

经颅直流电刺激治疗工作记忆障碍的研究进展

杜晴晴¹ 武俊英² 李雯燕² 孟世峰²

¹山西医科大学,太原 030000; ²山西医科大学第一医院康复医学科,太原 030001

通信作者:武俊英,Email:wujunying777@126.com

【摘要】 工作记忆是人类认知功能的基础,在日常执行功能中起着核心作用。经颅直流电刺激作为一种非侵入性的脑功能调节技术,在治疗工作记忆障碍方面具有巨大的潜力。本文就工作记忆的定义、相关脑区、经颅直流电刺激治疗工作记忆障碍的可能机制、新技术的应用、不同人群中的临床疗效及其所存在的不足等进行综述,以期经颅直流电刺激在工作记忆障碍中的临床应用提供借鉴和参考。

【关键词】 经颅直流电刺激; 工作记忆; 作用机制; 研究进展

基金项目:中央引导地方科技发展基金(2020Z135050009017)

Funding: The Central Government Guides Local Science and Technology Development Foundation (2020Z135050009017)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.07.016

工作记忆(working memory)是人脑最重要的高级认知功能之一,是语言理解、推理、学习、决策和目标导向行为等复杂认知过程的重要组成部分,在日常执行功能中起核心作用^[1]。工作记忆障碍是高级认知功能无法提高的基础,而导致工作记忆障碍的原因主要有两方面:一是随着年龄的增长,前额叶皮质的神经可塑性降低,导致工作记忆障碍在老年人中更明显^[2-3];其次是由神经和精神系统疾患所导致的工作记忆障碍,如精神分裂症^[4]、严重抑郁障碍(major depressive disorder, MDD)^[5]、阿尔兹海默病^[6]、轻度认知障碍(mild cognitive impairment, MCI)^[7]以及脑卒中^[8]等。工作记忆障碍不仅会降低患者的生活质量,还会影响其康复治疗效果,给家庭和社会带来沉重的负担。

目前,国内外针对工作记忆障碍的主要治疗策略以药物和认知训练为主,但依然面临不良反应和配合性问题。经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)作为一种可调节神经活动的非侵入性技术,具有安全、经济、便捷等优点,已广泛应用于工作记忆障碍患者的临床治疗。本文就 tDCS 在工作记忆障碍中的治疗原理、新技术的应用和临床疗效进行综述,以期 tDCS 在工作记忆障碍患者中的临床应用提供参考和借鉴。

工作记忆的定义

工作记忆是一种认知功能过程,是指在主动意识中暂时保持和处理信息的能力^[9]。同时,工作记忆被认为是参与目标导向行为的多成分系统,涉及保留和操纵信息^[10-11]。经典的工作记忆模型是由 Baddeley 和 Hitch 提出,将其描述为四个子成分,即中央执行系统(主要成分)、语音环路、视觉空间画板和情景缓冲器^[9,12]。根据 Baddeley 等^[9]的观点,中央执行系统是负责工作记忆的注意控制系统,调节有限的注意资源来维持和处理工作记忆任务;语音环路和视觉空间画板主要关注和存储言语、空间材料(通常被称为短期记忆);情景缓冲器则负责工作记忆中信息的绑定,并将其与长期记忆联系起来。

工作记忆的相关脑区

神经影像学研究证实,工作记忆网络主要由额叶和顶叶皮质组成,特别是背外侧前额叶皮质(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)、前扣带回皮质(anterior cingulate cortex, ACC)和顶叶皮质,被认为与工作记忆的加工密切相关^[11,13]。DLPFC 可通过检索存储的信息、抑制无关刺激、更新功能、自上而下地控制记忆过程,在线信息表征的维持方面发挥重要作用,且左侧 DLPFC 与右侧 DLPFC 对加工材料存在差异,二者分别在言语文字和视觉空间信息材料上可得到更有效的激活^[13]。ACC 可充当“注意力控制器”,评估是否需要根据任务要求调整收到的信息。顶叶皮质被认为是感觉和知觉处理的“工作区”,与信息的存储、空间位置信息的保持以及工作记忆的容量等密切相关。

工作记忆能力的临床评估量表

N-back 任务是当前研究工作记忆最经典的实验范式,不仅可对材料进行编码、监测、保持、更新,同时也可将决策、选择、干扰、抑制的过程包含在内,是评估临床治疗工作记忆障碍效果最常用的方法之一^[10]。N-back 是通过设置 n 的不同来改变工作记忆负荷的大小,评估受试者在不同负荷下言语、空间工作记忆广度,将其准确性和反应时作为评估的指标。临床上评估工作记忆能力的量表还有很多,如数字广度任务、字母数字广度任务、Stroop 测验、威斯康星卡片分类测试、瑞文标准分类测验、选择反应时测验、Rivermead 行为记忆测试第三版、韦氏记忆量表第三版空间广度测验、简易视觉空间记忆测验-修订版等^[11],这些量表都是基于工作记忆的一般概念衍生而来。

tDCS 治疗工作记忆的原理

一、tDCS 的作用机制

tDCS 是通过恒定微弱电流刺激来改变静息膜电位水平,可

调节大脑皮质神经元活动^[14]。阳极 tDCS (anodal tDCS, atDCS) 可诱发神经元静息膜去极化, 增强兴奋性, 使得该脑区相关功能更加容易被激活^[15], 从而调控工作记忆网络。基础研究表明, tDCS 对脑组织兴奋性的调节作用效果持久, 有利于其神经组织的重塑, 可能与 N-甲基-D-天门冬氨酸 (N-methyl-D-aspartic acid, NMDA) 受体的表达或脑源性神经营养因子的分泌增强突触的可塑性有关^[16]。另外, atDCS 可加快激活脑组织代谢, 增加脑血流灌注, 对更广泛的感觉运动区网络产生积极的影响^[17]; 且 atDCS 还可延长脑微血管的扩张时间 (引起一氧化氮合酶激活, 进而对 tDCS 诱导的电场敏感), 增加血流量和组织氧合^[18], 这些改变均有利于工作记忆的恢复。

二、tDCS 的刺激靶点

研究表明, DLPFC 对工作记忆的更新和维持具有关键作用, 且工作记忆障碍与 DLPFC 的激活减少有关^[4], 因此 DLPFC 是临床治疗工作记忆障碍最常用的刺激区域 (尤其是左侧 DLPFC)。Baumert 等^[19]在对 88 例健康学生的研究中发现, 1 mA 的 atDCS 作用于左侧 DLPFC, 可显著提高受试者工作记忆任务的准确性。除 DLPFC 外, 还有研究发现, 顶叶、小脑等部位的 tDCS 也可改善工作记忆障碍, 如 Zhu 等^[20]的研究发现, 重复 tDCS 刺激健康受试者的右后顶叶可增强其空间工作记忆能力; Maldonado 等^[21]用 2 mA 单次高精度 tDCS 刺激健康受试者的右小脑, 结果发现, 受试者言语工作记忆能力较伪刺激组提高。本课题组认为, tDCS 作用于不同部位的疗效需要综合考虑受试人群、病损部位、先天发育等因素的不同。

三、tDCS 的刺激模式

在刺激模式方面, 除了常规的 tDCS, 还有高精度经颅直流电刺激 (high definition-transcranial direct current stimulation, HD-tDCS) 和振荡 tDCS 两种。

1. HD-tDCS: 这是一种新开发的 tDCS 形式, 是使用多个小电极, 可在目标脑区实现更多、更精确的刺激^[22]。相关研究表明, 使用 HD-tDCS 可以改变静息状态的功能性皮质连接, 其产生的兴奋性可达常规 tDCS 的两倍^[23-24]。Liu 等^[25]的研究发现, HD-tDCS 在工作记忆训练中可以增强脑网络的连通性, 更大幅度地提高大脑集群和信息传递的效率。

2. 振荡 tDCS: 是 tDCS 电流强度在给定频率上围绕设定值波动, 这种刺激不仅可以调节兴奋性, 还可引起相关脑区的神经振荡, Bjekic 等^[26]的研究证明, 振荡 tDCS 可以改善工作记忆能力。

tDCS 与神经影像学的联合应用

tDCS 在治疗工作记忆障碍方面具有很大的潜力, 但很难确定最佳的治疗方案和治疗效果, 因此必须将 tDCS 与神经影像学相结合, 通过有效性的客观证据进一步阐明 tDCS 是如何影响神经功能。随着认知神经技术的迅速发展, 正电子断层发射扫描 (positron emission tomography, PET)、功能磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI)、脑电图 (electroencephalogram, EEG)、功能性近红外光谱 (functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) 等非侵入性神经功能成像技术被广泛应用于工作记忆脑结构及其神经生理机制的研究中。

一、PET 技术在工作记忆研究中的应用

PET 是一种功能成像方式, 是根据所使用的放射性药物来

描述特定的功能过程 (如代谢、受体密度和结合等), 在监测 tDCS 或工作记忆任务对中枢神经系统的影响方面具有独特潜力。最常用的 PET 放射性药物是氟代脱氧葡萄糖 (fluorodeoxyglucose, FDG)。由于大脑几乎完全使用葡萄糖作为能量来源, 绘制 FDG 摄取图可以深入地了解大脑活动的分布^[27]。Ripp 等^[28]在研究临床 FDG-PET 成像方案是否能捕捉到与工作记忆任务执行相关的神经活动变化时发现, 与基线静止状态相比, 工作记忆相关脑区的 FDG 摄取量增加, 进而证明了工作记忆任务可引起神经激活。此外, 由于 PET 可以提供全面的脑成像, 不仅适合研究 tDCS 对脑功能区域的影响, 还可观察 tDCS 对远距离功能连接大脑区域的影响^[27]。PET 的缺点是, 高辐射和高成本会限制其大规模的应用。

二、fMRI 技术在工作记忆研究中的应用

fMRI 技术具有高空间分辨率和非侵入性的特点, 可精准定位相关脑区, 被广泛应用于工作记忆研究中。fMRI 主要包括两种模式, 即静息态 fMRI (rs-fMRI) 和任务态 fMRI (tb-fMRI)。rs-fMRI 数据采用特定程序和参数模型进行分析, 以确定激活的大脑区域; tb-fMRI 主要采集任务时间序列和血流动力学反应, 同时结合不同 n-back 与最低负荷 (0-back) 之间的大脑活动差异进行对比。一项双盲交叉设计中, 以右额顶叶网络为目标, 对 27 例健康受试者进行真伪 tDCS 刺激, 结果发现, 与伪刺激相比, tDCS 刺激下右额顶网络的激活程度显著增高^[29]。fMRI 主要的缺点是, 成本较高、灵活性差 (必须在专人、特定地点进行操作)、对参与者的要求较高 (能移动配合) 等。

三、EEG 技术在工作记忆研究中的应用

EEG 作为一种简单且经济有效的方法, 可以敏感、快速、精确地测量 tDCS 期间大脑神经活动的变化。当与 tDCS 配对使用时, 可通过静止状态 EEG 和在任务执行期间记录的事件相关电位 (event-related potentials, ERPs) 来了解工作记忆各个加工过程所涉及的神活动^[30]。临床上常用刺激前、后 EEG 波幅的变化作为结局指标, 如 Hill 等^[31]的研究发现, 无论是在休息时, 还是与认知任务相结合时, tDCS 刺激前、后受试者 EEG 的波幅未见明显变化。EEG 的缺点是, tDCS 所引起的伪影会导致 tDCS-EEG 的记录分析出现误差^[30]。

四、fNIRS 技术在工作记忆研究中的应用

fNIRS 是一种新兴的低成本神经成像技术, 可以非侵入性地监测神经元活动引起的血流动力学反应。fNIRS 最常用的形式是使用红外光测量在神经活动期间脑血流中氧合血红蛋白 (oxygenated-hemoglobin, Oxy-Hb) 和脱氧血红蛋白 (deoxygenated hemoglobin, Deoxy-Hb) 浓度的定量变化^[32]。fNIRS 联合 tDCS 在实现获取大脑信号的同时, 还可通过刺激直接向大脑提供反馈的脑机接口。有研究采用 fNIRS 观察了 tDCS 与奖励动机相结合对健康老年人工作记忆的作用, 结果发现, tDCS 可显著改善健康老年人的工作记忆能力和血流动力学活动^[33]。相比于 EEG, fNIRS 的空间分辨率 (激活的定位) 更高, 可以更准确地识别对工作记忆变化做出反应的特定脑区; 相对于 fMRI 而言, fNIRS 的时间分辨率 (更高的采样率) 在分析血流动力学反应的形状变化时, 可提供更好的统计能力^[34]。同时, fNIRS 还具有安全性高、对运动伪影相对不敏感、更方便等优点, 在研究工作记忆领域中具有巨大的应用前景。

tDCS 对不同人群工作记忆障碍的临床疗效

tDCS 作为一种非侵入性、安全性高、易操作的神经调节技术,在不同病因所致的工作记忆障碍人群中均取得了显著的临床疗效。

一、tDCS 对神经、精神疾病患者工作记忆障碍的临床疗效

在许多神经精神疾病中,皮质兴奋性和神经可塑性的改变是其重要的病理生理基础^[35]。基于 tDCS 的作用机制,Meiron 等^[4]以精神分裂症患者为研究对象,指出与基线和伪刺激相比,2 mA 的 atDCS 应用于左侧 DLPFC,可显著减轻其精神分裂症状,并显著改善其工作记忆表现。此外,tDCS 还可用于抑郁症^[5]、阿尔兹海默症^[6]等患者工作记忆障碍的治疗,且均取得了较好的临床疗效。

二、tDCS 对年龄相关性认知功能减退的临床疗效

研究表明,工作记忆随着年龄的增长而衰退,这种与年龄相关的工作记忆衰退是由于脑皮质兴奋性和功能连通性的改变所致^[36];而 Johnson 等^[7]的研究发现,tDCS 可以加强衰老过程中减弱的脑皮质兴奋性和功能性连通性,进而改善工作记忆表现。

三、tDCS 在脑卒中患者中的临床疗效

脑卒中患者在工作记忆的所有子系统中都表现出中等程度的衰退^[8]。Jo 等^[37]的研究发现,左侧 DLPFC 的 atDCS 与伪刺激相比,可显著改善脑卒中患者工作记忆任务的准确率和反应时间,对其工作记忆的表现产生了积极的影响。但也有研究发现,tDCS 的治疗效果并不明显,如 Rushby 等^[38]的研究就发现,单次的 tDCS 并不能促进创伤性脑损伤患者工作记忆的恢复,这可能与所研究患者在病变位置、评估方法和刺激靶点等方面存在的异质性有关。

结语

tDCS 治疗工作记忆障碍的临床研究逐渐增多,临床应用也愈加普及,但仍存在一些局限性,如关于 tDCS 的效应研究多为个案报道,病例对照或少数受试者进行的先导性研究,样本量偏小,其推荐的电流刺激参数(如刺激靶点、电流强度、刺激持续时间、刺激时机、刺激方案、受到刺激的头皮面积)、受试者异质性、长期效应等均缺乏一致性。故本课题组认为,后续的研究需要大样本量,进行多中心的临床试验,同时适当控制变量,以期进一步寻找 tDCS 治疗工作记忆障碍的最佳治疗方案,且未来的研究可将 tDCS 治疗简化为家庭疗法,以提高 tDCS 治疗工作记忆障碍在现实生活中的疗效。

参 考 文 献

- [1] Weng W, Liang J, Xue J, et al. The transfer effects of cognitive training on working memory among chinese older adults with mild cognitive impairment: a randomized controlled trial [J]. *Front Aging Neurosci*, 2019, 11: 212. DOI: 10.3389/fnagi.2019.00212.
- [2] Goldsworthy MR, Rogasch NC, Ballinger S, et al. Age-related decline of neuroplasticity to intermittent theta burst stimulation of the lateral prefrontal cortex and its relationship with late-life memory performance [J]. *Clin Neurophysiol*, 2020, 131 (9): 2181-2191. DOI: 10.1016/J.CLINPH.2020.06.015.

- [3] Haque ZZ, Samandra R, Mansouri FA. Neural substrate and underlying mechanisms of working memory: insights from brain stimulation studies [J]. *J Neurophysiol*, 2021, 125 (6): 2038-2053. DOI: 10.1152/JN.00041.2021.
- [4] Meiron O, David J, Yaniv A. Left prefrontal transcranial direct-current stimulation reduces symptom-severity and acutely enhances working memory in schizophrenia [J]. *Neurosci Lett*, 2021, 755: 135912. DOI: 10.1016/j.neulet.2021.135912.
- [5] Moirand R, Imbert L, Haesebaert F, et al. Ten sessions of 30 min tDCS over 5 days to achieve remission in depression: a randomized pilot study [J]. *J Clin Med*, 2022, 11 (3): 782. DOI: 10.3390/jcm11030782.
- [6] Cespon J, Rodella C, Miniussi C, et al. Behavioural and electrophysiological modulations induced by transcranial direct current stimulation in healthy elderly and Alzheimer's disease patients: a pilot study [J]. *Clin Neurophysiol*, 2019, 130 (11): 2038-2052. DOI: 10.1016 / j.clinph.2019.08.016.
- [7] Johnson EL, Arciniega H, Jones KT, et al. Individual predictors and electrophysiological signatures of working memory enhancement in aging [J]. *NeuroImage*, 2022, 250: 118939. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2022.118939.
- [8] Lugtmeijer S, Lammers NA, de Haan EHF, et al. Post-stroke working memory dysfunction: a meta-analysis and systematic review [J]. *Neuropsychol Rev*, 2021, 31 (1): 202-219. DOI: 10.1007/s11065-020-09462-4.
- [9] Baddeley A. Working memory: theories, models, and controversies [J]. *Annu Rev Psychol*, 2012, 63: 1-29. DOI: 10.1146/annurev-psych-120710-100422.
- [10] Baddeley AD, Hitch GJ, Allen RJ. From short-term store to multicomponent working memory: the role of the modal model [J]. *Mem Cogn*, 2019, 47 (4): 575-588. DOI: 10.3758/s13421-018-0878-5.
- [11] Chai WJ, Abd Hamid AI, Abdullah JM. Working memory from the psychological and neurosciences perspectives: a review [J]. *Front Psychol*, 2018, 9: 401. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00401.
- [12] Baddeley AD, Hitch G. Working memory [J]. *Psychol Learn Motiv*, 1974, 8: 47-89. DOI: 10.1016/S0079-7421(08)60452-1.
- [13] Kim C, Kroger JK, Calhoun VD, et al. The role of the frontopolar cortex in manipulation of integrated information in working memory [J]. *Neurosci Lett*, 2015, 595: 25-29. DOI: 10.1016/j.neulet.2015.03.044.
- [14] Ankril YLE, Braw Y, Luboshits G, et al. The effects of stress and transcranial direct current stimulation (tDCS) on working memory: a randomized controlled trial [J]. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2020, 20 (1): 103-114. DOI: 10.3758/s13415-019-00755-7.
- [15] de Lima AL, Braga FMA, da Costa RMM, et al. Transcranial direct current stimulation for the treatment of generalized anxiety disorder: a randomized clinical trial [J]. *J Affect Disord*, 2019, 259: 31-37. DOI: 10.1016/j.jad.2019.08.020.
- [16] Stagg CJ, Antal A, Nitsche MA. Physiology of transcranial direct current stimulation [J]. *J ECT*, 2018, 34 (3): 144-152. DOI: 10.1097/ycet.0000000000000510.
- [17] Tao Y, Ficek B, Wang Z, et al. Selective functional network changes following tDCS-augmented language treatment in primary progressive aphasia [J]. *Front Aging Neurosci*, 2021: 378. DOI: 10.3389/fnagi.2021.681043.
- [18] Wang T, Dong L, Cong X, et al. Comparative efficacy of non-invasive neurostimulation therapies for poststroke dysphagia: a systematic review

- and meta-analysis [J]. *Neurophysiol Clin*, 2021, 51 (6) : 493-506. DOI:10.1016/j.neucli. 2021.02.006.
- [19] Baumert A, Buchholz N, Zinkernagel A, et al. Causal underpinnings of working memory and stroop interference control; testing the effects of anodal and cathodal tDCS over the left DLPFC [J]. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2020, 20 (1) : 34-48. DOI: 10.3758/s13415-019-00726-y.
- [20] Zhu R, Luo Y, Wang Z, et al. Within-session repeated transcranial direct current stimulation of the posterior parietal cortex enhances spatial working memory [J]. *Cogn Neurosci*, 2021, 13 (1) : 1-12. DOI: 10.1080/17588928.2021.1877648.
- [21] Maldonado T, Bernard JA. The polarity-specific nature of single-session high-definition transcranial direct current stimulation to the cerebellum and prefrontal cortex on motor and non-motor task performance [J]. *Cerebellum*, 2021, 20 (4) : 569-583. DOI: 10.1101/2020.11.17.387217.
- [22] Gbadayan O, McMahon K, Steinhäuser M, et al. Stimulation of dorso-lateral prefrontal cortex enhances adaptive cognitive control; a high-definition transcranial direct current stimulation study [J]. *J Neurosci*, 2016, 36 (50) : 12530-12536. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2450-16.2016.
- [23] Sheng J, Xie C, Fan D, et al. High definition-transcranial direct current stimulation changes older adults' subjective sleep and corresponding resting-state functional connectivity [J]. *Int J Psychophysiol*, 2018, 129:1-8. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2018.05.002.
- [24] 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. DOI:10.1016/j.neuroimage.2017.05.060.
- [25] Liu M, Ke Y, Liu S, et al. Effect of HD-tDCS combined with working memory training on brain network [C]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2020:3594-3597. DOI: 10.1109/EMBC44109.2020.9176717.
- [26] Bjekić J, Živanović M, Filipović SR. Transcranial direct current stimulation (tDCS) for memory enhancement [J]. *J Vis Exp*, 2021, 18: 175. DOI:10.3791/62681.
- [27] Rudroff T, Workman CD, Fietsam AC, et al. Imaging transcranial direct current stimulation (tDCS) with positron emission tomography (PET) [J]. *Brain Sci*, 2020, 10 (4) : 236. DOI: 10.3390/brainsci10040236.
- [28] Ripp I, Wallenwein LA, Wu Q, et al. Working memory task induced neural activation: a simultaneous PET/fMRI study [J]. *NeuroImage*, 2021, 237:118131. DOI:10.1016/j.neuroimage.2021.118131.
- [29] Pupíková M, Šimko P, Gajdoš M, et al. Modulation of working memory and resting-state fMRI by tDCS of the right frontoparietal network [J]. *Neural Plast*, 2021, 2021. DOI: 10.1155/2021/5594305.
- [30] Nikolin S, Martin D, Loo CK, et al. Effects of TDCS dosage on working memory in healthy participants [J]. *Brain Stimul*, 2018, 11 (3) : 518-527. DOI: 10.1016/j.brs.2018.01.003.
- [31] Hill AT, Rogasch NC, Fitzgerald PB, et al. Impact of concurrent task performance on transcranial direct current stimulation (tDCS)-induced changes in cortical physiology and working memory [J]. *Cortex*, 2019, 113:37-57. DOI:10.1016/j.cortex.2018.11.022.
- [32] Izzetoglu K, Ayaz H, Merzagora A, et al. The evolution of field deployable fNIR spectroscopy from bench to clinical settings [J]. *J Innov Opt Health Sci*, 2011, 4 (3) : 239-250. DOI: 10.1142/s1793545811001587.
- [33] Di Rosa E, Brigadoi S, Cutini S, et al. Reward motivation and neurostimulation interact to improve working memory performance in healthy older adults; a simultaneous tDCS-fNIRS study [J]. *Neuroimage*, 2019, 202:116062. DOI:10.1016/j.neuroimage.2019.116062.
- [34] McKendrick R, Parasuraman R, Ayaz H. Wearable functional near infrared spectroscopy (fNIRS) and transcranial direct current stimulation (tDCS): expanding vistas for neurocognitive augmentation [J]. *Front Syst Neurosci*, 2015, 9:27. DOI:10.3389/fnsys.2015.00027.
- [35] 张彩迪, 蒋江灵, 朱怡康. 经颅直流电刺激对工作记忆影响的研究进展 [J]. *心理学通讯*, 2021, 4 (1) : 49-54. DOI: 10.12100/j.issn.2096-5494.219042.
- [36] Courtney SM, Hinault T. When the time is right: temporal dynamics of brain activity in healthy aging and dementia [J]. *Prog Neurobiol*, 2021, 203:102076. DOI:10.1016/j.pneurobio.2021.102076.
- [37] Jo JM, Kim YH, Ko MH, et al. Enhancing the working memory of stroke patients using tDCS [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2009, 88 (5) : 404-409. DOI: 10.1097/PHM.0b013e3181a0e4cb.
- [38] Rushby JA, De Blasio FM, Logan JA, et al. tDCS effects on task-related activation and working memory performance in traumatic brain injury: a within group randomized controlled trial [J]. *Neuropsychol Rehabil*, 2021, 31 (5) : 814-836. DOI: 10.1080/09602011.2020.1733620.

(修回日期:2023-06-20)

(本文编辑:阮仕衡)