



# 神经调控技术在体育领域中的应用

姚连强,孙国晓\*

**摘要:** 随着现代科学技术的成熟发展,神经调控技术逐渐从医学领域拓展至体育领域。在体育领域应用中,主要以无创神经调控技术为主要干预方式,通过电或磁等无创性手段对大脑皮层进行调节,影响神经系统功能进而提高运动功能水平。采用文献综述法对体育领域中神经调控技术研究进行述评,发现神经调控技术有助于增强运动技能学习效果、提高运动技能表现水平、促进运动康复效果,主要采用无创神经调控技术中的经颅交流电刺激(tACS)、经颅直流电刺激(tDCS)、重复经颅磁刺激(rTMS)进行调控。未来还需结合神经生理学或影像学等技术进行深入研究,并拓展对复杂体育技能的应用。

**关键词:** 神经调控;运动技能学习;运动表现;运动康复;经颅电刺激;经颅磁刺激  
中图分类号:G804 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2023)02-0080-07  
DOI:10.12064/ssr.2022021701

## The Research Progress of Neural Control Technology in Sports

YAO Lianqiang, SUN Guoxiao\*

(School of Physical Education, Shandong University, Jinan 250013, China)

**Abstract:** With the mature development of modern science and technology, neural control technology has gradually expanded from the medical field to the sports field. In sports, non-invasive neural control technology is used as the main intervention method, and the cerebral cortex is regulated through non-invasive means such as electricity or magnetism, so as to affect the function of the nervous system and thus improve the level of motor function. This article reviews the literature on researches of neural control technology in the field of sports, reveals that neural control technology can help enhance the learning effect of motor skills, improve the performance of motor skills and promote the effect of sports rehabilitation. It is mainly regulated by tACS, tDCS and rTMS in non-invasive neural regulation technology. In the future, further studies should be carried out in combination with neurophysiology or imaging techniques, and the application of complex sports skills should be expanded.

**Keywords:** neural control; motor skill learning; motor performance; motor rehabilitation; TES; TMS

人类活动由神经系统调节,而大脑是神经系统的重要部分,为更好地参与完成各类体育运动,需深入探索大脑结构和功能。大脑活动主要以神经元产生的电信号为基础,借助神经调控技术可调节和控制神经元,精准调控大脑特定区域,影响运动过程中的大脑活动,改善提高身体运动功能。

随着体育与神经科学的交叉融合发展,神经调控技术的体育应用研究不断增多,合理运用该技术能够提高运动者的运动表现,具体而言,如缓解肌肉疲劳、增强肌肉力量、提高平衡能力和运动感觉等<sup>[1]</sup>。此外,神经调控技术还可增强运动区、感觉运动区等脑区的功能连接性,影响运动者的大脑学习过程,从

而提高运动学习效果<sup>[2]</sup>。由于体育运动的参与性和连续性,研究干预手段不可影响运动者的后续运动过程,因此无创(非侵入性)神经调控技术更适合体育领域研究应用,其中又以经颅电刺激(Transcranial Electrical Stimulation, TES)和经颅磁刺激(Transcranial Magnetic Stimulation, TMS)调控研究居多。

尽管神经调控体育研究日益增多,但刺激方式、刺激参数、运动类型等仍存在差异,且缺乏系统化概述。因此,为促进神经调控技术在体育领域的合理应用,丰富体育领域多学科融合研究,本文简述神经调控技术的概念及分类,阐明神经调控技术在运动技能学习、竞赛表现和运动康复中的应用,并展望其发展前景。

收稿日期:2022-02-17

基金项目:国家体育总局决策咨询项目(YB20220322)。

第一作者简介:姚连强,男,硕士研究生。主要研究方向:运动人体科学。E-mail:yaolianqiang@mail.sdu.edu.cn。

\*通信作者简介:孙国晓,女,博士,副教授,博士生导师。主要研究方向:体育心理学。E-mail:sunguoxiao@sdu.edu.cn。

作者单位:山东大学体育学院,山东 济南 250013。



## 1 神经调控技术的概念及分类

神经调控技术是指通过侵入性或非侵入性技术,采用声、光、电、磁或化学性手段,特定调节改变大脑中枢、自主等神经系统的神经元或神经信号,改变神经网络活动性以及脑功能,从而改善疾病症状、提高生活质量的一种生物医学技术<sup>[3]</sup>。随着技术发展成熟化,神经调控研究也从生物医学扩展至体育应用领域,不仅为运动障碍人群提供新的治疗方式,也为

运动者提供一种可行的运动训练和技能学习方式。

根据调控实施过程中对个体采取的操作方式是否对身体产生物理创伤,可将神经调控技术分为无创和有创。无创技术包括 TES、TMS、超声调控、化学调控,有创技术包括光遗传学调控、脑深部电刺激(Deep Brain Stimulation, DBS)和迷走神经刺激(Vagus Nerve Stimulation, VNS)等<sup>[3]</sup>(表 1)。其中,有创神经调控技术偏向于临床研究疾病治疗,而无创非侵入性神经调控技术多应用于体育领域<sup>[4-6]</sup>。

表 1 神经调控技术分类表

Table1 Classification of neural regulation techniques

| 分类       | 具体技术                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 无创神经调控技术 | TES:经颅交流电刺激(transcranial Alternating Current Stimulation, tACS)、经颅直流电刺激(transcranial Direct Current Stimulation, tDCS)<br>TMS:重复经颅磁刺激(repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, rTMS)、单脉冲经颅磁刺激(single-pulse Transcranial Magnetic Stimulation, sTMS)、双脉冲经颅磁刺激(paired-pulse Transcranial Magnetic Stimulation, pTMS)<br>化学遗传学调控、超声调控 |
| 有创神经调控技术 | 光遗传学调控<br>脊髓刺激(Spinal Cord Stimulation, SCS)、骶神经刺激(Sacral Nerve Stimulation, SNS)<br>DBS、VNS                                                                                                                                                                                                                                            |

## 2 神经调控技术在体育领域中的研究进展

### 2.1 神经调控技术在运动技能学习领域中的应用研究

运动技能学习是个体通过对技术动作进行重复练习而产生持久反应的一个变化过程,主要通过感受器将动作信号传入中枢系统进行加工后输出至运动神经系统<sup>[7]</sup>。究其神经生理机制,主要由初级运动皮层(M1 区)加快和巩固运动技能学习效果<sup>[4]</sup>。因此多数研究均通过刺激 M1 区,影响运动技能学习的获得、巩固和保持阶段。

#### 2.1.1 tACS 对运动技能学习的作用

tACS 与 tDCS 的区别在于刺激电流的类型,相同点是通过一定频率的电流刺激大脑皮层。研究表明脑内振荡活动影响大脑功能发挥作用,并根据频率不同可分为: $\delta$ ( $<4$  Hz)、 $\theta$ ( $4\sim7$  Hz)、 $\alpha$ ( $8\sim12$  Hz)、 $\beta$ ( $13\sim30$  Hz)和  $\gamma$ ( $>30$  Hz),因此频率不同的 tACS 会对运动学习起到不同的效果。如魏泽等<sup>[8]</sup>发现 20 Hz 的  $\beta$ -tACS 能够提高测试者的任务完成正确率、反应速度,Hisato 等<sup>[9]</sup>发现 70 Hz 的  $\gamma$ -tACS 能够影响大脑内源性神经振荡,提高皮层神经兴奋性,从而提高被试的运动学习能力。但也有研究发现  $\alpha$ -tACS (10 Hz)会破坏运动技能巩固<sup>[10]</sup>,在测试者运动学习结束后分别进行  $\alpha$ -tACS 和  $\beta$ -tACS 刺激,发现相比对照组, $\alpha$ -tACS 组测试者的运动完成度较低,技能学

习保持效果不佳,而  $\beta$ -tACS 组无差异。 $\beta$ -tACS 和  $\gamma$ -tACS 的积极效果也得到张学军等<sup>[11]</sup>研究的证实,他们以 M1 区为刺激区域,以健康成年人作为测试群体,以一般运动技能和序列特异性技能作为测试任务,分别进行  $\beta$  波段(20 Hz-tACS)和  $\gamma$  波段(70 Hz-tACS)刺激,发现 2 种波段刺激均提高了运动技能的学习巩固效果,从而为 tACS 提高运动学习效果提供了新的证据。

综上可知,若采用 tACS 提高学习效果,最好参考以往研究结果和运动类型采用合适的刺激参数。此外更需要注意的是应用安全性问题,tACS 相关研究较少,很大程度上是因为交流电的危险较高,因此需要严格把控实验的刺激参数和实施流程,着重注意实验操作的规范性。

#### 2.1.2 tDCS 对运动技能学习的作用

tDCS 可增强大脑皮层神经活性,提高各运动区之间的功能连接性,从而提高运动学习的记忆效果。对于运动技能学习获得,Zhu 等<sup>[12]</sup>对高尔夫新手进行 tDCS,评估刺激前后推杆运动表现,结果表明 tDCS 提高参与者推杆命中率,有利于运动技能学习,Furuya 等<sup>[13]</sup>对钢琴初学者进行 tDCS,结果提高了其完成复杂精细手指运动任务的速度和准确性,同样证实 tDCS 增强运动学习获得的积极作用。对于运动技能学习的巩固和保持,Reis 等<sup>[14]</sup>发现,接受 tDCS 的参与者对所学运动技术的遗忘程度要远低于接受假刺激参与者,运动技能记忆维持时间得到延长,因



而 tDCS 有利于长期维持学习效果,促进运动技能巩固。研究表明 tDCS 对运动学习的获得、巩固和保持阶段均具有积极效用。

应用过程中还需注意刺激对象、刺激类型、刺激时间点、应用类型等。刺激对象主要受年龄影响,由于大脑结构功能不同使得 tDCS 效果略有差异,Fiori 等<sup>[15]</sup>对青年人和老年人进行刺激干预,发现老年人运动学习效果更佳,但对于青年人没有影响,这可能是由于 tDCS 更有利于改善老化脑功能。刺激类型,依据电极放置可分为单边、双边和中线刺激,研究表明适宜刺激类型会提高运动学习效果,例如双侧 tDCS 比单侧刺激对运动学习效果的提高作用更明显<sup>[15]</sup>。对于运动类型,tDCS 既可对简单运动项目(如手指敲击、手掌握拳等<sup>[2,13]</sup>)学习产生积极影响,同时也能提高复杂运动技能(如高尔夫推杆<sup>[12,16]</sup>)的学习效果。

此外刺激施加的时间节点需要格外注意,如在学习之前进行 tDCS 会使得运动能力下降<sup>[17]</sup>,在学习过程中和之后刺激反而促进运动技能的学习获得和技能巩固<sup>[12,14,16,18]</sup>,究其生理机制,可能是 tDCS 会改变调节 N-甲基-D-天冬氨酸(NMDA)受体和  $Ca^{2+}$  通道,但 tDCS 的学习促进作用主要通过单独的 NMDA 受体实现, $Ca^{2+}$  通道改变反而会影响 tDCS 效果,从而影响运动学习效果<sup>[17,19]</sup>。

以上研究表明,tDCS 主要通过激活 M1 区对运动技能学习产生积极效用,影响技能获得、巩固和保持阶段,并能提高不同运动类型的学习效果,但由于干预对象、类型和时间点不同会影响干预效果,因此为提高干预效果需结合研究和实际情况进行适宜干预。

### 2.1.3 rTMS 对运动技能学习的作用

rTMS 是根据“磁生电”原理,间接产生电流刺激神经细胞,从而提高或抑制神经兴奋。对 M1 区进行 rTMS 调控,能够有效激活大脑区域网络,衰减运动学习遗忘,促进运动记忆巩固,增强运动技能学习持续性<sup>[20]</sup>,提高运动学习的抗干扰能力。并且这种促进作用具有同侧效应<sup>[21]</sup>,例如对右脑进行 rTMS 后,右手手指的学习效果更佳,反之左手手指学习效果受到了干扰。这表明通过 rTMS 可以有针对性提高非优势手的学习效果,对于体操、游泳等需要对称肢体参与的运动,往往因为非优势肢体的劣势而学习效果不佳,因此在学习新技术过程中可施加 rTMS 改善非优势肢体运动功能,提高技能学习整体掌握程度。

此外,不同的刺激施加时间点会造成不一样的结果。与 tDCS 略有不同(学习前施加刺激会损害运动学习),在运动学习后的几个小时进行 rTMS,反而会破坏之前的学习获得效果<sup>[22]</sup>,因此对学习进行

rTMS 时需要注意调控的时间、参数和位置,不断探索其神经作用机制,以期将 rTMS 作为一种提高学习效果的有效方法。

## 2.2 神经调控技术在运动表现领域中的应用研究

### 2.2.1 tACS 对运动表现提高的作用

提高运动表现的 TES 多以 tDCS 为主,tACS 研究较少,主要针对精细运动技能的运动改善。具体而言,Miyaguchi 等<sup>[23-25]</sup>发现, $\gamma$ -tACS 能够提高健康成人的手部运动表现,对参与者 M1 区、小脑、辅助运动区等进行神经调控,提高参与者完成手指等距外展运动的精准度和普度钉板测验得分,表明 tACS 能够改善提高精细运动表现。此外,国内学者庄薇等<sup>[26]</sup>采用上肢投掷任务,发现 tACS 能够提高上肢腕关节的灵活度以及肘-腕关节的协调度,同样证实 tACS 对精细动作表现的改善作用。

### 2.2.2 tDCS 对运动表现提高的作用

研究发现 tDCS 能够增强个体肌肉力量、缓解肌肉神经疲劳、降低主观疲劳感(Rating of Perceived Exertion, RPE),提高个体运动表现水平。王玮等<sup>[4]</sup>为探究 tDCS 对跳跃运动表现的影响,对专业运动员的 M1 区进行刺激,发现运动员的跳跃高度、蹬地功率和垂直冲量得到显著提高,表明 tDCS 有利于增强运动员的下肢力量以及肌肉神经系统功能,进而提高运动员的爆发力。除提高肌肉力量外,还有研究发现 tDCS 能在缓解肌肉疲劳的同时减轻 RPE<sup>[27-28]</sup>,这对于增强肌肉耐力和提高动作完成准确性具有积极作用。

但并非所有 tDCS 均可起到积极效果,如 Romero-Arenas 等<sup>[29]</sup>在探究 tDCS 对运动员反向运动跳跃(Counter Movement Jump, CMJ)能力的影响中发现,刺激后的 CMJ 高度以及峰值功率并没有得到显著提高,tDCS 对跳跃运动表现并没有提高作用,Mesquita 等<sup>[30]</sup>研究发现,tDCS 还会恶化运动者的 CMJ 相关表现,导致不同结果的原因可能是刺激位置、运动水平差异等因素。因此为提高 tDCS 的应用效果,在实际研究过程中需结合多方面因素进行综合考虑,如刺激条件、运动环境、运动水平、运动项目类型等。

其中刺激条件包括刺激强度、时间、部位、方式等。尽管最优刺激计量尚未明确,但多采用 1.5~2 mA 电流强度、25~35 cm<sup>2</sup> 电极面积、小于 20 min 持续刺激时间<sup>[31]</sup>;常见刺激区域为 M1 区,但仍有研究发现,刺激颞叶(Temporal Cortex, TC)、岛叶皮质(Insular Cortex, IC)和自主神经系统(Autonomic Nervous System, ANS)<sup>[32]</sup>能够增强个体运动感知,提高对身体感受的控制力,前额叶皮层(Prefrontal Cortex, PFC)<sup>[33-34]</sup>



可改善个体抑制控制能力,提高对身体疲劳的控制,从而维持高水平的耐力和力量表现;Angius 等<sup>[35-36]</sup>分别采用单边、双边、中线和双刺激的方式对参与者进行 tDCS,测量参与者完成运动任务时的疲劳感、痛觉,发现双边刺激能够显著降低肌肉乳酸堆积和感知疲劳,有利于提高大脑皮层兴奋性并提高运动者的耐力表现。

对于运动环境而言,温度是重要因素之一。由于运动环境温度影响运动者的感知水平<sup>[37]</sup>,而炎热环境下个体神经元会大量激活<sup>[38]</sup>,改善最大运动表现,因此 Barwood 等<sup>[39]</sup>为进一步验证 tDCS 在高温环境下的应用效果,开展实验探究 tDCS 对高温条件下运动至力竭测试(TTE)的影响,发现实验中运动者 TTE 和 RPE 无差异,tDCS 似乎不会促进高温环境下的运动表现,这可能是运动环境因素导致,尽管高温能够提高机体心血管需求和神经兴奋性,但同时也会增加神经中枢疲劳<sup>[40]</sup>,因此高温条件有可能会抵消 tDCS 所带来的积极效果。

对于运动者的运动水平,研究发现 tDCS 效果受运动水平高低影响,如 Vargas 等<sup>[41]</sup>和 Mathias 等<sup>[42]</sup>分别对专业运动员和新手进行 tDCS 并测量膝关节等长收缩(Maximum Voluntary Isometric Contraction, MVIC)变化,均发现 tDCS 有利于改善其运动表现。但 Oliver 等<sup>[43]</sup>和 Mesquita 等<sup>[30]</sup>在对专业运动员进行 tDCS 后,发现参与者速度性运动表现并未显著提高,反而提高了个体 RPE,甚至在刺激后较长时间内这种消极效果仍然存在,这可能是运动任务敏感度过高、运动员存在天花板效应等原因导致。

对于运动项目类型,研究发现 tDCS 的运动表现提高作用不仅局限于单一运动类型,对多种类型运动均具有积极效果。Koryagina 等<sup>[5]</sup>对田径、铁人三项、举重、空手道和橄榄球专业运动员进行 tDCS,发现运动员心肺功能(田径和铁人三项)、机体恢复速度(举重)、心理稳定性(橄榄球和空手道)得到提高,而这种生理作用差异与速度性、力量性和对抗性运动类型特点有关,因此在研究中需结合运动特点,判断 tDCS 对运动表现的具体作用效果。

综上,tDCS 能够提高运动者的力量、耐力等运动表现,但在应用过程中应格外注意刺激参数设置以及刺激过程中的外界环境因素,针对不同运动水平参与者选择合适的刺激方式和位置,并对多种运动类型进行实际应用探究,拓展 tDCS 的应用范围。

### 2.2.3 rTMS 对运动表现提高的作用

TMS 能够提高运动员唤醒水平、增强注意力、缓解运动焦虑、改善睡眠,达到提高运动表现的目的。提

高兴奋性有利于充分调动身体,使运动员在赛场上正常甚至超常发挥,以往多采用自我暗示、表象练习、热身活动等方式,但效果并不理想。高频( $>5\text{ Hz}$ )rTMS 能够提高大脑皮层兴奋性,近年常作为新型干预手段,用来提高运动员唤醒水平。为探究最有效的刺激参数,国内学者刘运洲等<sup>[44]</sup>通过对运动员 M1 进行不同参数的 rTMS,发现 20 Hz、90%静息阈值、3 000 次 rTMS 的能够更好地提高运动员唤醒水平,之后在与其他研究者合作中采用该参数对运动员左侧背外侧前额叶进行刺激,借助脑电活动、神经递质、心率等证据<sup>[45-46]</sup>,进一步证明高频 rTMS 对运动唤醒的重要作用。

此外还有研究发现高频 rTMS 能够提高拳击运动员选择性注意的反应速度和准确性<sup>[6]</sup>,证明 rTMS 可作为一种新的专项运动训练方式,通过高频 rTMS 来提高运动员对赛场上信息的处理能力和解决能力,做到运动中快速转换关注目标,从而占领比赛先机,取得优异表现,这对于对抗性和技巧性运动项目有着重要的应用价值。对于其他类型的运动员是否具有相同的促进效果仍需进一步研究。

高频 rTMS 有利于增强唤醒水平,而低频( $\leq 1\text{ Hz}$ )rTMS 则能够降低神经兴奋性,有效缓解赛前焦虑,还能够改善运动员的睡眠水平。刘运洲等<sup>[47]</sup>将低频 rTMS 作为干预手段,对运动员右侧前额叶进行刺激,从而降低其皮层兴奋性和状态焦虑,测量运动员在不同刺激时间点的运动诱发电位振幅,以评价其运动机能水平,发现刺激具有时效性,刺激后 60~120 min 内效果最佳,有效降低皮层兴奋性,达到缓解焦虑的目的。除缓解焦虑外,降低皮层兴奋性还有利于提高运动员的睡眠水平。在实践应用中,对某省队 3 位睡眠不佳的跳水运动员进行一周的低频 tTMS 干预<sup>[48]</sup>,干预后运动员的自评睡眠质量升高、状态焦虑水平下降、匹兹堡睡眠质量指数升高,同时充足的睡眠缓解了生理和心理双重疲劳,运动表现得到提高。以上研究皆表明 rTMS 能够提高或降低唤醒水平,改善运动员运动系统功能,提高运动表现。

## 2.3 神经调控技术在运动康复领域中的应用研究

TES 或 rTMS 可用于治疗运动障碍,主要应用于脑卒中或脊髓损伤后的运动康复。脑卒中是成年人产生运动障碍的主要原因,借助 TES 提高受损肢体运动功能、促进康复<sup>[49-50]</sup>。患者在接受 TES 前和接受后分别进行手部功能测试(包括拿、放、移动等动作)、徒手肌力测试和运动功能量表评分,发现运动皮层兴奋性提高导致手部肌肉力量得到增强、手部活动精准度提高、运动功能得分升高,康复效果大大



提高。而高频 rTMS 也被广泛应用于脑卒中患者的运动康复<sup>[51-52]</sup>,通过 rTMS 联合常规康复能够提高患者运动得分以及自我评价水平,运动康复治疗效果维持时间长达 10 d<sup>[52]</sup>。

除脑卒中导致的运动障碍,意外创伤事件也会导致运动功能障碍,例如脊髓损伤。神经调控技术同样有利于促进脊髓损伤后的运动康复<sup>[53-54]</sup>,通过影响大脑皮层兴奋性以及神经信号传递,改变突触和皮质脊髓束的可塑性,提高脑与脊髓之间的神经连接性,从而增强受损肢体运动功能,达到运动康复的目的。该方式也成为体育结合医学的康复手段,并被广泛运用于体育运动康复中。

### 3 研究展望

在未来研究中可结合神经成像技术,例如脑电图 (Electroence Phalogram, EEG)、功能磁共振成像 (Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)、功能性近红外 (functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS) 等<sup>[55-58]</sup>,在神经调控技术应用中将其作为一种检测工具,通过定量的检测结果来科学评定神经调控对体育运动的促进效果,并进一步探究各脑区之间相互作用的因果关系。例如借助 EEG 监测刺激脑区电位的时空变化,比较 TMS 所诱发的神经振荡与事件相关电位之间的联系<sup>[57]</sup>,或确定 tACS 频率和位置,这种技术结合研究能够进一步解释神经调控的作用机制并提高运动学习、表现和康复效果。通过结合神经成像技术的方式提高体育运动学习效果和运动表现水平,为神经调控刺激前参数设置、刺激后效果评判提供准确的判断,从而实现技术结合应用,提高神经调控的科学有效性。

此外还应促进神经调控技术与体育技能的深入结合,提高对复杂体育运动技能的应用效果,如球类、对抗类等开放式运动项目的技能学习和运动表现。以往研究多采用闭锁式运动技能,动作技能简单,但未来应不断推动探究神经调控在体育教学和训练中的实际应用,加快理论和成果之间的转化,以期将神经调控技术发展成一种运动训练和学习方式。

尽管神经调控技术在体育研究领域应用前景广泛,但也存在一些挑战。例如应用安全性,神经刺激参数过高会导致癫痫风险,合理的干预方案能够避免对运动者造成伤害;应用手段较少,除 TES 和 TMS 外,其他强有力的调控手段(光遗传学、超声刺激)尚未在体育领域得到充足应用;此外不同人群(如运动员、普通人与老年人)体质存在差异,神经调控的效果是否达到预期,以及神经调控用于提高运动表现是否会被作为一种“神经兴奋剂”等伦理问题,都需进一步解决。

### 4 小结

神经调控技术能够改变皮质兴奋性,加强中枢神经与周围神经之间的连接性,提高肢体控制力,有利于运动技能获得、保持和巩固,并且可针对性提高弱势肢体学习效果,同时应用神经调控技术能够增强肌肉力量、缓解肌肉疲劳、提高唤醒水平、降低焦虑、改善睡眠,达到运动学习、运动表现以及运动康复的目的。神经调控技术应用于体育领域,既产生了体育教育和运动训练的新方式,又推动了体育与其他领域的融合发展。在之后的研究中,需要进行学科协作以及技术协作,借助先进技术分析体育运动项目,提高体育运动的科学性。

### 参考文献:

- [1] 朱志强,王熙,张丹,等.经颅电刺激对人体运动控制能力的影响研究进展[J].中国运动医学杂志,2020,39(10): 825-829.
- [2] 乔淇淇,王新,康灵,等.经颅直流电刺激技术对运动表现影响的国外研究进展[J].体育科学,2020,40(6):83-95.
- [3] 张迪,于猛,刘霞.神经调控技术简述[J].山东大学学报(医学版),2020,58(8):50-60.
- [4] 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.
- [5] KORYAGINA Y V, ROGULEVA L G, NOPIN S V, et al. Effects of application of transcranial electrical stimulation in the training process at elite athletes of various sports[J]. Voprosy Kurortologii, Fizioterapii, I Lechebnoi Fizicheskoi Kultury, 2020, 97(5):70-79.
- [6] 李巍,赵洪朋.背外侧前额叶活动水平对拳击运动员选择性注意的影响[J].中国运动医学杂志,2021,40(3): 208-215.
- [7] 刘洪广,刘洁.人类运动技能学习的脑机制[J].西安体育学院学报,2006,23(1):123-126.
- [8] 魏泽,许敏鹏,明东,等.节律性经颅交流电刺激对运动序列学习能力的影响[J].中国康复理论与实践,2019, 25(11):1327-1331.
- [9] HISATO S, KAZUHIRO Y, SHOGO Y, et al. Modulation of motor learning capacity by transcranial alternating current stimulation[J]. Neuroscience, 2018, 391: 131-139.
- [10] RUMPF J J, BARBU A, FRICKE C, et al. Posttraining alpha transcranial alternating current stimulation impairs motor consolidation in elderly people[J]. Neural Plasticity, 2019, 2019: 1-11.
- [11] 张学军,李菲.经颅交流电刺激对运动技能学习与巩固的作用[J].科学技术与工程,2022,22(27):11850-11857.
- [12] ZHU F F, YEUNG A Y, POOLTON J M, et al. Catho-



- dal transcranial direct current stimulation over left dorso-lateral prefrontal cortex area promotes implicit motor learning in a golf putting task[J]. *Brain Stimulation*, 2015, 8(4):784-786.
- [13] FURUYA S, KLAUS M, NITSCHKE M A, et al. Ceiling effects prevent further improvement of transcranial stimulation in skilled musicians[J]. *The Journal of Neuroscience*, 2014, 34(41):13834-13839.
- [14] REIS J, SCHAMBRA H M, COHEN L G, et al. Noninvasive cortical stimulation enhances motor skill acquisition over multiple days through an effect on consolidation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(5):1590-1595.
- [15] FIORI V, NITSCHKE M, IASEVOLI L, et al. Differential effects of bihemispheric and unihemispheric transcranial direct current stimulation in young and elderly adults in verbal learning[J]. *Behavioural Brain Research*, 2017, 321: 170-175.
- [16] PARMA J O, LEANDRO DA SILVA PROFETA V, DE ANDRADE A G P, et al. TDCS of the primary motor cortex: Learning the absolute dimension of a complex motor task[J]. *Journal of Motor Behavior*, 2021, 53(4):431-444.
- [17] KUO M, UNGER M, LIEBETANZ D, et al. Limited impact of homeostatic plasticity on motor learning in humans[J]. *Neuropsychologia*, 2008, 46(8):2122-2128.
- [18] FRANCA T, FILIPPO Z, GIOVANNI A, et al. Anodal transcranial direct current stimulation enhances procedural consolidation[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2010, 104(2):1134-40.
- [19] NITSCHKE M A, FRICKE K, HENSCHKE U, et al. Pharmacological modulation of cortical excitability shifts induced by transcranial direct current stimulation in humans [J]. *The Journal of Physiology*, 2003, 553(Pt 1):293-301.
- [20] LARA B, MEGHAN L. Excitatory repetitive transcranial magnetic stimulation to left dorsal premotor cortex enhances motor consolidation of new skills [J]. *BMC Neuroscience*, 2009, 10(1):72.
- [21] MASAHIITO K, HUGO T, ALVARO P L. Suppression of ipsilateral motor cortex facilitates motor skill learning[J]. *The European Journal of Neuroscience*, 2009, 29(4): 833-836.
- [22] BROWN LIANA E, WILSON ELIZABETH T, GRIBBLE PAUL L. Repetitive transcranial magnetic stimulation to the primary motor cortex interferes with motor learning by observing[J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2009, 21(5):1013-22.
- [23] SHOTA M, NAOFUMI O, SHO K, et al. Transcranial alternating current stimulation with gamma oscillations over the primary motor cortex and cerebellar hemisphere improved visuomotor performance[J]. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2018, 12:132.
- [24] MIYAGUCHI S, INUKAI Y, TAKAHASHI R, et al. Effects of stimulating the supplementary motor area with a transcranial alternating current for bimanual movement performance[J]. *Behavioural Brain Research*, 2020, 393 (prepublish):112801.
- [25] SHOTA M, YASUTO I, SHUJI M, et al. Gamma-transcranial alternating current stimulation on the cerebellum and supplementary motor area improves bimanual motor skill[J]. *Behavioural Brain Research*, 2022, 424:113805.
- [26] 庄薇,殷可意,卞秀玲,等.经颅交流电刺激对上肢投掷双任务的影响研究[J].*医用生物力学*,2021,36(S1):136.
- [27] ABDELMOULA A, 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.
- [28] SARA R. 'Brain doping' may improve athletes' performance[J]. *Nature*, 2016, 531(7594):283-4.
- [29] SALVADOR R A, GIANCARLO C N, CARLOS A F, et al. Transcranial direct current stimulation does not improve countermovement jump performance in young healthy men[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2019, 35(10):2918-2921.
- [30] MESQUITA P, LAGE G, FRANCHINI E, et al. Bi-hemispheric anodal transcranial direct current stimulation worsens taekwondo-related performance[J]. *Human Movement Science*, 2019, 66:578-586.
- [31] 唐文静,李丹阳,胡惠莉,等.经颅直流电刺激干预运动表现:效果及应用策略[J].*体育科学*,2020,40(8):74-87.
- [32] HIDEKI O A, BODNARIUC F E, AYRES M R, et al. Brain stimulation modulates the autonomic nervous system, rating of perceived exertion and performance during maximal exercise[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2015, 49(18):1213-1218.
- [33] 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]. *Human Movement Science*, 2019, 67(C):102507.
- [34] EDUARDO L, ANDRADE MARIA L, FILHO ALBERTO S, et al. Can transcranial direct current stimulation improve the resistance strength and decrease the rating perceived scale in recreational weight-training experience? [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2016, 30(12):3381-3387.
- [35] LUCA A, HOPKER JAMES G, MARCORA SAMUELE



- M, et al. The effect of transcranial direct current stimulation of the motor cortex on exercise-induced pain[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2015, 115(11):2311-9.
- [36] ANGIUS L, MAUGER A, HOPKER J, et al. Bilateral extracephalic transcranial direct current stimulation improves endurance performance in healthy individuals[J]. *Brain Stimulation*, 2018, 11(1):108-117.
- [37] HELEN C, ROSS T, NOAKES TIMOTHY D. The rate of increase in rating of perceived exertion predicts the duration of exercise to fatigue at a fixed power output in different environmental conditions[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2008, 103(5):569-577.
- [38] ROSS T, LAURIE R, HARLEY YOLANDE X R, et al. Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment[J]. *Pflugers Archiv: European Journal of Physiology*, 2004, 448(4):422-30.
- [39] BARWOOD M J, BUTTERWORTH J, GOODALL S, et al. The effects of direct current stimulation on exercise performance, pacing and perception in temperate and hot environments[J]. *Brain Stimulation*, 2016, 9(6):842-849.
- [40] NYBO L, NIELSEN B. Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans [J]. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md: 1985), 2001, 91(3):1055-1060.
- [41] VARGAS VALENTINE Z, BAPTISTA ABRAHAO F, PEREIRA GUILHERME O C, 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.
- [42] MATHIAS K, MIKKEL T J, JENS N, et al. The effect of anodal transcranial direct current stimulation on quadriceps maximal voluntary contraction, corticospinal excitability, and voluntary activation levels[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2021.
- [43] OLIVER S, PATRICK R. Effects of transcranial direct current stimulation of primary motor cortex on reaction time and tapping performance: A comparison between athletes and non-athletes[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, 13:103.
- [44] 刘运洲,张忠秋.高频重复经颅磁刺激提高运动皮层兴奋性的研究[J].*上海体育学院学报*,2010,34(5):58-63.
- [45] 罗光霞,刘运洲.高频重复经颅磁刺激(rTMS)提高运动员的兴奋性及其脑电特征研究[J].*天津体育学院学报*,2011,26(5):449-452.
- [46] 刘运洲,张忠秋.高频重复经颅磁刺激(rTMS)提高唤醒的研究[J].*中国运动医学杂志*,2014,33(7):704-712.
- [47] 刘运洲,张忠秋.低频重复经颅磁刺激(rTMS)降低运动皮层兴奋性的研究[J].*中国体育科技*,2010,46(4):134-138,144.
- [48] 刘运洲,张忠秋.低频重复经颅磁刺激提高运动员睡眠质量的应用研究[J].*中国运动医学杂志*,2012,31(12):1103-1106.
- [49] 徐光军,刘芳,张文渊.经颅电刺激在急性脑梗死患者运动功能康复中的作用[J].*临床神经电生理学杂志*, 2007,16(5):281-284,289.
- [50] HUMMEL F. Effects of Non-invasive Cortical Stimulation on Skilled Motor Function in Chronic Stroke [Z]: Oxford University Press (OUP): 490-499.
- [51] TALELLI P, GREENWOOD R, ROTHWELL J. Arm function after stroke: Neurophysiological correlates and recovery mechanisms assessed by transcranial magnetic stimulation[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2006, 117(8):1641-1659.
- [52] KHEDR EMAN M, AHMED MOHAMED A, NEHAL F, et al. Therapeutic trial of repetitive transcranial magnetic stimulation after acute ischemic stroke[J]. *Neurology*, 2005, 65(3):466-468.
- [53] 郑娅,毛也然,许东升.神经磁调控技术在脊髓损伤康复中的应用与机制探讨[J].*中国康复医学杂志*,2019,34(12):1482-1488.
- [54] AYSEGUL G, JOHN R, JOAN V, et al. Non-invasive brain stimulation to promote motor and functional recovery following spinal cord injury[J]. *Neural Regeneration Research*, 2017, 12(12):1933-1938.
- [55] BOONSTRA TJEERD W, STEVAN N, ANN-CHRISTIN M, et al. Change in mean frequency of resting-state electroencephalography after transcranial direct current stimulation[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2016, 10:270.
- [56] CIECHANSKI P, KIRTON A, WILSON B, et al. Electroencephalography correlates of transcranial direct-current stimulation enhanced surgical skill learning: A replication and extension study[J]. *Brain Research*, 2019, 1725(C):146445.
- [57] ROGASCH N C, DASKALAKIS Z J, FITZGERALD P B. Cortical inhibition of distinct mechanisms in the dorsolateral prefrontal cortex is related to working memory performance: A TMS-EEG study[J]. *Cortex*, 2015, 64:68-77.
- [58] DEL FELICE A, CASTIGLIA L, FORMAGGIO E, et al. Personalized transcranial alternating current stimulation (tACS) and physical therapy to treat motor and cognitive symptoms in Parkinson's disease: A randomized crossover trial[J]. *NeuroImage: Clinical*, 2019, 22: 101768.

(责任编辑:刘畅)