·综述·

经颅直流电刺激辅助提高运动员运动能力的研究进展

鲁盼盼[1]　郭建瑞[1]　欧阳博文[2]　宋成林[1]　郭峰[1]
[1]沈阳体育学院,沈阳　110102; [2]东北大学,沈阳　110819
通信作者:郭峰,Email:guofeng_first@163.com

【摘要】 经颅直流电刺激(tDCS)作为一种神经调控技术已经受到了广泛地关注,且国外有学者已将其应用到了竞技体育中。本文对 tDCS 对人体运动能力的作用效果方面的研究进行了综述,总结后认为,传统的 tDCS 技术可以帮助患者或者正常人改善肌肉力量、延缓肌肉疲劳、促进运动技能学习等。但由于受到传统 tDCS 设备的限制,常见的导线式电极刺激只能在实验室中由专业人员进行操控,不利于运动员运动专项训练的实际应用;而便携式 tDCS 刺激器在运动员专项运动训练和提升其运动能力方面可能具有重要的意义。

【关键词】 经颅直流电刺激; 肌肉力量; 肌肉疲劳; 运动技能学习; 运动水平

基金项目:国家自然科学基金(31701043);辽宁省自然科学基金项目(20180550169);辽宁省“百千万人才工程”资助项目;科技部国家重点研发计划子课题(2018YFF0300502);辽宁省高等学校创新人才团队(WT2019005);沈阳体育学院优秀硕士学位论文资助项目

Funding: National Natural Science Foundation of China (31701043); Natural Science Foundation of Liaoning Province (20180550169); Liaoning Bai-Qian-Wan Talents Program; Subtopics of Ministry of Science and Technology National Key Research and Development Program (2018YFF0300502); Team of Innovative Talents in Colleges and Universities of Liaoning Province (WT2019005); Project Supported by Excellent Master's Thesis of Shenyang Sports University

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2021.04.019

随着竞技体育竞争的日益激烈,教练员和运动员一直在不断地寻求一种除体能训练以外,能够帮助运动员在竞技场上快速、并有效地取得竞技优势的设备和技术。经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)就是一种能够改善神经肌肉控制能力的技术,研究证实,tDCS 可通过阴性和阳性电极在特定头皮位点施加恒定、微弱的直流电(1~2 mA)来改变大脑皮质的神经元活动[1-3]。研究表明,阳极 tDCS 和阴极 tDCS 可以同时激活和抑制特定皮质区域的兴奋性[4-6]。迄今为止,tDCS 因其无创、便携、易操作、低成本等突出优点,在各种神经和精神疾病的研究中已取得一定的成果[7-11]。实际上,诸如运动学习、肌肉力量、运动疲劳甚至特定运动技能的处理速度等,都可以通过非侵入性脑刺激方法得到改善和提高[12-14]。有学者认为,如果正确地使用 tDCS,可能提高运动员的训练效率,优化运动员的运动表现[15]。

目前,国外已有学者将其应用到竞赛场地之中,但是使用后的作用效果并不统一。本文通过检索前期国内外相关研究成果,拟对经颅直流电刺激在体育竞技中的应用进行综述,以期为该领域的相关研究提供参考依据,同时也希望为国内运动员和教练团队提供一种全新的训练手段。

tDCS 在运动训练中的作用效果

一、减缓肌肉疲劳

运动疲劳是运动训练的正常生理现象,疲劳的产生不仅会使肌肉耐力下降[16],对决策、反应时间和技能学习也会产生不利的影响[17]。因此,有效地延迟疲劳有助于运动员运动能力的提升。近期有研究发现,咖啡因可增加受试者 12% 的骑行耐力,主观疲劳感也明显减轻,但由于咖啡因的效果持续短暂,随着长期使用,作用效力会逐渐下降[18]。有研究表明,有针对性的大脑刺激可以减轻运动员疲劳感知能力,即无创脑刺激技术有助于运动员运动损伤的恢复和肌肉耐力的提高[19]。

脊髓上段疲劳(supraspinal fatigue)是指初级运动皮质区(primary motor cortex, M1)未能产生运动输出,其发展伴随着运动皮质兴奋性的改变,并与外周机制共同参与肌肉疲劳[20]。能够提高 M1 兴奋性的 tDCS 可以通过增加 M1 的运动输出以及延缓脊髓上段疲劳的发展来提高耐力水平[21-22]。研究表明,tDCS 可通过向头皮发送微弱电流来改变颅内大脑皮质神经元的兴奋性,进而减轻肌肉疼痛并募集更多的运动单位[23-24]。Cogiamanian 等[22]在 2007 年首次观察了 tDCS 对运动疲劳的作用效果,探讨了 tDCS 对健康受试者 24 例左肘关节次最大等长收缩神经肌肉疲劳的影响。该研究发现,在将 1.5 mA、10 min 的阳极 tDCS 应用于大脑皮质运动区后,神经肌肉疲劳程度显著减少了 15%,这一结果表明,阳极 tDCS 可以提高肌肉耐力,缓解肌肉疲劳。Oki 等[25]对平均年龄在(68.3±2.0)岁的健康老年人 13 例进行了类似的试验,要求受试者进行肘关节屈曲等长收缩(最大力量的 20%)至任务失败,结果显示,经 20 min、1.5 mA 的阳极 tDCS 刺激后,与伪刺激相比,受试者的耐力水平提高了 15%,且自我感知疲劳强度(ratings of perceived exertion, RPE)增加率更低,同时也发现这种改善对体力较弱的老年人最为明显。这一结果表明,tDCS 刺激可能对耐力水平较差的个体更有益。

早期,有研究探讨了在递增负荷条件下骑行运动过程中,阳极 tDCS 刺激对优秀男子自行车运动员 10 例的自我感知疲劳

强度、心率和骑行表现的影响[26]。该项研究中,阳极 tDCS 被置于受试者左侧颞叶皮质(T3)处,因为该区域与自主神经系统控制有关,研究结果显示,经 2 mA、20 min 的阳极 tDCS 后,受试者在自行车运动过程中的 RPE 显著降低,而其在递增负荷运动测试中的峰值功率输出却增加了 4%,心率也有所降低。本课题组认为,阳极 tDCS 可能影响了岛叶皮质的活动,从而降低了 RPE,使运动表现得到提高[27]。Park 等[28]将 1.98 mA、20 min 的 tDCS 作用于受过训练的男性受试者 M1 区后(阳极置于 CZ 处;阴极置于 C5 和 C6 处,遵循国际 10-20 EEG 系统),要求其在跑台上进行恒定负荷测试,以自身 80% VO_{2max} 速度跑步至力竭,结果发现,与伪 tDCS 相比,tDCS 增加了受试者跑步至力竭的时间(time to exhaustion,TTE),表明 tDCS 对跑步运动表现具有积极作用。Vitor-Costa 等[29]对健康受试者 11 例的 M1 区(阳极置于 CZ 处)施加 2 mA、13 min 的阳极 tDCS 后发现,受试者在恒定负荷测试中的功率自行车骑行 TTE 显著增加,但心率和 RPE 并没有发生改变。本课题组认为,主观用力感觉(perception of effort)与岛叶皮质、前扣带皮质、丘脑和额叶岛盖的活动有关,刺激部位 Cz 区可能不会影响知觉反应;另外,由于在整个 TTE 测试中,不同实验条件下使用的负荷是恒定的,生理变量在测试中得到了很好的控制,因此,tDCS 干预对运动过程中与心肺反应相关的生理变量没有影响。由此可知,在 tDCS 研究中,刺激位置以及设计方案等的不同,对最终的结果可能也会产生影响。

二、增加肌肉力量

力量素质是人体所有身体素质的基础,也是取得更好的运动技能和竞赛结果的保障。Sales 等[30]观察了阳极 tDCS 应用于左侧颞叶皮质区对年轻成人 19 例膝关节伸肌等速运动表现的影响,在阳极 tDCS 或伪 tDCS 后,对所有受试者分别进行角速度为 60°/s 和 180°/s 的右膝关节伸肌等速向心测试,每种角速度下重复 5 次,测试间隔为 60 s,结果显示,2 mA、20 min 的阳极 tDCS 使 60°/s 和 180°/s 不同角速度下的总功量分别增加了 10.4% 和 9.4%,峰力矩也分别提高了 9.5% 和 7.8%。Hazime 等[31]观察了 tDCS 对女子手球运动员 8 例肩部内旋和外旋肌最大自主等长收缩(maximal voluntary isometric contractions,MVIC)能力的影响。该研究结果发现,2 mA tDCS 可使运动员肩部内、外旋肌的 MVIC 显著增加,与伪刺激相比,运动员外旋肌的 MVIC 收缩幅度在 tDCS 刺激中、刺激后 30 min 和 60 min 显著增加;在 tDCS 刺激中和刺激 60 min 后,内旋肌的 MVIC 显著增加。此外,Lattari 等[32]的研究发现,具有高级力量训练经验的受试者 10 例在经过 2 mA、20 min 的阳极 tDCS 后,其下蹲跳表现均有所提高,而阴极 tDCS 和伪 tDCS 并没有产生同样的效果,该结果表明,阳极 tDCS 可增加受试者的下肢肌肉力量。以上研究都与运动表现密切相关,因为对于来自排球、篮球、手球等不同体育项目的运动员来说,出色的垂直跳跃力是获取成功的重要因素,而 tDCS 则是提高与肌肉力量相关的运动任务表现的有效手段。但也有研究报道,已接近人体运动极限的顶尖运动员可能无法从大脑刺激技术中获益[1]。Mesquita 等[33]的研究还发现,1.5 mA、15 min 的阳极 tDCS 可使优秀跆拳道运动员的训练课自我感知疲劳强度(session-rating of perceived exertion,session-RPE)和踢腿频速测试(frequency speed of kick test,FSKT)的表现变差。因此,未来还需要进一步的研究来探索这种神经刺激器与高水平的运动表现间的兼容性。

三、促进运动技能掌握

人们普遍认为,高水平的运动技能和时机把控离不开大量的重复练习。然而,近来已有研究表明,出色运动技能的获得不仅仅依赖于密集的运动训练,无创脑调控技术也可以有效地提高健康人群的运动技能学习[34-35]。Fritsch 等[36]提出,tDCS 可以通过增强 M1 区的突触可塑性来改善运动技能学习。初级运动皮质区 M1 是 tDCS 研究中最常刺激的脑功能区,在精细运动技能学习过程中起着关键性作用。Nitsche 等[5]在 2003 年的一项研究中发现,对 M1 区应用 1 mA、15 min 的阳极 tDCS 能够提高受试者的序列动作学习,但当刺激其他脑区域时,例如前运动皮质区或前额叶皮质区,并没有产生同样的效果,这表明 M1 区在内隐运动学习的获得和早期巩固阶段具有一定的作用。还有研究指出,在 M1 区施加 tDCS 可对运动学习产生长期影响。Reis 等[6]在对健康受试者的 M1 区连续 5 d 施加 1 mA、20 min 的阳极 tDCS 刺激后发现,与伪 tDCS 相比,阳极 tDCS 增强了受试者运动技能的获得,且这种效应维持了 3 个月。

在早期的这些研究中,Jebsen-Taylor 试验(Jebsen Taylor Test,JTT)和手指顺序敲击任务是评估受试者运动表现改善的最常用方法。例如,Cuypers 等[37]进行了一项让受试者用优势手按照特定顺序敲击键盘的任务,结果发现,与伪 tDCS 组相比,健康组受试者在 1.5 mA、20 min 的阳极 tDCS 后,其测试成绩显著提高,学习曲线斜率明显增加。Hummel 等[38]的研究发现,将 1 mA、20 min 的阳极 tDCS 作用于健康右利手受试者的左侧 M1 区后,其 JTT 水平显著改善,且这种效果的持续时间延长了 30 min。

尽管上述研究中 tDCS 的效果显著,但手指灵活度与运动员的运动表现还存在着很大的差异[39]。因此,Zhu 等[40]观察了阴极 tDCS 刺激左背外侧前额叶皮质区对没有高尔夫运动经验的 27 例大学生复杂运动任务学习的影响,结果显示,与伪刺激组相比,1.5 mA、20 min 的阴极 tDCS 可以提高受试者在训练阶段和测试阶段的高尔夫推杆运动表现(将高尔夫球从 1.9 m 的距离击入球洞中),但训练阶段后的言语工作记忆活动受到了抑制,即阴极 tDCS 对言语工作记忆的抑制导致了外显控制策略受损,从而促进了高尔夫推杆技能的内隐运动学习。

基于上述研究可知,非侵入性 tDCS 技术能够促进运动技能的学习,然而目前绝大多数的研究都是基于非常小的样本量,这可能会增加假阳性结果的概率。因此,在日后的研究中还需要更大量的数据对其有效性加以证实。

四、提高认知功能

高水平的运动表现不仅需要体能和运动能力,还与感官认知能力的增强有关[41]。Furley 等[42]的研究指出,除肌肉表现外,例如工作记忆和推理等方面的认知功能也是决定专业水平运动表现的潜在因素。注意力和工作记忆功能的增强可以减少执行任务中的失误率,提高体育竞赛中的战术决策能力。

有研究表明,对健康受试者的背外侧前额叶皮质区(dorsolateral prefrontal cortex,DLPC)施加 tDCS 可以增强其认知功能[43-45]。Bashir 等[46]在对健康受试者 36 例的左 DLPC 施加阳极 tDCS 的同时,要求受试者执行视觉图形记忆(pattern recognition memory,PRM)和停止信号任务(stop signal test,SST),结果发现,与伪 tDCS 相比,2 mA、20 min 的阳极 tDCS 可以显著提高

受试者的 PRM 和 SST 任务表现。该研究结果表明,单次阳极 tDCS 可提高健康受试者的认知功能。然而,也有研究指出与单次 tDCS 刺激相比,多次刺激的效果更好[47]。Au 等[48]的研究发现,与伪 tDCS 相比,2 mA、20 min 的 tDCS 可以增强健康受试者的认知功能,且这种效应在训练停止后还可持续数月。Borducchi等[49]在对不同运动项目的专业运动员 10 例(柔道 4 例、游泳 3 例、艺术体操 3 例)的左 DLPC 连续 10 d 进行 2 mA、20 min的阳极 tDCS 后发现,运动员的记忆、注意力和情绪均有明显改善。对于运动员来讲,心理素质是一把金钥匙,与普通人群相比,高水平的运动员更容易出现心理健康问题,尤其是焦虑和抑郁[50]。目前来看,tDCS 技术能够提高运动员的认知表现,降低抑郁得分。然而,tDCS 增强认知功能的潜在机制尚不明确,因此还需要进一步的研究来阐明 tDCS 对大脑活动的影响。

便携式 tDCS 刺激器在运动表现中的研究和应用

虽然已有研究证实 tDCS 有助于运动员运动能力的提高,但是这些实验大部分都是在实验室内脱离专项运动的条件下完成,因为受到传统 tDCS 设备的限制,常见的导线式电极刺激只能在实验室中由专业人员进行操控,不利于运动员运动训练的实际应用。Halo Sport 是由美国旧金山 Halo Neuroscience 公司研发的一种便携式 tDCS 刺激器,旨在帮助运动员在短期内有效地提高运动水平。

一、Halo Sport 概述

Halo Sport 是通过头带内侧的触点模块(电极)向头皮输送适当的电流脉冲,可调节大脑皮质神经元活动,使大脑处于“高度可塑造状态(hyperplasticity)”,从而保证大脑具有更高的学习效率[51]。有研究发现,运动员在热身时佩戴 Halo Sport 耳机 20 min 可使这种“高度可塑造状态”持续大约 1 h[51]。Halo Sport 耳机外形与普通的头戴式耳机相类似,设备上只有一个电源按钮,其它所有功能都需要通过智能手机上的配套应用程序进行无线控制。在热身或训练期间,使用者可以对刺激时长(标准时间为 20 min)和刺激水平进行更改,也可以选择刺激模式(腿、核心和手臂)。在设备启动前需要先将触点模块用水润湿至呈深灰色,以确保良好的导电性。电极连接到由锂离子电池(36 V)驱动的持续电流刺激器上,最高电流输出为 2.2 mA,具有简单易操作,自动精确,安全可靠等特性。因此,Halo Sport 可在实验室环境之外进行自我操控。国外已有人将其应用到竞赛场地中,将刺激与体能训练相结合,增进运动员的肌肉记忆、力量、耐力,从而达到提升训练准备和竞赛表现的效果。例如,参加里约热内卢奥运会的几名田径运动员均表示,他们是在 tDCS 技术的辅助下进行训练[52]。同时,美国跳台滑雪国奥队、金州勇士队[52]和美国职棒大联盟[51]中也采用了 tDCS 进行辅助训练。

二、Halo Sport 对人体运动机能的作用效果

近些年,非侵入性脑刺激技术在体育领域中的应用愈发得到相关科研人员的青睐。目前,大多数研究都集中于传统的 tDCS 技术上,但专门针对 Halo Sport 设备的研究还相对较少。虽然大部分实验样本量较小,但以现有的研究来看,Halo Sport 在提升人体运动表现方面具有潜在优势。

有研究表明,运动过程中需要有充足的神经冲动和强有力的肌肉收缩[53]。神经冲动是从中枢神经系统发送到肌肉的电信号,这种电信号驱动募集运动单位,从而使肌肉收缩产生肌力。Halo Sport 是通过耳机头带内侧的电极向佩戴者的大脑发送轻微的电流,当大脑发出更强的信号来刺激运动神经元时,更多的运动纤维会在运动过程中被激活,肌肉会释放出更大的力量。为了证实 Halo Sport 的有效性,Halo Neuroscience 公司设计了一项实验,将 15 min、2 mA 的 Halo Sport tDCS 作用于健康右利手受试者的 M1 区上,要求受试者在刺激前、中、后起用非优势手进行等长握力任务,结果发现,tDCS 刺激期中,tDCS 刺激组的力量形成率(rate of force development, RFD)明显高于伪刺激组;而 tDCS 刺激后,2 组虽然都显示出较低的 RFD,但 tDCS 刺激组的 RFD 值仍明显高于伪刺激组[39]。出现这种情况的潜在机制是 M1 皮质兴奋性的增加增强了对肌肉的神经驱动,促进了运动单位的募集[54]。由于神经驱动被认为与 RFD 密切相关[55],因此在这项研究中,RFD 的增加很可能是由于 tDCS 诱导 M1 皮质兴奋性的增加导致的,而并非只是训练的结果。以上研究结果表明,Halo Sport 这种操作简便、可穿戴的 tDCS 刺激器可能是个体在日常生活或运动训练中提高肌肉爆发力的有效手段。最近,Yang 等[56]也探讨了 2 mA、20 min 的 Halo Sport 运动耳机对足球运动员下肢肌肉活动和平衡能力的影响,结果显示,为期 8 周的 tDCS 刺激训练可更有效地增加运动员的肌肉活动以以及平衡能力。

最近 Huang 等[57]探讨了 Halo Sport 电刺激对重复冲刺运动能力和认知功能的影响,在随机接受 2 mA、20 min 的 Halo Sport 电刺激和伪刺激后,9 例受试者在功率自行车上进行 5 组 6s 的自行车冲刺运动,结果发现,Halo Sport 显著增加了受试者在自行车冲刺运动过程中的平均输出功率。有研究指出,认知能力的下降与中枢疲劳有关[58],因此上述研究间接地证明了 Halo Sport 增强骑行的运动能力的作用机制可能与抑制中枢疲劳有关。本课题组认为,这种情况的可能机制是电刺激诱导皮质内易化和运动皮质兴奋性的增加,使运动皮质神经元更容易建立神经连接,增强对肌肉的运动驱动,使骑行的功率输出和认知功能增加,从而提高了受试者的骑行表现[57]。

目前,利用 tDCS 提高运动技能学习的有效性在竞技体育领域中也得到了证实。例如,在滑雪运动中,运动员的实际滑行时间要比其他运动项目训练少很多,因为大部分时间基本都花费在坐缆车上。因此,为了能够将宝贵的滑雪训练机会发挥出最优效果,进一步加速运动员的学习能力,美国滑雪与雪板协会(USSA)在 2016 年与 Halo Neuroscience 公司合作,首次将 tDCS 技术作为一种训练辅助器材引用到冬奥会的训练中,以期该设备能够优化跳台滑雪运动员的专项技能,提高运动成绩。优秀滑雪运动员 7 例在接受 Halo Sport 刺激或伪刺激的同时,在一个不稳定的平台上进行为期 2 周,每周 4 次的跳跃练习后发现,与伪刺激组相比,Halo Sport 智能耳机使运动员的跳跃力提高了 70%,协调能力提高了 80%[19]。2017,Nature 发表的一篇题为“Smarter, not harder”的研究提出,美国职业橄榄球运动员 Carrie 在使用 Halo Sport 耳机进行训练后,原地弹跳高度提高了 18 cm[51]。

结论与展望

有关 tDCS 对人体运动能力影响的研究在近些年才得以发

展,但总体来看,tDCS 有助于人体运动表现的改善,包括减缓肌肉疲劳、增加肌肉力量、加速运动技能掌握甚至是认知功能的提高;且目前普遍认为,tDCS 不会诱发动作电位的产生,因此,除了局部电极下出现偶尔、短暂的皮肤瘙痒和轻微的刺痛感等外,尚无任何副作用或诱发癫痫发作的报道。

虽然 tDCS 已经被用于运动训练和体育竞赛中,但还有许多问题亟需解决。首先,tDCS 目前还处于初始实验阶段,研究的样本量较小,且来自于顶尖运动员的证据相对较少,因此,未来还需要纳入更大数量的运动员研究数据对其有效性加以验证;其次,经常使用或滥用带来的潜在副作用仍然存在不确定性,因此未来进行有关评估长期刺激对机体的影响和安全性等问题的研究是非常必要的;第三,虽然电刺激是应用于特定的脑部区域,但在刺激过程中,靶区以外的其他区域也可能会受到波及,而且刺激方案的选择,如刺激强度和刺激持续时间、在线刺激和离线刺激、电极大小和数目,以及刺激位置等的微小差异都可能会对最终的结果产生影响。在日后的研究中,学者们可以考虑将 tDCS 与经颅磁刺激、脑电图、脑磁图或功能性近红外光谱技术等神经生理学手段相结合,以便更全面、更深入地探讨 tDCS 的神经机制问题;最后,同其他所有能够提高运动成绩的辅助手段一样,tDCS 在为运动员提供竞争优势的同时,也引发了伦理道德和竞赛公平性问题,甚至有人将其贴上了“大脑兴奋剂(brain doping)”或“神经兴奋剂(neurodoping)”的标签。目前,世界反兴奋剂机构(World Anti-Doping Agency, WADA)还没有一种可靠的方法来检测使用者最近是否接受过脑刺激,因此,关于这种高科技兴奋剂是否违背奥林匹克精神的问题还需要进一步地了解和考量。

尽管未来还需要更多的研究来证实 tDCS 技术对运动表现的影响,但综上所述,tDCS 在推动体育科学研究、提高人体运动能力等领域具有广阔的发展前景,是提高运动员运动表现和获取竞技优势的有效手段。

参 考 文 献

[1] Davis N. Neurodoping: brain stimulation as a performance-enhancing measure[J]. Sports Med, 2013, 43(8): 649-653. DOI: 10.1007/s40279-013-0027-z.

[2] Nitsche M, Paulus W. Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation[J]. J Physiol, 2000, 527(3): 633-639. DOI: 10.1111/j.1469-7793.2000.t01-1-00633.x.

[3] Nitsche M, Paulus W. Sustained excitability elevations induced by transcranial DC motor cortex stimulation in humans[J]. Neurology, 2001, 57(10): 1899-1901. DOI: 10.1212/ wnl.57.10. 1899.

[4] Nitsche M, Jaussi W, Liebetanz D, et al. Consolidation of human motor cortical neuroplasticity by D-cycloserine[J]. Neuropsychopharmacology, 2004, 29(8): 1573-1578. DOI: 10.1038/sj.npp.1300517.

[5] Nitsche M, Schauenburg A, Lang N, et al. Facilitation of implicit motor learning by weak transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex in the human[J]. J Cogn Neurosci, 2003, 15(4): 619-626. DOI: 10.1162/089892903321662994.

[6] Reis J, Schambra H, Cohen L, et al. Noninvasive cortical stimulation enhances motor skill acquisition over multiple days through an effect on consolidation[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 106(5): 1590-1595. DOI: 10.1097/WCO.0b013e32834c3db0.

[7] Boggio P, Valasek C, Campanhã C, et al. Non-invasive brain stimulation to assess and modulate neuroplasticity in Alzheimer's disease[J]. Neuropsychol Rehabil, 2011, 21(5): 703-771. DOI: 10.1080/09602011.2011.617943.

[8] Bolognini N, Vallar G, Casati C, et al. Neurophysiological and behavioral effects of tDCS combined with constraint-induced movement therapy in poststroke patients[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2011, 25(9): 819-829. DOI: 10.1001/jamaneurol.2018.2287.

[9] Fridriksson J, Rorden C, Elm J, et al. Transcranial direct current stimulation vs sham stimulation to treat aphasia after stroke: a randomized clinical trial[J]. JAMA Neurol, 2018, 75(12): 1470-1476. DOI: 10.1001/jamaneurol.2018.2287.

[10] Meron D, Hedger N, Garner M, et al. Transcranial direct current stimulation (tDCS) in the treatment of depression: systematic review and meta-analysis of efficacy and tolerability[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2015, 57: 46-62. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2015.07.012.

[11] Salehinejad M, Ghanavai E, Rostami R, et al. Cognitive control dysfunction in emotion dysregulation and psychopathology of major depression (MD): Evidence from transcranial brain stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC)[J]. J Affect Disord, 2017, 210: 241-248. DOI: 10.1016/j.jad.2016.12.036.

[12] Colzato LS, Nitsche MA, Kibele A. Noninvasive brain stimulation and neural entrainment enhance athletic performance—a review[J]. J Cogn, 2017, 1(1): 73-79. DOI: 10.5334/joc.135.

[13] Machado D, Unal G, Andrade S, 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. DOI: 10.1016/j.brs.2018.12.227.

[14] 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. DOI: TYKX.0.2018-05-008.

[15] Banissy M, Muggleton N. Transcranial direct current stimulation in sports training: potential approaches[J]. Front Hum Neurosci, 2013, 7: 129. DOI: 10.3389/fnhum.2013.00129.

[16] Williams P, Hoffman R, Clark B. 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. DOI: 10.1371/journal.pone.0081418.

[17] Rattray B, Argus C, Martin K, et al. Is it time to turn our attention toward central mechanisms for post-exertional recovery strategies and performance[J]? Front Physiol, 2015, 6: 79. DOI: 10.3389/fphys.2015.00079.

[18] Smirmaul B, De Moraes A, Angius L, et al. Effects of caffeine on neuromuscular fatigue and performance during high-intensity cycling exercise in moderate hypoxia[J]. Eur J Appl Physiol, 2017, 117(1): 27-38. DOI: 10.1007/s00421-016-3496-6.

[19] Reardon S. Performance boost paves way for 'brain doping': electrical stimulation seems to boost endurance in preliminary studies[J]. Nature, 2016, 531(7594): 283-285.

[20] Gandevia S. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue[J]. Physiol Rev, 2001, 81(4): 1725-1789. DOI: 10.1152/physrev.2001.81.4.1725.

[21] Angius L, Hopker J, Mauger A. The ergogenic effects of transcranial direct current stimulation on exercise performance[J]. Front Physiol,

2017, 8: 90. DOI: 10.3389/fphys.2017.00090.

[22] 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. DOI: 10.1111/j.1460-9568.2007.05633.x.

[23] Tanaka S, Hanakawa T, Honda M, et al. Enhancement of pinch force in the lower leg by anodal transcranial direct current stimulation[J]. Exp Brain Res, 2009, 196(3): 459-465. DOI: 10.1007/s00221-009-1863-9.

[24] Tanaka S, Takeda K, Otaka Y, et al. Single session of transcranial direct current stimulation transiently increases knee extensor force in patients with hemiparetic stroke[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2011, 25(6): 565-569. DOI: 10.1177/1545968311402091.

[25] Oki K, Mahato N, Nakazawa M, et al. Preliminary evidence that excitatory transcranial direct current stimulation extends time to task failure of a sustained, submaximal muscular contraction in older adults [J]. J Gerontol A Biol Sci Med Sci, 2016, 71(8): 1109-1112. DOI: 10.1093/gerona/glw011.

[26] Montenegro R, Farinatti PT, Fontes E, et al. Transcranial direct current stimulation influences the cardiac autonomic nervous control[J]. Neurosci Lett, 2011, 497(1): 32-36. DOI: 10.1016/j.neulet.2011.04.019.

[27] Okano A, Fontes E, Montenegro R, et al. Brain stimulation modulates the autonomic nervous system, rating of perceived exertion and performance during maximal exercise[J]. Br J Sports Med, 2015, 49(18): 1213-1218. DOI: 10.1136/bjsports-2012-091658.

[28] Park S, Sung D, Kim B, et al. Transcranial direct current stimulation of motor cortex enhances running performance[J]. PloS One, 2019, 14(2): e0211902. DOI: 10.1371/journal.pone.0211902.

[29] Vitor-Costa M, Okuno N, Bortolotti H, et al. Improving cycling performance: Transcranial direct current stimulation increases time to exhaustion in cycling[J]. PLoS One, 2015, 10(12): e0144916. DOI: 10.1371/journal.pone.0144916.

[30] Sales MM, Sousa CD, Browne RV, et al. Transcranial direct current stimulation improves muscle isokinetic performance of young trained individuals[J]. Sports Med, 2016, 69(2): 163-172. DOI:10.1007/s40279-016-0376-x

[31] Hazime F, Da Cunha R, Soliaman R, et al. Anodal transcranial direct current stimulation (tDCS) increases isometric strength of shoulder rotators muscles in handball players[J]. Int J Sports Phys Ther, 2017, 12(3): 402-407.

[32] Lattari E, Campos C, Lamego M, et al. Can transcranial direct current stimulation improve muscle power in individuals with advanced weight-training experience[J]? J Strength Cond Res, 2020, 34(1): 97-103. DOI:10.1519/JSC.0000000000001956.

[33] Mesquita P, Lage G, Franchini E, et al. Bi-hemispheric anodal transcranial direct current stimulation worsens taekwondo-related performance[J]. Hum Mov Sci, 2019, 66: 578-586. DOI: 10.1016/j.humov.2019.06.003.

[34] Kang E, Paik N. Effect of a tDCS electrode montage on implicit motor sequence learning in healthy subjects[J]. Exp Transl Stroke Med, 2011, 3(1): 4. DOI: 10.1186/2040-7378-3-4.

[35] Polanía R, Nitsche M, Ruff C. Studying and modifying brain function with non-invasive brain stimulation[J]. Nat Neurosci, 2018, 21(2): 174-187. DOI: 10.1038/s41593-017-0054-4.

[36] Fritsch B, Reis J, Martinowich K, et al. Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: potential implications for motor learning[J]. Neuron, 2010, 66(2): 198-204. DOI: 10.1016/j.neuron.2010.03.035.

[37] Cuypers K, Leenus D, Van Den Berg F, et al. Is motor learning mediated by tDCS intensity[J]? PLoS One, 2013, 8(6): e67344. DOI: 10.1371/journal.pone.0067344.

[38] Hummel F, Heise K, Celnik P, et al. Facilitating skilled right hand motor function in older subjects by anodal polarization over the left primary motor cortex[J]. Neurobiol Aging, 2010, 31(12): 2160-2168. DOI: 10.1016/j.neurobiolaging.2008.12.008.

[39] Angius L, Pascual-Leone A, Santarnecchi E. Brain stimulation and physical performance[J]. Prog Brain Res, 2018, 240: 317-339. DOI: 10.1016/bs.pbr.2018.07.010.

[40] Zhu F, Yeung A, Poolton J, et al. Cathodal transcranial direct current stimulation over left dorsolateral prefrontal cortex area promotes implicit motor learning in a golf putting task[J]. Brain Stimul, 2015, 8(4): 784-786. DOI: 10.1016/j.brs.2015.02.005.

[41] Moscatelli F, Messina G, Valenzano A, et al. Differences in corticospinal system activity and reaction response between karate athletes and non-athletes[J]. Neurol Sci, 2016, 37(12): 1947-1953. DOI: 10.1007/s10072-016-2693-8.

[42] Furley P, Memmert D. Working memory capacity as controlled attention in tactical decision making[J]. J Sport Exerc Psychol 2012, 34(3): 322-344. DOI: 10.1123/jsep.34.3.322.

[43] Dockery C, Hueckel-Weng R, Birbaumer N, et al. Enhancement of planning ability by transcranial direct current stimulation[J]. J Neurosci, 2009, 29(22): 7271-7277. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0065-09.2009.

[44] Stone D, Tesche C. Transcranial direct current stimulation modulates shifts in global/local attention[J]. Neuroreport, 2009, 20(12): 1115-1119. DOI: 10.1097/WNR.0b013e32832e9aa2.

[45] Zaehle T, Sandmann P, Thorne J, et al. Transcranial direct current stimulation of the prefrontal cortex modulates working memory performance: combined behavioural and electrophysiological evidence[J]. BMC Neurosci, 2011, 12: 2. DOI: 10.1186/1471-2202-12-2.

[46] Bashir S, Al-Hussain F, Hamza A, et al. Cognitive function assessment during 2 mA transcranial direct current stimulation in DLPFC in healthy volunteers[J]. Physiol Rep, 2019, 7(20): e14264. DOI: 10.14814/phy2.14264.

[47] Au J, Karsten C, Buschkuehl M, et al. Optimizing transcranial direct current stimulation protocols to promote long-term learning[J]. J Neurosci Res,2021. DOI: 10.1002/jnr.24784.

[48] Au J, Katz B, Buschkuehl M, et al. Enhancing working memory training with transcranial direct current stimulation[J]. J Cogn Neurosci, 2016, 28(9): 1419-1432. DOI: 10.1162/jocn_a_00979.

[49] Borducchi D, Gomes J, Akiba H, et al. Transcranial direct current stimulation effects on athletes' cognitive performance: an exploratory proof of concept trial[J]. Front Psychiatry, 2016, 7: 183. DOI: 10.3389/fpsyt.2016.00183.

[50] Rice S, Purcell R, De Silva S, et al. The mental health of elite athletes: a narrative systematic review[J]. Sports Med, 2016, 46(9): 1333-1353. DOI: 10.1007/s40279-016-0492-2.

[51] Tim H. Smarter, not harder[J]. Nature, 2017, 549(7670): S1-S3. DOI: 10.1038/549S1a.

[52] Lavazza A. Transcranial electrical stimulation for human enhancement and the risk of inequality: prohibition or compensation[J]? Bioethics, 2019, 33(1): 122-131. DOI:10.1111/bioe.12504.

[53] Folland J, Buckthorpe M, Hannah R. Human capacity for explosive force production: neural and contractile determinants[J]. Scand J Med Sci Sports, 2014, 24(6): 894-906. DOI: 10.1111/sms.12131.

[54] Dutta A, Krishnan C, Kantak S, et al. Recurrence quantification analysis of surface electromyogram supports alterations in motor unit recruitment strategies by anodal transcranial direct current stimulation [J]. Restor Neurol Neurosci 2015, 33(5): 663-669. DOI:10.3233/RNN-140469.

[55] Aagaard P, Simonsen E, Andersen J, et al. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training[J]. J Appl Physiol, 2002, 93(4): 1318-1326. DOI: 10.1152/japplphysiol.00283.2002.

[56] Yang DJ, Park SK, Uhm Y H. Influence of transcranial direct current stimulation on lower limb muscle activation and balance ability in soccer player[J]. J Korean Phys Ther, 2018, 30(6): 211-217. DOI: 10.18857/jkpt.2018.30.6.211

[57] Huang L, Deng Y, Zheng X, et al. Transcranial direct current stimulation with Halo Sport enhances repeated sprint cycling and cognitive performance[J]. Front Physiol, 2019, 10: 118. DOI: 10.3389/fphys.2019.00118.

[58] Meeusen R. Exercise, nutrition and the brain[J]. Sports Med, 2014, 44 (1): S47-56. DOI: 10.1007/s40279-014-0150-5.

(修回日期:2021-03-01)
(本文编辑:阮仕衡)

《中华物理医学与康复杂志》第八届编辑委员会组成名单

总　编　辑: 黄晓琳

副 总 编 辑: 窦祖林　顾　新　郭铁成　何成奇　李　玲　刘宏亮　吴　毅　燕铁斌　岳寿伟　周谋望

编 辑 委 员: (含总编辑、副总编辑)(按姓氏拼音顺序排序)

敖丽娟　白定群　白玉龙　毕　胜　陈　红　陈丽霞　陈青山　陈文华　窦祖林　杜　青
范建中　冯　珍　冯晓东　高晓平　顾　新　顾旭东　郭　琪　郭钢花　郭铁成　何成奇
何晓红　胡昔权　黄　真　黄东锋　黄国志　黄晓琳　贾子善　姜志梅　金　俏　李　丽
李　玲　李海峰　李红玲　李建华　李晓捷　李雪萍　梁　英　廖维靖　刘　楠　刘宏亮
刘遂心　刘忠良　卢红建　鲁雅琴　陆　敏　陆　晓　罗　军　马　超　牟　翔　倪朝民
倪国新　潘　钰　单春雷　邵　明　宋为群　孙强三　唐　强　王　刚　王　强　王　彤
王宝兰　王冰水　王楚怀　王宁华　王玉龙　吴　华　吴　霜　吴　毅　武继祥　肖　农
谢　青　谢　荣　谢欲晓　许　涛　许光旭　闫金玉　燕铁斌　杨建荣　杨卫新　叶超群
尹　勇　于慧秋　余　茜　虞乐华　袁　华　岳寿伟　恽晓平　张　芳　张　皓　张桂青
张继荣　张锦明　张盘德　张巧俊　张长杰　张志强　郑光新　周谋望　朱　宁　朱珊珊

中国香港编委: Leonard Sheung Wai LI(中国香港)

外 籍 编 委: Akira Miyamoto (日本)　Hao Liu(美国)　Hong Wu(美国)
Li-Qun Zhang(美国)　Nathan R. Qi(美国)　Sheng Quan Xie(新西兰)
Sheila Purves(加拿大)　Sheng Li(美国)　Wenchun Qu(美国)