

文章编号: 1004-7220(2024)06-1154-06

经颅直流电刺激调控运动皮层对骑行递增负荷运动表现的影响

李凤, 毕嘉伟, 梁志强, 吕娇娇, 黄灵燕, 刘宇

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

摘要:目的 探究调控运动皮层的经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)对递增负荷耐力运动表现的影响。方法 采用随机、双盲、平行对照设计。40名健康成年人随机分为真刺激组(持续20 min刺激)或假刺激组(仅开始1 min内提供30 s缓升和30 s缓降刺激)。使用多焦点tDCS调控多区域皮层兴奋性,将7个小电极(3.14 cm²圆形电极)放置于初级运动区、前运动区和辅助运动区,单个电极注入电流不超过1.552 mA,总电流不超过3.998 mA。在干预前进行递增负荷运动基线测试,间隔48 h后进行干预刺激,随后进行运动测试。采用双因素方差分析真假刺激对刺激前后递增负荷运动表现的影响。结果 受试者全部完成干预且耐受性较好。两组的运动时长及输出功率无显著差异($P>0.05$);组内统计显示,真刺激干预后递增负荷转速提高($P=0.012$)。结论 调控运动皮层的经颅直流电刺激可提高健康成年人自行车递增负荷运动的平均转速,提示该刺激方案可能是一种提高耐力项目运动效率的潜在手段。

关键词: 经颅直流电刺激; 运动区; 递增负荷; 功率自行车

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.06.020

Effects of Transcranial Direct Current Stimulation Modulating the Motor Cortex on Cycling Performance with Incremental Loading

LI Feng, BI Jiawei, LIANG Zhiqiang, LÜ Jiaojiao, HUANG Lingyan, LIU Yu

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

Abstract: Objective To explore the effect of transcranial direct current stimulation (tDCS) regulating the motor cortex on the performance of endurance exercise with incremental loading. **Methods** A randomized, double-blind, parallel control design was adopted. Forty healthy adults were randomly divided into real stimulation (lasting 20 min) or sham stimulation groups (30 s slow-rise and 30 s slow-fall stimulation provided within the 1st 1 min only). The multifocal tDCS was used, with seven small electrodes (3.14 cm² round electrodes) placed in the primary, premotor, and supplementary motor areas to modulate motor cortex excitability. The injection current of a single electrode did not exceed 1.552 mA, and the total currents did not exceed 3.998 mA. Baseline tests on incrementally loading exercises were performed before and after the intervention, with an interval of 48 hours between the two tests. Two-way ANOVA was used to analyze the effects of this tDCS protocol on duration of cycling, power output, and revolution speed. **Results** All subjects completed the experiment without unexpected adverse effects. The overall accuracy rate of subjective guess was 37.5%. There was no significant difference in duration of cycling or power output between the two groups ($P>0.05$), and within-group statistics

收稿日期: 2024-07-20; 修回日期: 2024-08-05

通信作者: 黄灵燕, 副教授, E-mail: alic37yn@163.com

showed an increase in revolution speed after the real stimulation ($P=0.012$). **Conclusions** tDCS that targets and modulates the motor cortex can improve the revolution speed during cycling exercise with incremental loading in healthy adults, suggesting that this stimulation protocol may be a potential means of improving exercise efficiency in endurance sports.

Key words: transcranial direct current stimulation(tDCS); motor cortex; incremental loading; cycle ergometer

近年来,随着神经科学研究的不断深入,神经控制与运动表现之间的密切关系得到了广泛关注^[1-3]。而在神经控制的干预方法中,经颅电刺激是一项备受瞩目的技术^[4]。经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)作为一种新型、无创的神经调控技术,将微弱的电流通过电极作用于大脑头皮刺激特定的脑区调节大脑皮质的神经活动的兴奋性,可专注于神经系统的干预,促进神经适应和优化神经肌肉协调^[3,5]。大量研究证实,tDCS对调控姿势控制、运动表现、肌肉力量等运动功能具有积极影响^[6-10]。研究发现,对双侧初级运动皮层(primary motor cortex, M1)进行tDCS刺激后,能够显著增加功率自行车递增负荷运动至力竭的持续时间^[11-12]。但也有研究未观察到这种显著改善效应^[13-14]。可能的原因是刺激方案的靶点选择对运动表现有所影响。从目前的研究理论来看,运动的完成并非只由单个脑区区域完成,而是多个区域构成的神经网络共同调节。该结果提示,目前对提升递增负荷耐力表现的有效的经颅电刺激方案仍需更多研究和证据探索。

神经影像学证据提示,递增负荷运动相关的神经调控由多个大脑区域同时负责,包括初级运动皮层、辅助运动皮层、运动前区等^[15-16]。研究发现,在功率自行车递增负荷运动至力竭后,M1和辅助运动区(supplementary motor cortex, SMC)之间的脑功能连接下降^[17];在递增负荷任务中,M1、SMC和前运动皮层(pre-motor cortex, PMC)等脑区活动显著被激活^[18]。其中,PMC和M1在中枢发出运动指令以及在随意肌收缩时发挥重要作用^[19],SMC参与运动规划和双侧肢体的运动协调^[20]。因此,调控运动皮层内部功能连接的经颅电刺激方案,可能是一个有效提升递增负荷运动表现的方式。联合多区域的电刺激方案的研究表明,基于脑网络的多焦点tDCS对健康成年人的复杂步态控制能力具有一定

调控作用,特别是双任务条件下的步态变异性。但这种基于脑网络的电刺激方案对于递增负荷运动表现的影响,还有待探究^[21]。

多焦点经颅直流电刺激(multifocal tDCS)是一种使用多个小型圆形电极通过计算机模拟将电流更精确地传输到一个或多个脑区,加强刺激的聚焦性,从而实现同时调节大脑多个皮层区域的兴奋程度^[22-23]。本文旨在探究靶向性调控运动皮层(M1、SMA、PMC)兴奋性的多焦点tDCS方案对递增负荷运动表现的影响。

1 研究方法

1.1 研究对象

采用随机、双盲、对照设计,选择健康受试者为研究对象。纳入标准:①年龄在18~28岁的健康成年人;②有至少6个月、每周大于3次的运动习惯;③无下肢神经肌肉损伤史。排除标准:①近1个月接受过其他任何电刺激;②具有皮肤过敏史、体内金属植入物等电刺激相关禁忌证;③运动专项运动员。使用G-power 3.1.9.7计算表明,本研究所需的最小样本量为36(effect size = 0.4; power = 0.80; $\alpha = 0.05$),考虑可能存在流失率,故招募40名健康受试者。本研究已通过上海体育大学伦理委员会批准(102772023RT031)。所有受试者在试验开始前了解实验内容和流程,并签署知情同意书。

1.2 测试流程

全部测试分成两次进行:在刺激前进行1次运动任务测试,作为基线数据;间隔48h后,进行1次真刺激或假刺激干预,完成刺激后即刻进行第2次运动测试。每次测试的前48h,实验人员通知受试者来访前24h避免进行剧烈运动、保证充足的睡眠(不低于7h),且测试前4h内不能饮用任何兴奋剂类效应的饮品(如咖啡因),以此来减少其他因素的干扰^[24]。测试流程如图1所示。

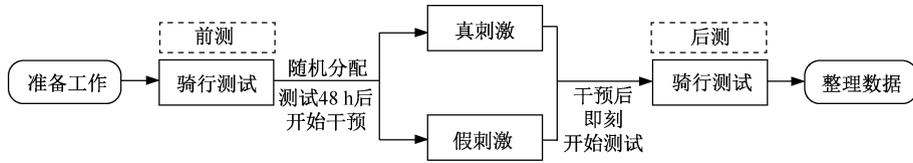


图1 测试流程

Fig. 1 Flowchart of the experiment

1.3 骑行测试

本研究运动测试采用功率自行车递增负荷测试方案^[25-26]。在运动测试前为受试者佩戴心率带(Polar公司,芬兰),实时监测受试者运动时心率情况,并通过Borg量表记录受试者每分钟的自觉疲劳程度(rating of perceived exertion, RPE)^[27]。受试者热身结束后开始正式测试,受试者以60~80 r/min转速从10 W开始,以男性25 W/min、女性20 W/min的递增强度运动至力竭;力竭标准:口头激励的情况下转速低于60 r/min超过5 s,且满足RPE>18或心率大于180其中一项,则结束测试^[28]。记录主要指标为转速、输出功率、心率及骑行时长。

1.4 干预方案

本研究主要刺激靶区是M1、SMC、PMC,使用Stimweaver[®]软件中特定的算法来模拟并优化刺激靶区垂直于皮质表面的电场分量(即 E_n),开发最优电极放置位置及电流强度。将 E_n 设定为+0.50 V/m来兴奋目标区域垂直电场分量,优化并确定最终刺激方案,该方案使用7个电极,其位置和电流强度设置为① C1: 1.053 mA;② C2: 0.770 mA;③ FC1: 1.221 mA;④ FC2: 0.954 mA;⑤ P9: -1.430 mA;⑥ PO7: -1.552 mA;⑦ AF7: -1.016 mA。任意最大电极注入电流强度1.552 mA,总注入电流强度为3.998 mA(见图2)。

采用Starstim[®]电刺激系统(Neuroelectronics公司,西班牙)进行电刺激干预,电极为3.14 cm²的Ag/AgCl胶状圆形电极,通过导电膏传递电流。真刺激条件使用上述方案,开始时,电流在30 s内从0 mA逐渐增加至3.998 mA,持续20 min;在刺激结束时,电流在30 s内自动下降到0 mA,刺激结束。假刺激方案电极摆放位置与真刺激方案相同,但仅在初始的30 s内从0 mA逐渐增加至3.998 mA之后,此时电流自动降回0,电流仅释放30 s。

电刺激仪器由熟练掌握操作流程且未参与本

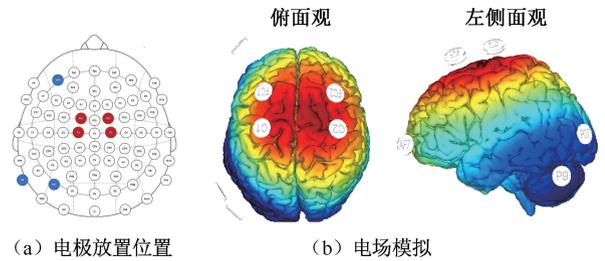


图2 tDCS电极放置位置及电场模拟

Fig. 2 tDCS electrode placement position and electric field simulation (a) Position of tDCS electrode placement, (b) Electric field simulation

注:红色圆圈表示阳极,蓝色圆圈表示阴极。

研究的实验人员进行管理操作,受试者和本研究实验人员均不知晓刺激类型。在整个刺激过程中,受试者被要求静坐,避免外界的干扰和无关刺激。1名研究人员记录受试者报告的任何不适感以评估不良反应(即头皮针刺感、瘙痒、烧灼感、困倦等^[29]),并在干预后推测在刺激中接受了真刺激或假刺激以评估盲效。

1.5 统计方法

所有数据采用SPSS 26.0统计软件进行统计和分析,符合正态分布的参数值均采用(平均值±标准差)表示。使用独立样本 t 检验比较在刺激干预前(前测)各数据是否存在统计学差异,使用卡方检验比较组间性别构成比差异。当数据满足正态分布和方差齐性时,采用双因素重复测量方差分析(two-way repeated-measures ANOVA)分析刺激方案和刺激前后骑行的运动表现指标。模型自变量包括干预方式(真刺激、假刺激)、时间(干预前、干预后)及其交互效应。同时组内使用配对样本 t 检验分析组内干预前后的差异,效应量用Cohen's d 表示,<0.19为弱效应、0.20~0.49为低效应、0.50~0.79为中效应、>0.8为高效应^[30]。显著性水平设为0.05。

2 结果

2.1 基本信息

所有受试均完成了全部实验,独立样本 t 检验及卡方检验显示两组受试的基本信息无显著差异(见表1)。

表1 受试者基本信息

Tab.1 Basic information of the participants

变量	真刺激组 ($n=20$)	假刺激组 ($n=20$)	t	p
性别(男/女)	16/4	17/3	—	1.000
年龄/岁	21.45±2.50	22.85±2.37	-1.401	0.169
身高/cm	175.34±6.57	173.01±4.59	1.588	0.121
体质量/kg	74.56±10.95	71.20±9.19	0.847	0.402
运动量/(次·周 ⁻¹)	4.5±1.27	4.7±1.25	-0.625	0.536

2.2 电刺激盲效与不良反应

40名受试者全部完成了实验中的电刺激干预。受试者推测出刺激类型的总体正确率为37.5%。不良反应统计显示,部分受试者反映有不同程度的针刺感、瘙痒、烧灼感、发麻和困倦(见表2)。

表2 电刺激不良反应

Tab.2 Adverse effects of electrical stimulation

选项	无	弱	中等	强	严重
针刺感	8 (20%)	27 (67.5%)	5 (12.5%)	0 (0%)	0 (0%)
瘙痒	19 (47.5%)	18 (45%)	3 (7.5%)	0 (0%)	0 (0%)
烧灼感	29 (72.5%)	9 (22.5%)	2 (5%)	0 (0%)	0 (0%)
发麻	17 (42.5%)	18 (45%)	5 (12.5%)	0 (0%)	0 (0%)
困倦	35 (87.5%)	5 (12.5%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

2.3 骑行表现

方差分析显示,骑行时长、最大输出功率、平均转速、平均心率和最大心率在干预方式和干预前后均未发现交互效应。平均转速和平均心率在干预方式和干预前后存在时间主效应;组内统计发现,真刺激干预后平均转速出现显著增加(刺激前(72.42±4.69) r/min,刺激后(74.72±5.87) r/min, $P=0.012$,Cohen's $d=0.622$)。平均心率出现显著降低(刺激前(145.37±9.75) min⁻¹,刺激后(140.89±7.46) min⁻¹, $P=0.012$,Cohen's $d=0.620$),见图3。

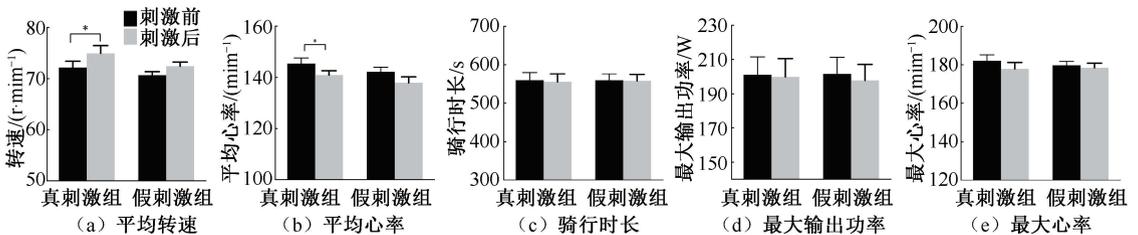


图3 tDCS对骑行表现的影响(* $P<0.05$)

Fig.3 Effects of tDCS on cycling performance (a) Average speed, (b) Average heart rate, (c) Cycling duration, (d) Maximum output power, (e) Maximum heart rate

3 讨论

本文探究刺激靶点为M1、PMC、SMC的多焦点tDCS方案对健康成年人骑行运动表现的影响。结果发现,真刺激组干预后平均转速显著提升、平均心率显著降低,但最大输出功率和骑行时长干预前后无显著改变。

研究表明,在恒定功率的情况下自选转速的小幅度增加会提高肌肉的协调和机械效率^[31],转速的改变可能会影响运动效率^[32]。这可能意味着tDCS刺激在一定程度上能改善运动的运动协调和效率。

转速提高会使肌肉激活更早^[33],增强臀大肌、臀中肌、股内侧肌、腘绳肌和小腿肌肉的活动^[34]。当转速增加后,肌肉恢复的时间将减少,蹬车腿需要更大的力量将恢复腿推回,会影响骑行期间的肌肉募集模式^[35]。这可能是由于对M1和PMC进行刺激增加了兴奋性,从而提高运动神经元的募集程度^[36]。但同时,更高的转速更容易降低动态神经肌肉表现^[31]。研究发现,在以较快转速骑行后,下肢力量表现显著下降,而在以较低转速骑行后,下肢力量表现没有下降^[37]。在相同负载的情况下,高转速骑行比低转速骑行的平均输出功率降低(即更容

易疲劳,运动时间更短)^[38]。这意味着刺激后骑行运动时长和最大输出功率并未提高是合理的现象。

本文发现,真刺激干预后心率显著降低,这意味着在相同的运动强度下,需要更少的心脏工作来维持运动^[39]。虽然最大输出功率和骑行时长未发生明显变化,但转速提高可能表明受试者在相同心率下产生了更多的功率。这可能与大脑对肌肉协调和运动模式的调节有关,从而提高了运动效率^[31-32]。此外,耐力运动的运动时长与运动中的情绪动机有关,即个体的认知功能会决定是否克服不适感继续保持运动^[40]。有研究表明,对PFC进行tDCS刺激可能能够提升运动表现^[41-42]。在运动过程中,受试者是否愿意继续坚持运动是关键因素,而这和抑制控制能力关系密切,即更高水平的抑制控制能力能够减少对运动过程中的肌肉酸痛及呼吸困难等不适感觉的感知程度。随着时间的推移,抑制控制能力会诱导精神疲劳,会增加运动的努力情绪,进而对运动表现产生消极影响^[43]。由于刺激运动区后增加了运动过程中对身体的不适感和肌肉酸痛的敏锐度,从而导致受试者抗疲劳能力下降^[40,44]。不同于PFC直接和认知功能有关^[12],M1、PMC和SMC(本研究目标靶区)主要承接发出运动指令,支配和调节身体运动相关,这可能是该刺激方案对骑行运动时长无显著影响的可能原因。此外,最大输出功率与肌肉的力量和耐力有关,这可能不仅仅受到神经传导速度的影响,还受到肌肉纤维类型、能量代谢和其他生理因素的影响。

本研究存在一定局限性:①未对生理(肌肉活动和肺耗氧量等)进行全面评估;②tDCS效果存在个体差异,未考虑个体脑部结构的差异,可能会在一定程度上影响tDCS的干预效果;③未使用神经影像学技术判断该方案是否调控到每个受试者的目标靶区,无法客观观察到大脑对应网络兴奋性的动态变化。

4 结论

多焦点tDCS方案调控运动皮层兴奋性(初级运动区、前运动区和辅助运动区)可提升健康年轻人在递增负荷骑行期间的平均转速、降低平均心率,提示靶向性调控运动皮层的经颅直流电刺激可能是一种提高耐力项目运动效率的潜在方式。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:李凤负责设计论文框架、参与实验、搜集统计数据、撰写论文;毕嘉伟负责设计论文框架、参与实验、搜集统计数据、调研文献、修改论文;梁志强负责设计论文框架、核实数据、修改论文;吕娇娇负责修改论文、审核论文;黄灵燕提出论文选题、修改和审核论文;刘宇提出论文选题、指导和修改论文。

参考文献:

- [1] 姚连强, 孙国晓. 神经调控技术在体育领域中的应用[J]. 体育科研, 2023, 44(2): 80-86.
- [2] 王宝峰, 肖松林, 傅维杰. “神经启动”增能技术:经颅直流电刺激联合运动干预的协同效果[J]. 上海体育学院学报, 2021, 45(10): 53.
- [3] ANGIUS L, PASCUAL-LEONE A, SANTARNECCHI E. Brain stimulation and physical performance [J]. Prog Brain Res, 2018(240): 317-339.
- [4] 陈恺豪. 经颅直流电刺激在运动科学领域应用的研究进展[J]. 当代体育科技, 2023, 13(27): 6-9.
- [5] 张娜, 刘卉, 苗雨, 等. 经颅电刺激技术用于运动表现提升的研究进展[J]. 中国生物医学工程学报, 2022, 41(2): 214-223.
- [6] 王开元, 刘宇. “神经启动”技术增强运动表现[J]. 体育科学, 2018, 38(1): 96-97.
- [7] 殷可意, 刘宇. 无创深部定位脑刺激:提升运动表现[J]. 体育科学, 2019, 39(5): 96-97.
- [8] 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.
- [9] 苏玉莹, 彭亮, 刘嘉俊, 等. 经颅直流电刺激对肌肉力量和肌肉耐力表现影响的系统评价[J]. 体育与科学, 2023, 44(4): 108-120.
- [10] 沈斌, 肖松林, 于常晓, 等. 经颅直流电刺激对下肢耐力表现影响的系统综述[J]. 医用生物力学, 2023, 38(1): 202-208.
SHEN B, XIAO SL, YU CX, *et al.* Effects of transcranial direct current stimulation on endurance performance of lower limbs: A systematic review [J]. J Med Biomech, 2023, 38(1): 202-208.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] BALDARI C, BUZZACHERA CF, VITOR-COSTA M, *et al.* Effects of transcranial direct current stimulation on psychophysiological responses to maximal incremental exercise test in recreational endurance runners [J]. *Front Psychol*, 2018(9): 1867.
- [14] ISIS S, ARMELE D, PAULO GL, *et al.* The effect of tDCS on improving physical performance and attenuating effort perception during maximal dynamic exercise in non-athletes [J]. *Neurosci Lett*, 2023(794): 136991.
- [15] ESTER T, KULLMANN S. Neurobiological regulation of eating behavior: Evidence based on non-invasive brain stimulation [J]. *Rev Endocr Metab Disord*, 2022, 23(4): 753-772.
- [16] DAGAN M, HERMAN T, HARRISON R, *et al.* Multitarget transcranial direct current stimulation for freezing of gait in Parkinson's disease [J]. *Mov Disord*, 2018, 33(4): 642-646.
- [17] 包大鹏, 矫玮, 王霄英, 等. 递增负荷运动疲劳对耐力项目运动员脑神经功能连接的fMRI研究[C]//全国体育科学大会. 南京:[s.n.], 2019.
- [18] TEMPEST GD, REISS AL. The utility of functional near-infrared spectroscopy for measuring cortical activity during cycling exercise[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2019, 51(5): 979-987.
- [19] NOAKES TD. Fatigue is a brain-derived emotion that regulates the exercise behavior to ensure the protection of whole body homeostasis [J]. *Front Physiol*, 2012(3): 82.
- [20] CARLSEN AN, EAGLES JS, MACKINNON CD. Transcranial direct current stimulation over the supplementary motor area modulates the preparatory activation level in the human motor system [J]. *Behav Brain Res*, 2015(279): 68-75.
- [21] 周容, 黄灵燕, 毕嘉伟, 等. 基于脑网络的多焦点经颅直流电刺激降低健康成年人双任务步态变异性的研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2023, 38(11): 1514-1521.
- [22] FISCHER DB, FRIED PJ, RUFFINI G, *et al.* Multifocal tDCS targeting the resting state motor network increases cortical excitability beyond traditional tDCS targeting unilateral motor cortex [J]. *Neuroimage*, 2017(157): 34-44.
- [23] GBADEYAN O, STEINHAUSER M, MCMAHON K, *et al.* Safety, tolerability, blinding efficacy and behavioural effects of a novel MRI-compatible, high-definition tDCS set-up [J]. *Brain Stimul*, 2016, 9(4): 545-552.
- [24] ZULKIFLY MFM, MERKOHITAJ O, PAULUS W. Transcranial alternating current stimulation induced excitatory aftereffects are abolished by decaffeinated espresso and reversed into inhibition by espresso with caffeine [J]. *Clin Neurophysiol*, 2020, 131(3): 778-779.
- [25] GARCÍA-GARCÍA O, CUBA-DORADO A, FERNÁNDEZ-REDONDO D, *et al.* Neuromuscular parameters predict the performance in an incremental cycling test [J]. *Int J Sports Med*, 2018, 39(12): 909-915.
- [26] OKANO AH, FONTES EB, MONTENEGRO RA, *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.
- [27] BORG G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress [J]. *Scand J Rehabil Med*, 1970, 2(2): 92-98.
- [28] CHEN TI, TSAI PH, LIN JH, *et al.* Effect of short-term heat acclimation on endurance time and skin blood flow in trained athletes [J]. *Open Access J Sports Med*, 2013(4): 161-170.
- [29] BRUNONI A R, AMADERA J, BERBEL B, *et al.* A systematic review on reporting and assessment of adverse effects associated with transcranial direct current stimulation [J]. *Int J Neuropsychopharmacol*, 2011, 14(8): 1133-1145.
- [30] COHEN J. A power primer [J]. *Psychol Bull*, 1992, 112(1): 155-159.
- [31] MATER A, CLOS P, LEPERS R. Effect of cycling cadence on neuromuscular function: A systematic review of acute and chronic alterations [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(15): 7912.
- [32] MILLET GY, LEPERS R. Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises [J]. *Sports Med*, 2004, 34(2): 105-116.
- [33] BAUM BS, LI L. Lower extremity muscle activities during cycling are influenced by load and frequency [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2003, 13(2): 181-190.
- [34] WOZNIAK TIMMER CA. Cycling biomechanics: A literature review [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1991, 14(3): 106-113.
- [35] MACINTOSH BR, NEPTUNE RR, HORTON JF. Cadence, power, and muscle activation in cycle ergometry [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2000, 32(7): 1281-1287.
- [36] KURIHARA T, YAMAUCHI J, OTSUKA M, *et al.* Maximum toe flexor muscle strength and quantitative analysis of human plantar intrinsic and extrinsic muscles by a magnetic resonance imaging technique [J]. *J Foot Ankle Res*, 2014(7): 26.
- [37] DE ARAÚJO RUAS VD, FIGUEIRA T, DENADAI B, *et al.* Effect of cycling exercise at different pedal cadences on subsequent muscle strength [J]. *J Exerc Sci Fit*, 2011, 9(2): 93-99.