

·运动人体科学·

基于神经启动技术的急性经颅直流电刺激对 运动员体能表现的影响

周喆啸

(宁波大学 体育学院, 浙江 宁波 315211)

摘 要: 为深入探讨经颅直流电技术对运动员动态平衡、灵敏反应等方面的急性影响及效果延续。招募 24 名国家健将或一级水平的男性运动员, 随机抽签决定电刺激干预类型(真刺激或假刺激)与体能表现测试指标(动态平衡等), 大脑皮层 M1 区安排电流强度 2 mA、20 min 电刺激; 采集基准值和 0、10、20、30、40 min 共 5 个时间点的数据, 每两次电刺激之间的洗脱期为 48~72 h。通过 SPSS 软件, 对采集的有效数据进行双因素重复测量方差分析(电刺激类型×测试时间点)。结果显示: 所有体能表现指标存在显著交互作用, 简单效应分析发现真刺激组在干预后 5 个时间点的测试数据均显著优于基准值及假刺激组($P < 0.05$), 且干预效果可延续至刺激后 40 min, 假刺激组较干预前未发现显著提高。研究表明: 运动员经颅直流电刺激后, 动态平衡、灵敏反应等体能表现水平显著增强, 具有见效快、时效长等特点, 可考虑将其应用至运动员的训练实践或竞赛过程中。

关键词: 体能表现; 经颅直流电刺激; 初级运动皮层; 大学生运动员

中图分类号: G804.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2023)05-0138-07

The effect of acute transcranial direct current stimulation on athletes' physical performance based on the neural priming technique

ZHOU Zhexiao

(Faculty of Sports Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To deeply explore the acute effects of transcranial direct current technology on the dynamic balance and sensitive response of athletes and the continuation of its effects, twenty-four national athletes or first-class male athletes were recruited. All the subjects were randomly selected to determine the type of electrical stimulation intervention (a-tDCS or s-tDCS) and the physical performance test indexes (dynamic balance, etc.). Electrical stimulation with current intensity of 2mA and 20min was arranged in M1 area of cerebral cortex, and the data of baseline, instant, 10min, 20min, 30min and 40min were collected, and the elution period between every two electrical stimulation was from 48 to 72 hours. Through SPSS software, the collected valid data was analyzed by two-factor repeated measurement ANOVA (type × time), and the results showed that all physical performance indicators had significant interaction. Simple effect analysis found that the test data of a-tDCS group at five time points after the intervention were significantly better than those of the baseline and s-tDCS group ($P < 0.05$), and the intervention effect could last for 40 min minutes after the intervention, but s-tDCS group did not find significant improvement compared with that before the intervention. The conclusions revealed that after transcranial direct current stimulation, athletes' physical performance level such as dynamic balance, sensitive response, was obviously enhanced, which has the characteristics of quick effect and long time-effect. Given that, it can be considered to be

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 宁波大学教学改革研究重点项目(JYXMXZD2023010)。

作者简介: 周喆啸(1986-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向: 体能训练理论与方法。E-mail: zhouzhexiao@126.com

applied to athletes' training practice or competition process.

Keywords: physical performance; tDCS; primary motor cortex; college athletes

体能表现,泛指完成某项运动技能或复杂动作任务时,在神经系统的精准支配下,协调、快速、高效调动平衡、力量、速度等素质,以最优化模式展示人体的运动能力,是运动员专项竞技能力提高、优异运动成绩获得的重要因素^[1]。传统观点认为,提高运动负荷是激发体能表现水平的重要途径,例如聚组训练、复合式训练、激活后增强效应及神经整合训练等方法^[2],其思路均是高负荷与多训练模式组合,诱导机体潜能,但其负面作用也显而易见,运动员长期大强度训练,易引起运动损伤。近些年,随着科技水平的突飞猛进,“科技精准助力竞技体育”,已逐渐在体育科研、运动实践中蓬勃开展,其中最引人注目的是“经颅直流电刺激”。

经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS),是一种非侵入性、无创伤性脑刺激技术(也称“神经启动技术”)^[3]。通过低强度电流作用于特定脑区,引起电场变化促使神经元发生去极化或超极化,进而兴奋或抑制大脑特定区域,促进神经元冲动同步化发放、增加突触可塑性及脑血流量、调节局部皮质及大脑网络连接等功能^[4]。

近几年,tDCS应用于运动科学领域的研究趋于增多,多数研究结果表明tDCS对提升运动能力具有积极作用。(1)促进运动技能获得、延缓运动疲劳。由于初级运动皮层(M1区)参与了技能习得阶段和早期巩固阶段的内隐运动学习,电刺激M1区能够显著提升动作学习效率,促进运动技能的获得和保持^[5]。a-tDCS(阳极刺激)通过提升运动皮层的兴奋性,降低中枢神经的疲劳反应^[6],受试者完成力竭运动任务的时间明显延长。(2)增强力量素质、优化灵敏与平衡。右侧运动皮质区实施阳极刺激,显著提高肘关节伸肌耐力^[7]。刺激右下颌叶皮层可提高知觉敏感与反应偏差,加速个体对复杂检测任务的学习进程^[8];改善闭眼站立时的姿势稳定性,增强应对复杂运动的姿态调整能力^[9]。

尽管tDCS应用于运动领域已存在一定数量的研究,当测试人群为运动员时仍存在以下问题:(1)针对运动员的研究结果呈现两极化。一类研究发现,电刺激后运动能力没有显著提高^[10],甚至是下降^[11],其解释为运动员长期进行运动训练,“天花板效应”愈加明显,进一步提升的空间很小。另一类研究认为,由于运动员具有较好的神经肌肉痕迹保持经验,可以将电刺激后所获得的急性痕迹效应迁移至运动过程中,通过影响动作技能的高质量重现、优化神经肌肉调控机

制,间接提高体能表现^[12],但此方面仍需进一步验证。(2)简单运动任务居多。以单关节^[13]、单平面^[14]、肌肉近端固定收缩形式^[15]的简单测试任务居多,干预前后测试分数确有提高,但是这些受控制的、偏静态的测试动作与运动实际中的多维平面、运动速度以及肌肉收缩机制等因素偏差较大、重叠效果较差。(3)刺激效果的延续性特征不够稳定。多数研究发现tDCS刺激前后存在显著差异,随着时间延长其激活效果逐渐消退至干预前^[16]。个别研究发现,电刺激后其效果可保持大约1h,但此类研究较少,对运动员而言,无论是日常训练或运动竞赛,长时间保持最佳运动状态是客观需求。

综上所述,经颅直流电技术具有无创、高效、易操作等特点,增强大脑与肌肉的联结,提升肌肉工作效率,强化人体多种运动能力。但是,当测试主体为运动员时仍存在以上问题,故本研究重点如下:选择接近运动实际需求的、多维运动平面的、多关节参与的复杂测试任务时,经颅直流电刺激技术能否对运动员体能表现产生较为全面的急性作用,以及此效果的时效延续特征。为进一步丰富电刺激技术运用至竞技体育的相关研究,科技助力运动员训练与竞赛,精准、有效提升体能表现水平,以及同行学者开展此方面研究提供可借鉴的依据。

1 测试对象与方法

1.1 测试对象

通过G*Power 3.1.9软件,设置样本计算参数(ES=0.25、 α =0.05、Power=0.9),计算出所需样本量为24人,故本研究招募24名男性大学生运动员(运动项目为田径、健美操、篮球及网球;运动水平为国家健将或国家一级)。受试者基本信息:年龄(21.14 ± 1.09)岁、身高(1.78 ± 0.09)m、体重(71.30 ± 13.04)kg、BMI(22.35 ± 2.26)kg/m²。所有受试者身体状况良好,脑部没有疾病史,不存在皮肤过敏、体内金属植入等经颅直流电刺激禁忌症;实验前24h内未从事剧烈运动,实验前4h内未摄入含酒精或咖啡因等具有兴奋作用的饮料。实验方案通过宁波大学体育学院伦理委员会审批(批准号:TY2022026),受试者在实验前均已知晓测试的基本流程与注意事项,自愿参加本研究并签署知情同意书。

1.2 试验方法

1)干预内容与实施步骤。

(1)干预内容:采用DC-STIMULATOR多通道经颅直流电刺激仪(德国, Neuroconn),依据国际10-20系统国际标准电极放置法以及Brodmann脑部皮层分区,对真刺激组受试者脑部C3、C4区放置阳极电极,以覆盖双侧初级运动皮层(primary motor cortex, M1),阴极电极置于两侧肩膀^[6]。静坐状态下,接受2 mA电流、持续20 min的电刺激干预。为避免安慰剂效应以及验证电刺激效果,安排假刺激组,电流强度、刺激时间及电极片位置与真刺激组相同,但在干预30 s后未告知受试者的情况下关闭仪器。干预过程中,若受试者感觉到任何脑部不适或其他异常反应,立即停止刺激。

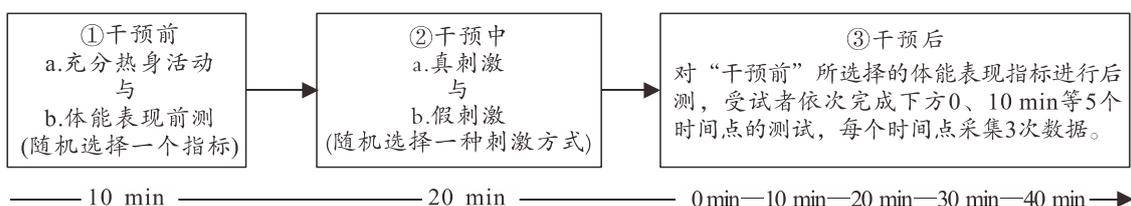


图1 实施阶段与流程

(3)注意事项:①为避免测试负荷累积对受试者机能状态的影响以及客观探寻刺激类型(真刺激或假刺激)对受试者不同体能表现指标的作用,每两次电刺激干预之间的洗脱期为48~72 h^[7],且每次只安排一种电刺激类型及一种体能表现能力测试,刺激类型与测试指标均是随机抽签决定。②每次测试时间均安排在15:00-17:00,且所有测试内容均在实验室内完成。

2)测试指标。

体能表现,由基础体能表现与专项体能表现构成,考虑到专项体能表现对测试场地、器材具有一定要求,不同专项教练或学者对专项体能表现侧重点不一致,缺乏较为公认的测试指标,故本研究选择适宜在实验室测评、不可控因素较少且能够量化的基础体能表现测试指标。尽管没有专项体能表现指标,但前者是后者顺利发展的必要条件,决定了专项体能表现的上限,相当于金字塔模型中“塔基”对于“塔尖”的重要性,因此基础体能表现指标也具有一定代表性。具体指标参考美国国家体能协会“Essentials of Strength Training and Conditioning(4th Edition)”推荐的运动能力经典测试内容^[1],分别为“平衡稳定”“灵敏反应”“变向敏捷”“肌肉爆发”4个方面,具体测试指标如下:

(1)平衡稳定能力测试。YBT(Y-Balance Test)功能性测试器材,采集下肢在3个方向伸出的最远距离综合值,评价受试者的动态平衡能力^[8]。测试要求:受试者左脚裸足站立在YBT测试套件上,左脚拇趾在中

所有经颅直流电刺激操作均由同一试验人员完成。

(2)实施步骤:①干预前,受试者先进行10 min中等强度热身(7 km/h慢跑),以及对全身大肌肉群进行拉伸与激活,达到最佳状态、避免运动损伤。然后,体能表现能力测试(具体内容见下文“2)测试指标”),将测试结果作为此项指标的基准值。②干预中,随机安排电刺激干预(具体操作见“(1)干预内容”)。③干预后,受试者在0、10、20、30、40 min时间点依次进行与前测指标相同的体能表现任务评估,每个时间点采集3次数据(间隔0.5~1 min),记录最佳值。具体实施流程图见图1。

心横线后对准正前方,身体正直、双手叉腰,右脚趾抵住滑块,尽力向正前、后内、后外3个方向伸出(见第141页图2);同一个方向上连续测试3次,取最优值(数值精确到0.5 cm)。左腿测试值=(正前+后外+后内)/(3倍腿长)×100。右腿测试同理。

(2)灵敏反应能力测试。灵敏反应测试系统(西班牙, Pavigym 3.0),由墙面无线反应区域组成,通过选择不同测试模块运行指定程序,采集受试者快速、准确完成运动任务的总时间,实时获取数据,精准反馈灵敏反应水平。测试要求:受试者双脚开立、半蹲姿态,立于灵敏墙前;控制系统倒计时结束即刻,墙面九宫格的屏幕指示灯随机亮起25次,受试者以最快速度连续触碰屏幕(只能使用手掌触碰),最后一次触碰结束即刻控制统计终止。结果输出以完成25次正确触击的总时间计算,单位为s。

(3)变向敏捷能力测试。“T”形移动变向跑,运动员在前后、左右长度9.2 m距离内,利用向前加速、减速制动,左右滑步及后退步等动作完成跑动变向敏捷测试。“T”形跑单次测试时长小于12 s,可以有效反映运动员的急停急起与变向速度^[9]。测试要求:首先,受试者在起点向前直线加速,双腿交替下压摆动、发力蹬地,接近标志物后,具有明显的减速制动动作;然后,侧滑步向左右方向移动;最后,采用后退跑步步伐返回起点。跑动过程中,测试者只能利用加速或减速动作,横向滑步、倒向后退动作,完成所有运动路径,且

躯干前侧始终面朝正前方。测试结果以实际完成时间计算,精确到0.01 s。

(4)肌肉爆发能力测试。Kistler 测力台(瑞士, Kistler), 采样频率 500 Hz, 受试者在测力台上完成反向动作跳跃(Counter Movement Jump, CMJ), CMJ 可以有效评价肌肉短时间内快速收缩时的发力能力以及峰值输出功率^[20]。

测试要求: 受试者双手叉腰, 抬头挺胸, 目视前方, 双脚与肩同宽、踩在测力台上; 听到信号后, 由直立位开始下蹲至最低位, 随后迅速反向垂直跳起, 避免向前后、左右跳跃; 腾空阶段保持伸膝状态, 着地前切勿勾腿, 落地后稳定站立 3 s 后结束本次动作。采集指标为: 纵跳高度(cm)、峰值功率(W/kg)。

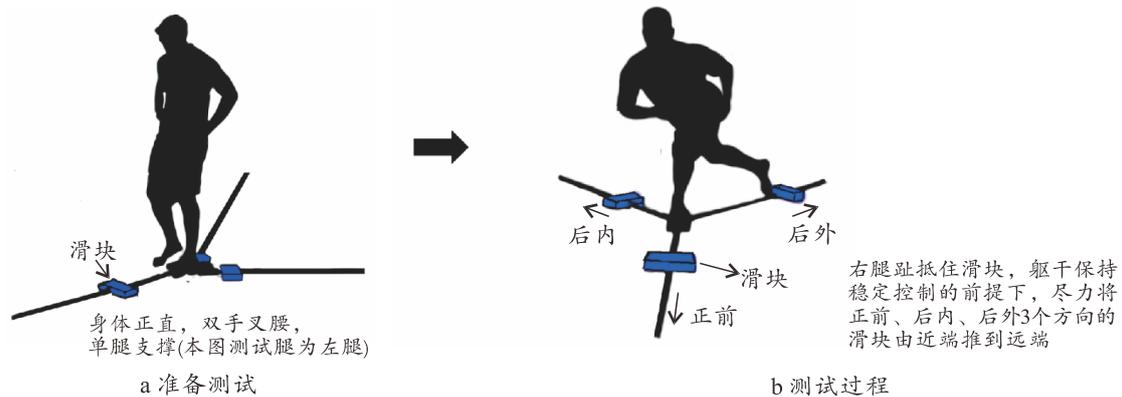


图2 “YBT”测试步骤示意

1.3 数理统计法

运用 SPSS 26.0 统计学软件对测试数据进行分析, 采用电刺激模式(真刺激、假刺激) × 测试时间点(基准、0、10、20、30、40 min)重复测量方差分析方法, 评估真刺激组与假刺激组, 在不同时间点完成平衡稳定、变向敏捷、灵敏反应等体能表现指标的变化情况。统计分析过程中若出现显著的主效应或交互作用, Bonferroni 方法进行事后两两比较分析。采用 Greenhouse-Geisser 对不满足球形检验的统计量进行修正, 显著水平 α 设为 0.05。效应量用 η_p^2 表示, 低效应(0.01~0.09)、中效应(0.09~0.25)、高效应(>0.25)^[11]。

2 结果与分析

2.1 tDCS 对平衡稳定能力的影响

右侧下肢动态平衡(结果见图 3), 刺激类型与测试时间点交互作用显著 ($F_{(5,115)}=25.332$, $P<0.001$, $\eta_p^2=0.835$)。测试时间点简单效应, 真刺激组: 基准值显著低于 0 min ($P=0.005$)、10 min ($P=0.006$)、20 min ($P=0.003$)、30 min ($P=0.012$) 及 40 min ($P<0.001$); 40 min 显著高于 0 min ($P=0.009$)、10 min ($P=0.039$)、20 min ($P=0.003$)。假刺激组: 基准值显著高于 10 min ($P=0.023$)、20 min ($P=0.01$)、30 min ($P=0.001$)、40 min ($P=0.003$)。刺激类型简单效应, 真刺激显著高于假刺激, 在 0 min ($P=0.001$)、10 min ($P=0.003$)、20 min ($P=0.001$)、30 min ($P=0.006$)、40 min ($P<0.001$)。

左侧下肢动态平衡(见图 3), 刺激类型与测试时间

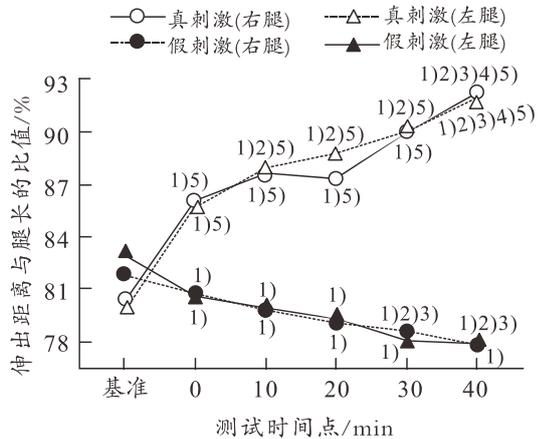
点交互作用显著 ($F_{(5,115)}=36.284$, $P<0.001$, $\eta_p^2=0.879$)。测试时间点简单效应, 真刺激组: 基准值显著低于 0 min ($P=0.002$)、10 min ($P=0.001$)、20 min ($P=0.002$)、30 min ($P=0.002$)、40 min ($P=0.001$); 0 min 显著低于 10 min ($P=0.035$)、20 min ($P=0.029$)、30 min ($P=0.048$)、40 min ($P=0.015$); 40 min 显著高于 10 min ($P=0.014$)、20 min ($P=0.045$)。假刺激组: 基准值显著高于 0 min ($P=0.009$)、10 min ($P=0.008$)、20 min ($P=0.040$)、30 min ($P=0.010$)、40 min ($P=0.001$); 30 min 显著低于 0 min ($P=0.048$)、10 min ($P=0.044$); 40 min 显著低于 0 min ($P=0.006$)、10 min ($P=0.013$)。刺激类型简单效应, 真刺激显著高于假刺激, 在 0 min ($P=0.003$)、10 min ($P=0.005$)、20 min ($P=0.005$)、30 min ($P=0.005$)、40 min ($P=0.001$)。

2.2 tDCS 对灵敏反应及变向敏捷能力的影响

灵敏墙测试(结果见图 4), 刺激类型与测试时间点交互作用显著 ($F_{(5,115)}=7.556$, $P<0.001$, $\eta_p^2=0.654$)。测试时间点简单效应, 真刺激组: 基准值显著慢于 0 min ($P=0.016$)、10 min ($P=0.011$)、20 min ($P=0.003$)、30 min ($P=0.020$)、40 min ($P=0.021$); 假刺激组各时间点均无显著差异 ($P>0.05$)。刺激类型简单效应, 真刺激显著快于假刺激, 在 10 min ($P<0.001$)、20 min ($P<0.001$)、30 min ($P=0.003$) 及 40 min ($P=0.011$)。

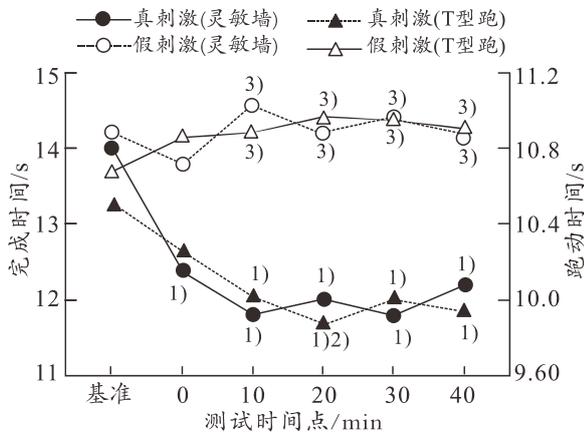
T 形变向跑动测试(结果见图 4), 刺激类型与测试时间点交互作用显著 ($F_{(5,115)}=10.682$, $P<0.001$, $\eta_p^2=0.728$)。测试时间点简单效应, 真刺激组: 基准值

显著慢于 10 min($P=0.012$)、20 min($P=0.004$)、30 min($P=0.004$)及 40 min($P=0.001$), 20 min 显著快于 0 min($P=0.015$); 假刺激组各时间点均无显著差异($P>0.05$)。刺激类型简单效应, 真刺激显著快于假刺激, 在 10 min($P=0.038$)、20 min($P=0.009$)、30 min($P=0.009$)、40 min($P=0.007$)。



1) 与“基准”比较, $P<0.05$; 2) 与“0”比较, $P<0.05$; 3) 与“10”比较, $P<0.05$; 4) 与“20”比较, $P<0.05$; 5) 与“假刺激组”比较, $P<0.05$

图3 真刺激与假刺激组动态平衡能力的变化趋势



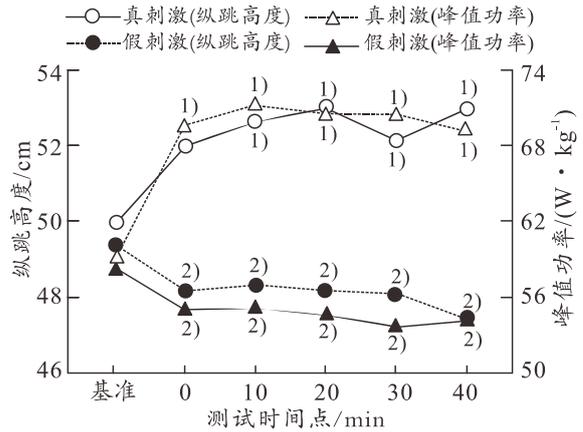
1) 与“基准”比较, $P<0.05$; 2) 与“0”比较, $P<0.05$; 3) 与“真刺激组”比较, $P<0.05$

图4 真刺激与假刺激组灵敏反应、变向敏捷能力的变化趋势

2.3 tDCS 对肌肉爆发能力的影响

纵跳高度测试(结果见图 5), 刺激类型与测试时间点交互作用显著($F_{(5,115)}=5.966$, $P=0.001$, $\eta_p^2=0.544$)。测试时间点简单效应, 真刺激组: 基准值显著低于 10 min($P=0.027$)、20 min($P=0.005$)、30 min($P=0.049$)及 40 min($P=0.013$); 假刺激组各时间点均无显著差异($P>0.05$)。刺激类型简单效应, 真刺激显著高于假刺激, 在 0 min($P=0.029$), 10 min($P=0.042$), 20 min($P=0.018$), 30 min($P=0.030$)及 40 min($P=0.047$)。

峰值功率测试(结果见图 5), 刺激类型与测试时间点交互作用显著($F_{(5,115)}=6.163$, $P=0.001$, $\eta_p^2=0.552$)。测试时间点简单效应, 真刺激组: 基准值显著低于 0 min($P=0.010$)、10 min($P=0.041$)、20 min($P=0.019$)、30 min($P=0.016$)及 40 min($P=0.049$); 假刺激组各时间点均无显著差异($P>0.05$)。刺激类型简单效应, 真刺激显著高于假刺激, 在 0 min($P=0.002$), 10 min($P=0.009$), 20 min($P<0.001$), 30 min($P<0.001$)及 40 min($P=0.005$)。



1) 与“基准”比较, $P<0.05$; 2) 与“真刺激组”比较, $P<0.05$

图5 真刺激与假刺激组纵跳高度、峰值功率的变化趋势

3 讨论

从研究结果可知, 经颅直流电刺激后, 真刺激组在平衡稳定、灵敏反应、敏捷变向及肌肉爆发方面要优于干预前, 较假刺激组也存在显著差异, 且呈现出一定的效果延续特征, 表明经颅直流电技术(简称 tDCS)可以应用于运动员的体能表现促进方面。

以往研究主要关注 tDCS 对非运动员群体或人体基本运动能力的作用效果, 其测试指标与运动员实际需求相差较远, 未考虑到测试结果在真实训练环境中的适应性。针对此问题, 本研究所选测试指标均来自运动员日常训练内容或体能水平经典评测项目, 从而保证了测试结果的实践性与应用性价值。平衡稳定指标, 同类型研究主要针对静态平衡^[21], 而本研究侧重动态平衡, 动态平衡是预防下肢运动损伤、能量有效输出及技能精准表达的前提, 更加符合运动实际中机体在非稳环境下抵抗外力干扰的姿态调控情况。灵敏反应与敏捷变向指标, 以往研究仅是观察 tDCS 对某一个方面的作用效果, 例如反应时、跑动速度等^[22], 而真实竞赛情景中运动员既需要满足耗时短、重复多、准确率高要求, 还需兼备迅速、协调地变化身体的空间位置与运动方向的能力, 其综合呈现价值远高于单一方面的结果输出。本次选择的灵敏墙连续敲击测

试与T形跑动测试,前者将反应时、准确度及重复次数进行融合,后者将高速奔跑与急停变向进行结合,较高程度还原了运动员的临场动作展现情况,贴近真实运动环境。

尽管tDCS可以对运动员的体能表现产生作用,但这仅是干预后的结果呈现,更需要透过现象抓住本质,对影响外在结果的内在机制进行探讨。此外,国内对tDCS的研究仍处于初期探索阶段,应用前景广阔,未来定会涌现tDCS干预运动表现的相关研究,但后续研究的成功开展必须建立在清晰的理论机制之上。

本研究与同类型研究在测试结果方面存在异质性:(1)肌肉爆发方面,Grosprêtre等^[23]与Romero等^[24]研究发现受试者tDCS干预后,无论在水平跳跃或垂直跳跃测试中,均没有显著提高甚至出现下降。而本研究发现,tDCS可以对反映下肢蹬伸爆发能力的腾空高度、峰值功率产生积极作用,与前人研究结果不一致。其原因是以往研究中选择的脑部刺激区域为背外侧前额叶皮层,前额叶区主导功能是执行与判断,虽然与感觉、运动皮层具有联系,但主要调节注意力、思维及行动,对人体运动能力的刺激效果远不如M1区。(2)效果保持方面,目前,针对tDCS的时效性结果并不一致,Ardolino等^[25]与Kaminski等^[26]认为9~20 min阳极刺激,运动皮层兴奋性长达1 h,平衡能力维持可以长达24 h。但是,仍有研究发现延续效果较差,刺激效果会随着时间延长逐渐减弱^[27]。而本研究发现受试者在tDCS后所获得的干预效果可以保持至刺激后40 min。其原因可能为以下两点:第一,经典运动能力衰减学说——运动能力下降为能源物质耗竭与机体疲劳累积双重影响。但Berthelot等^[28]发现,运动员自我主观疲劳“误判”的强烈认知输出,也会导致运动能力下降,即“暗示”机体已经“高度疲劳”应该“出现”能力下降。而tDCS通过提升岛叶皮层或颞叶的神经元活性,调高主观疲劳阈值^[29],间接降低运动员的疲劳认知敏感性,使机体保持较长时间的效率输出。第二,tDCS后人体内分泌机制的变化,神经元静息膜电位进行阈上电刺激,钙离子通道的数量和活性增加,间接诱导谷氨酸能系统中参与突触可塑性形成的N-甲基天冬氨酸受体活化^[5],从而产生长时程电位增强,诱导出较为持久的后效应。

研究局限及展望:耐力素质也是运动员体能表现的内容之一,但考虑到耐力素质测试周期较长,以及长耗时会消磨受试者的配合程度,无法真实反映耐力素质在干预后的急性变化情况,故本研究没有涉及耐力素质指标。望未来同领域学者,能够进一步探究tDCS对耐力素质的作用效果。

综上所述,大脑皮层双侧M1区经颅直流电刺激,可对运动员动态平衡、灵敏反应、敏捷变向及肌肉爆发等体能表现产生作用,具有见效快、时效长等特点,可考虑将其应用至运动员的训练实践或竞赛过程中。

参考文献:

- [1] G. 格雷戈里·哈夫, N. 特拉维斯·特里普利特. NACA-CSCS 美国国家体能协会体能教练认证指南[M]. 第四版. 王雄, 闫琪, 周爱国, 等译. 北京: 人民邮电出版社, 2021.
- [2] 姜自立, 李庆. 激活后增强效应研究进展述评[J]. 体育学刊, 2016, 23(1): 136-144.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] JAEHYUK L, YAN J, BUMCHUL Y. Bilateral transcranial direct stimulation over the primary motor cortex alters motor modularity of multiple muscles[J]. Journal of Motor Behavior, 2021, 52(4): 474-488.
- [6] OLDRATI V, SCHUTTER D J. Targeting the human cerebellum with transcranial direct current stimulation to modulate behavior: A Meta-analysis[J]. Cerebellum, 2018, 17(2): 228-236.
- [7] 郭峰, 鲁盼盼. 经颅直流电刺激技术作用机制及其在运动科学中的应用进展[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(7): 891-895.
- [8] ANGIUS L, PASCUAL L A, SANTARNECCHI E. Brain stimulation and physical performance[J]. Progress in Brain Research, 2018: 317-339.
- [9] HAFEZ Y M, FATEMEH E, MARYAM Z, et al. Multi-session anodal tDCS enhances the effects of postural training on balance and postural stability in older adults with high fall risk: Primary motor cortex versus cerebellar stimulation[J]. Brain Stimulation, 2018, 11(6): 1239-1250.
- [10] LIANG Z, ZHOU J, JIAO F, et al. Effect of transcranial direct current stimulation on endurance performance in elite female rowers: A pilot, single-blinded study[J]. Brain Sciences, 2022, 12(5): 1-9.
- [11] MESQUITA P H, LAGE G M, FRANCHINI E, et al. Bi-hemispheric anodal transcranial direct current stimulation worsens taekwondo-related performance[J]. Human Movement Science, 2019, 66(8): 578-586.

- [12] BORNHEIM S, CROISIER J L, LECLERCQ V, et al. The effects of tDCS on physical performances: A systematic literature review[J]. *Science & Sports*, 2020, 35(5): 255-270.
- [13] HAZIME F A, CUNHA R, SOLIAMAN R R, et al. Anodal transcranial direct current stimulation (tdcs) increases isometric strength of shoulder rotators muscles in handball players[J]. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 2017, 12(3): 402-407.
- [14] VARGAS V Z, BAPTISTA A F, PEREIRA G O, et al. Modulation of Isometric quadriceps strength in soccer players with transcranial direct current stimulation: A crossover study[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2018, 32(5): 1336-1341.
- [15] KAMALI A M, SAADI Z K, YAHYAVI S S, et al. Transcranial direct current stimulation to enhance athletic performance outcome in experienced bodybuilders[J]. *Plos One*, 2019, 14(8): 1-20.
- [16] 王玮, 朱志强, 殷可意, 等. 经颅直流电刺激对纵跳生物力学特征的影响[J]. *体育科学*, 2020, 40(7): 57-64.
- [17] MACHADO S, JANSEN P, ALMEIDA V, et al. Is tDCS an adjunct ergogenic resource for improving muscular strength and endurance performance? A systematic review[J]. *Frontiers in Psychology*, 2019, 10(8): 1-14.
- [18] FUSCO A, GIANCOTTI G F, FUCHS P X, et al. Y balance test: Are we doing it right?[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2020, 23(2): 194-199.
- [19] ARMSTRONG R, GREIG M. The functional movement screen and modified star excursion balance test as predictors of T-test agility performance in university rugby union and netball players[J]. *Physical Therapy in Sport*, 2018, 31(9): 15-21.
- [20] GORDON D, HAYWARD S, VAN K, et al. Reliability of bilateral and shear components in a two-legged counter-movement jump[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part P-Journal of Sports Engineering and Technology*, 2022, 236(3): 159-171.
- [21] 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.
- [22] 赵云波, 刘占捷, 李玲, 等. 阳极经颅直流电刺激技术对反应时及提升运动表现的影响[J]. *首都体育学院学报*, 2021, 33(5): 522-531.
- [23] GROSPRETRE S, GRANDPERRIN Y, NICOLIER M, et al. Effect of transcranial direct current stimulation on the psychomotor, cognitive, and motor performances of power athletes[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-13.
- [24] ROMERO A, SALVADOR CALDERON N, GIANCARLO ALIX F, et al. Transcranial direct current stimulation does not improve countermovement jump performance in young healthy men[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2021, 35(10): 1-4.
- [25] ARDOLINO G, BOSSI B, BARBIERI S, et al. Non-synaptic mechanisms underlie the after-effects of cathodal transcutaneous direct current stimulation of the human brain[J]. *Journal of Physiology*, 2010, 568(2): 653-663.
- [26] KAMINSKI E, STEELE C J, HOFF M, et al. Transcranial direct current stimulation (tDCS) over primary motor cortex leg area promotes dynamic balance task performance[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2016, 127(6): 2455-2462.
- [27] 姜祎凡. 经颅直流电刺激对纵跳影响的时效性及神经肌肉征召特性分析[D]. 上海: 上海体育学院, 2020.
- [28] BERTHELOT G, SEDEAUD A, MARCK A, et al. Has athletic performance reached its peak?[J]. *Sports Medicine*, 2015, 45(9): 1263-1271.
- [29] MAUDRICH T, RAGERT P, PERREY S, et al. Single-session anodal transcranial direct current stimulation to enhance sport-specific performance in athletes: A systematic review and meta-analysis[J]. *Brain Stimulation*, 2022, 15(6): 1517-1529.