26±4	A: M1; C: Fp2	35	2	20	3 组 10 次最大力矩膝屈伸	总做功量←; 做功疲劳←; 峰值力矩←; 肌电均方根←
[33]	12 男 22 女	24.0±3.6	A: C3; C: 对侧眶上区	35	4	20 (在线)	双侧 40 次最大力矩膝屈伸	屈膝肌群疲劳指数↑; 伸膝肌群疲劳指数←
[34]	10 男 3 女* 7 男 5 女# 10 男 11 女&	24.0±3.9 22.5±4.3 27.0±3.4	A-Cz; C-Fz	A-35; C-100	2	20 (在线)	20 s 足前掌最快速率敲击力台	足前掌敲击频率维持↑

注: S 为电极面积, I 为电流强度, t 为时间; *、#、& 分别为足球、手球运动员和普通人; A 为阳极; C 为阴极; M1 为初级运动皮层; R-DLPFC 为右侧背外侧前额叶; Cz、C3、C4、F3、F4、T3、Fp2 等位点均为国际脑电图 10-20 系统电极放置位点; HD-tDCS 为高精度经颅直流电刺激; MVC 为最大力量自主等长收缩; 1 RM 为 1 次重复最大负荷量; 与假刺激组相比, tDCS 干预后, ↑ 为显著上升, ↓ 为显著下降, ← 为无显著改变。

2.3 文献偏倚风险评估

采用 Review Manager 5.4 软件对纳入的 17 项研究进行文献偏倚风险评估。结果显示,17 项研究都采用随机分组和分配;7 项研究只对受试者采用

盲法,而对实验实施者没有采用盲法;9 项研究报告结果数据的完整性,其余未报告;5 项研究的选择性报告偏倚风险不明;2 项研究的其他偏倚风险来源不明。纳入文献的偏倚风险图及概要见图 2。

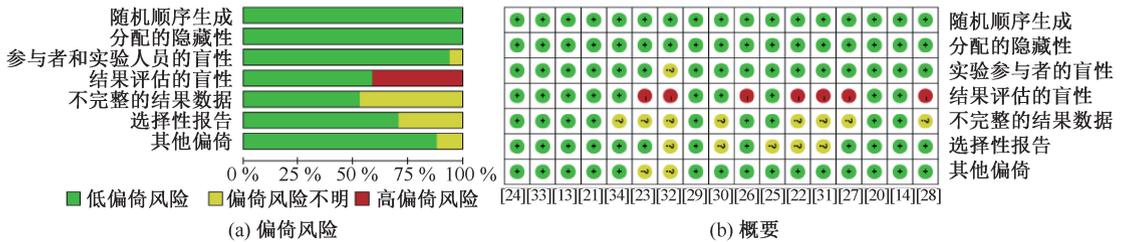


图 2 纳入文献的偏倚风险评估结果

Fig. 2 Bias risk results of included Literatures (a) Bias risk, (b) Summary

注:(+)代表高风险,(-)代表低风险,(?)代表风险不明。

3 讨论

根据纳入文献中所得结果,与假刺激条件相比,tDCS 能显著提升下肢整体耐力运动的 TTF、峰值摄氧量等表现,但不一定能提升膝关节耐力运动中 TTF、做功量、疲劳指数等表现。本文推测,在不同的耐力运动中影响表现的因素复杂,tDCS 对耐力运动的影响也存在着多种潜在机制。

3.1 tDCS 提升下肢耐力表现的潜在机制

在 tDCS 显著提升下肢耐力表现的研究中,相比于对照组,tDCS 干预后显示更低的 RPE^[14,20,29],而 RPE 的降低与耐力表现提升密切相关。在耐力运动过程中,RPE 反映了个体对费力与疲劳程度的主观感知。研究表明,作为 M1 区上游区域的辅助运动区与疲劳感知的生成密切相关^[35]。而 tDCS 可以通过改变神经元静息膜电位提高 M1 区兴奋性^[36],使 M1 区更容易接收来自其他区域的指令^[37]。因此,与对照组相比,在执行相同强度运动时,辅助运动区仅需较低的激活水平就能向 M1 区传达相应的信息指令,进而降低下肢耐力运动过程中的疲劳感知(即 RPE 降低),促使个体在耐力运动时更持久地输出目标力量,由此提升耐力运动 TTF^[14,20]。

3.2 tDCS 干预效果不一致的可能原因

在耐力运动过程中,肌肉组织发生形变、释放有害代谢物等会引起肌肉疼痛,当个体感知到的肌肉疼痛加剧,大脑就会驱使机体降低强度或停止运

动^[38]。而目前研究认为,tDCS 作用的目标脑区并不完全对应耐力运动中肌肉疼痛感知的调节神经网络,即 tDCS 未能影响耐力运动中的肌肉疼痛感知^[26,39];而持续增加的疼痛感知驱使机体停止当前强度的运动,故 tDCS 干预后的膝关节耐力表现与对照组无显著差异^[26-27]。

此外,通常认为 tDCS 可以提升皮层兴奋性^[36]。但一些研究显示,tDCS 未能提高皮层兴奋性^[24,30],这可能是各研究中不同的 tDCS 刺激方案造成。如仅对颞叶皮层应用 tDCS 无法提升膝关节耐力表现^[31],但同时 M1 区和颞叶皮层进行多靶点刺激却能显著改善膝关节耐力表现^[29];此外,同样针对 M1 区的 tDCS 会对膝关节等长收缩耐力表现产生不同的干预效果^[24,28],这种结果的差异性可能来自于两个实验中大小不同的电极片致使覆盖的脑区范围不同。由于传统 tDCS 采用的大电极片会在目标脑区形成较广范围的电场分布,耐力表现可能会受到其他大脑区域的影响,从而干扰研究者得出准确的研究结果和机制解释^[26]。相比之下,HD-tDCS 在应用同等强度电流覆盖相同脑区时能够提升 80% 聚焦性和 98% 刺激靶点电流强度,能更精确地反映目标脑区与表现改变的关系,有助于更好地探索耐力表现提升的潜在神经生理学机制^[40]。

总体来说,目前 tDCS 对膝关节耐力表现存在不一致的干预效果,需要未来更多实验进一步明确。

3.3 局限性

本文采用 Cochrane 系统评价文献,可能存在忽

略整群随机设计、交叉设计等随机对照试验,忽略组间基线的均衡性,未能明确界定干预措施分配的效果及干预措施依从的效果等问题。

4 结论

作为一项非侵入式的神经调控技术,tDCS 干预对下肢整体耐力表现有显著影响,对膝关节耐力表现的影响无统一定论。研究人员认为,tDCS 可提高初级运动皮层兴奋性从而降低辅助运动区激活,在耐力运动中产生更低的主观感觉疲劳分级,但却无法影响耐力运动中肌肉疼痛感知。且各研究中刺激方案不一,可能是部分原因。未来研究可关注多靶点刺激、HD-tDCS、个性化剂量等刺激方案的应用效果,深入探究 tDCS 改善耐力表现中枢层面的机制;探索结合 tDCS 的康复和运动训练方案,促进运动功能康复和竞技表现增强;开发适用于多种不同耐力任务的刺激设备,更有针对性地提高损伤康复人群、健康人群乃至竞技运动员的抗疲劳能力。

参考文献:

[1] 陆阿明,王国栋,王芳. 运动性疲劳对跑运动学与下肢肌电的影响 [J]. 体育科学, 2012, 32(6): 44-49.

[2] 罗震,王俊清,张希妮,等. 跑步疲劳进程中下肢生物力学模式的非线性变化研究 [J]. 中国体育科技, 2021, 57(3): 29-36.

[3] 夏锐,张希妮,张桑,等. 运动性疲劳的生物力学评价及其与损伤关系研究进展 [J]. 医用生物力学, 2020, 35(1): 127-132.

XIA R, ZHANG XN, ZHANG S, et al. Research progress of biomechanical evaluation on exercise-induced fatigue and its relationship with sport injuries [J]. J Med Biomech, 2020, 35(1): 127-132.

[4] JOHNSTON RB, HOWARD ME, CAWLEY PW, et al. Effect of lower extremity muscular fatigue on motor control performance [J]. Med Sci Sports Exerc, 1998, 30(12): 1703-1707.

[5] ROZZI SL, LEPHART SM, FU FH. Effects of muscular fatigue on knee joint laxity and neuromuscular characteristics of male and female athletes [J]. J Athl Train, 1999, 34(2): 106-114.

[6] 卞秀玲,王雅娜,王开元,等. 经颅直流电刺激技术及其在提升运动表现中的应用 [J]. 体育科学, 2018, 38(5): 66-72.

[7] REIS J, FISCHER JT, PRICHARD G, et al. Time- but not sleep-dependent consolidation of tDCS-enhanced

visuomotor skills [J]. Cereb Cortex, 2015, 25(1): 109-117.

[8] 傅维杰,刘宇. 神经生物力学增能技术前沿与进展 [J]. 医用生物力学, 2020, 35(6): 649-657.

FU WJ, LIU Y. Frontiers and progress in neurobiomechanical ergogenic technology [J]. J Med Biomech, 2020, 35(6): 649-657.

[9] 王宝峰,肖松林,张希妮,等. 经颅直流电刺激联合运动干预对运动能力影响的研究进展 [J]. 体育科研, 2022, 43(1): 21-27.

[10] 肖松林,周俊鸿,王宝峰,等. 高精度经颅直流电刺激对足部肌肉力量、踝关节运动觉及静态平衡的影响 [J]. 体育科学, 2020, 40(5): 42-51.

[11] ABDELMOULAA, BAUDRY S, DUCHATEAU J. Anodal transcranial direct current stimulation enhances time to task failure of a submaximal contraction of elbow flexors without changing corticospinal excitability [J]. Neuroscience, 2016, 322: 94-103.

[12] COGIAMANIAN F, MARCEGLIA S, ARDOLINO G, et al. Improved isometric force endurance after transcranial direct current stimulation over the human motor cortical areas [J]. Eur J Neurosci, 2007, 26(1): 242-249.

[13] VITOR-COSTA M, OKUNO NM, BORTOLOTTI H, et al. Improving cycling performance: Transcranial direct current stimulation increases time to exhaustion in cycling [J]. PLoS One, 2015, 10(12): e0144916.

[14] ANGIUS L, MAUGER AR, HOPKER J, et al. Bilateral extracephalic transcranial direct current stimulation improves endurance performance in healthy individuals [J]. Brain Stimul, 2018, 11(1): 108-117.

[15] RADEL R, TEMPEST G, DENIS G, et al. Extending the limits of force endurance: Stimulation of the motor or the frontal cortex? [J]. Cortex, 2017, 97: 96-108.

[16] MUTHALIB M, KAN B, NOSAKA K, et al. Effects of transcranial direct current stimulation of the motor cortex on prefrontal cortex activation during a neuromuscular fatigue task: An fNIRS study [J]. Adv Exp Med Biol, 2013, 789: 73-79.

[17] WILLIAMS PS, HOFFMAN RL, CLARK BC. Preliminary evidence that anodal transcranial direct current stimulation enhances time to task failure of a sustained submaximal contraction [J]. PLoS One, 2013, 8(12): e81418.

[18] ANGIUS L, HOPKER J, MAUGER AR. The ergogenic effects of transcranial direct current stimulation on exercise performance [J]. Front Physiol, 2017, 8: 90.

[19] MACHADO D, UNAL G, ANDRADE SM, et al. Effect of transcranial direct current stimulation on exercise performance: A systematic review and meta-analysis [J]. Brain Stimul, 2019, 12(3): 593-605.

- [20] ANGIUS L, SANTARNECCHI E, PASCUAL-LEONE A, *et al.* Transcranial direct current stimulation over the left dorsolateral prefrontal cortex improves inhibitory control and endurance performance in healthy individuals [J]. *Neuroscience*, 2019, 419: 34-45.
- [21] SIDHU SK. Remote muscle priming anodal transcranial direct current stimulation attenuates short interval intracortical inhibition and increases time to task failure of a constant workload cycling exercise [J]. *Exp Brain Res*, 2021, 239(6): 1975-1985.
- [22] CODELLA R, ALONGI R, FILIPAS L, *et al.* Ergogenic effects of bihemispheric transcranial direct current stimulation on fitness: A randomized cross-over trial [J]. *Int J Sports Med*, 2021, 42(1): 66-73.
- [23] SASADA S, ENDOH T, ISHII T, *et al.* Polarity-dependent improvement of maximal-effort sprint cycling performance by direct current stimulation of the central nervous system [J]. *Neurosci Lett*, 2017, 657: 97-101.
- [24] WRIGHTSON JG, TWOMEY R, YEUNG STY, *et al.* No effect of tDCS of the primary motor cortex on isometric exercise performance or perceived fatigue [J]. *Eur J Neurosci*, 2020, 52(2): 2905-2914.
- [25] DENIS G, ZORY R, RADEL R. Testing the role of cognitive inhibition in physical endurance using high-definition transcranial direct current stimulation over the prefrontal cortex [J]. *Hum Mov Sci*, 2019, 67: 102507.
- [26] FLOOD A, WADDINGTON G, KEEGAN RJ, *et al.* The effects of elevated pain inhibition on endurance exercise performance [J]. *Peer J*, 2017, 5: e3028.
- [27] BYRNE R, FLOOD A. The influence of transcranial direct current stimulation on pain affect and endurance exercise [J]. *Psychol Sport Exerc*, 2019, 45: 101554.
- [28] ANGIUS L, PAGEAUX B, HOPKER J, *et al.* Transcranial direct current stimulation improves isometric time to exhaustion of the knee extensors [J]. *Neuroscience*, 2016, 339: 363-375.
- [29] KAMALI AM, SAADI ZK, YAHYAVI SS, *et al.* Transcranial direct current stimulation to enhance athletic performance outcome in experienced bodybuilders [J]. *PLoS One*, 2019, 14(8): e0220363.
- [30] GIBOIN LS, GRUBER M. Anodal and cathodal transcranial direct current stimulation can decrease force output of knee extensors during an intermittent MVC fatiguing task in young healthy male participants [J]. *J Neurosci Res*, 2018, 96(9): 1600-1609.
- [31] CICCONE AB, DECKERT JA, SCHLABS CR, *et al.* Transcranial direct current stimulation of the temporal lobe does not affect high-intensity work capacity [J]. *J Strength Cond Res*, 2019, 33(8): 2074-2086.
- [32] MONTENEGRO RA, FARINATTI PTV, DE LIMA PFM, *et al.* Motor cortex tDCS does not modulate perceived exertion within multiple-sets of resistance exercises [J]. *Isokinet Exerc Sci*, 2016, 24(1): 17-24.
- [33] WORKMAN CD, KAMHOLZ J, RUDROFF T. The tolerability and efficacy of 4 mA transcranial direct current stimulation on leg muscle fatigability [J]. *Brain Sci*, 2019, 10(1): 12.
- [34] SEIDEL-MARZI O, RAGERT P. Anodal transcranial direct current stimulation reduces motor slowing in athletes and non-athletes [J]. *BMC Neurosci*, 2020, 21(1): 26.
- [35] DE MORREE HM, KLEIN C, MARCORA SM. Perception of effort reflects central motor command during movement execution [J]. *Psychophysiology*, 2012, 49(9): 1242-1253.
- [36] NITSCHKE MA, PAULUS W. Sustained excitability elevations induced by transcranial DC motor cortex stimulation in humans [J]. *Neurology*, 2001, 57(10): 1899-1901.
- [37] DEVANATHAN D, MADHAVAN S. Effects of anodal tDCS of the lower limb M1 on ankle reaction time in young adults [J]. *Exp Brain Res*, 2016, 234(2): 377-385.
- [38] MAUGER AR. Factors affecting the regulation of pacing: current perspectives [J]. *Open Access J Sports Med*, 2014, 5: 209-214.
- [39] ANGIUS L, HOPKER JG, MARCORA SM, *et al.* The effect of transcranial direct current stimulation of the motor cortex on exercise-induced pain [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2015, 115(11): 2311-2319.
- [40] DMOCHOWSKI JP, DATTA A, BIKSON M, *et al.* Optimized multi-electrode stimulation increases focality and intensity at target [J]. *J Neural Eng*, 2011, 8(4): 046011.