·临床研究·

功能性电刺激辅助步行时脑卒中偏瘫患者的脑激活模式

何晓阔[1]　雷蕾[1]　余果[1]　沈德旺[1]　林馨[1]　陈善佳[1,2]
[1]厦门市第五医院康复医学科,厦门　361100; [2]厦门大学附属第一医院,厦门　361002
通信作者:陈善佳,Email:Chensj098@163.com

【摘要】 **目的**　采用功能性近红外光谱技术(fNIRS)实时监测脑卒中偏瘫患者在功能性电刺激辅助其步行时的脑激活特点。**方法**　招募右侧偏瘫的脑卒中患者 8 例,平均年龄(44.41±7.23)岁,采用自身对照方法,在跑台上以 2 km/h 的速度完成单纯步行和 FES 辅助步行任务各 1 次,同时进行实时 fNIRS 脑功能信号采集。在 Matlab 环境下,采用 NIRS-SPM 工具包计算受试者在完成单纯步行和 FES 辅助步行时不同脑区的携氧血红蛋白浓度变化,通过一般线性模型整合任务效应,采用 SPSS 20.0 版统计学软件对 beta 值进行单样本或配对样本 *t* 检验,输出具有显著性差异的激活热点图。**结果**　偏瘫患者在完成单纯步行任务时被激活的通道有 ch8、ch10、ch11、ch13、ch14、ch15、ch16、ch17、ch18、ch19、ch20、ch23、ch24、ch25、ch26、ch27、ch28、ch30、ch32、ch33、ch34、ch35、ch36、ch37;在 FES 辅助步行时被显著激活的通道有 ch8、ch9、ch10、ch11、ch13、ch14、ch15、ch16、ch17、ch18、ch19、ch20、ch22、ch23、ch24、ch25、ch26、ch27、ch28、ch30、ch31、ch32、ch33、ch34、ch35、ch36、ch37。该结果提示,单纯步行任务和 FES 辅助步行时共同激活的脑区均以健侧半球 M1 区激活为主,患侧半球 M1 和 SMA、PMC、S1 区激活为辅。比较不同步行任务下差异激活的脑区,输出存在显著差异的通道有 ch9、ch24、ch27、ch32、ch33,该结果提示,相比单纯步行任务,FES 辅助步行可额外增强健侧 S1、患侧 SMA 和 PMC 的激活水平。**结论**　脑卒中后偏瘫患者在单纯步行或 FES 辅助步行任务时均表现为双侧 M1 区的不对称性激活模式,而 FES 可显著增强患侧 PMC 和 SMA 区的代偿性激活模式,即 FES 辅助步行对偏瘫患者存在脑激活效应。

【关键词】 脑卒中;　偏瘫患者;　脑激活模式;　功能性近红外光谱技术;　功能性电刺激
基金项目:福建省科技计划项目(2020D025),福建省医学创新项目(2020CXB052),厦门市科技计划项目(3502Z20199100,3502Z20214ZD1261)
DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.09.002

The characteristics of cortical activation when hemiplegic stroke survivors walk assisted by functional electrical stimulation

He Xiaokuo[1], Lei Lei[1], Yu Guo[1], Shen Dewang[1], Lin Xin[1], Chen Shanjia[1,2]
[1]Department of Rehabilitation Medicine, The Fifth Hospital of Xiamen City, Xiamen 361100, China; [2]The First Affiliated Hospital of Xiamen University, Xiamen 361002, China
Corresponding author: Chen Shanjia, Email: Chensj098@163.com

【**Abstract**】 **Objective**　To explore the characteristics of cortical activation during the stimulation-assisted walking of hemiplegic stroke survivors using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). **Methods**　Eight stroke survivors with right hemiplegia (average age 44.4±7.2 years) in a self-controlled study each walked at 2km/h on a treadmill, alone and assisted by functional electronic stimulation (FES). Real-time near-infrared spectroscopic images were recorded. The Matlab NIRS-SPM toolkit was employed to calculate the changes in oxyhemoglobin concentration in different cortical regions. A general linear model was evaluated which integrated the task effects, and version 20.0 of the SPSS statistical software was used to perform single sample or paired sample t-tests of the beta values so as to produce activation hot maps of the significant differences. **Results**　During unassisted walking channels 8, 10, 11, 13-20, 23-28, 30 and 32-37 were significantly activated. During FES-assisted walking it was the same channels plus channels 9 and 22, 31. The results suggest that in walking the cortical regions activated are mainly located in M1 of the unaffected hemisphere, supplemented by M1 and SMA, PMC and S1 in the affected hemisphere. There were significant differences in the activation of channels 9, 24, 27, 32, 33 between the two walking tasks. FES-assistance enhances S1 activation on the unaffected side, as well as the SMA and PMC of the affected side more significantly. **Conclusions**　Bilateral asymmetrical activation is found mostly in M1 during walking with or without FES assistance. FES assistance significantly strengthens the compensatory activation of the PMC and SMA of the affected

hemisphere while walking for those with hemiplegia.

【**Key words**】 Stroke; Hemiplegia; Brain activation patterns; Functional near-infrared spectroscopy; Functional electrical stimulation

Funding: A Fujian Provincial Science and Technology Project (2020D025), a Medical Innovation Project of Fujian Province (2020CXB052), Xiamen Science and Technology Projects (3502Z20199100 and 3502Z20214ZD1261)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.09.002

脑卒中是全球导致成年人残障甚至死亡的主要病因,步态康复则是脑卒中幸存者恢复期的重要任务之一[1]。调查研究发现,超过 50%的脑卒中后偏瘫患者无法实现社区内独立行走[2],因此步行功能的恢复是脑卒中后偏瘫患者的康复重点。

功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)是最具代表性的自下而上的康复方法之一[3]。1960 年,FES 被应用于改善脑卒中后足下垂[4];后续研究发现,FES 可通过贴在肌肉对应位置上的电极来释放电流,刺激周围神经产生动作电位,从而引起肌肉收缩[5-6]。有研究发现,电刺激偏瘫患者患侧的关键肌肉,可使其产生步行等模式化动作组,并改善其步行表现[7]。自此,多通道 FES 开始被用于脑卒中患者的行走和平衡能力训练[8]。有研究发现,FES 可改善脑卒中患者的偏瘫肢体肌肉结构,但不确定 FES 是否存在皮质可塑性效应[9]。还有研究发现,FES 可降低胫骨前肌的运动诱发电位(motor evoked potential, MEP)潜伏期,提高对应运动皮质的兴奋性,但 FES 对脑激活的具体影响仍不清楚[10-11]。

随着神经影像技术发展,多种影像手段可测量大脑皮质活动情况。目前,功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)越来越多地被应用于姿势和步态领域,是研究现实活动中大脑激活模式的有效工具[12]。现今的神经影像技术中,功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)被认为是评估大脑神经活动的金标准,具有空间分辨率高和时间分辨率低的特点,但其受到运动伪影的易感性和行走活动的限制;脑磁图扫描技术(magnetoencephalography, MEG)也容易被运动伪影所影响,干扰检测结果[13];而正电子放射断层造影术(positron-emission tomography, PET)需要注入放射性示踪剂,不适合重复测量[14];脑电(electroencephalography, EEG)信号虽具有时间分辨率高,空间分辨率低的特点,但准备时间长,易受到人为干扰[15]。

基于以上因素,本研究采用 fNIRS 技术实时监测了脑卒中后偏瘫患者在行走模式功能性电刺激辅助步行(FES-assisted walking)时的脑激活特点,并对比了单纯步行任务与 FES 辅助步行任务的脑激活差异,旨在探讨 FES 对步行康复可能的作用机制。

资料与方法

一、研究对象

纳入标准:①年龄 18 岁至 60 岁,右利手;②符合中华医学会神经病学分会脑血管病学组制定的 2019 年中国各类主要脑血管病诊断要点[16],符合 CT 或 MRI 影像学诊断;③首次左侧大脑半球卒中,右侧肢体偏瘫;④发病时间 3 个月 ~ 1 年;⑤偏瘫下肢 Brunnstrom 分期Ⅲ ~ Ⅳ期;⑥在监护下借助 FES、足托类的助行器或独立平地步行 10 m;⑦患侧下肢肌张力 Ashworth 分级≤2 级;⑧自愿参加并签署知情同意书。

排除标准:①有严重躯体感觉障碍、认知障碍;②偏瘫下肢皮肤破损、皮肤病或合并有周围神经病变;③下肢骨折愈合期或严重的关节挛缩畸形影响步行。

本研究经厦门市第五医院医学伦理委员会审核批准,编号 2018-XMSDWYY-024。2021 年 08 月至 11 月,本课题组招募到符合上述标准的脑卒中后偏瘫住院患者 8 例,其中男 7 例,女 1 例;平均年龄(44.41±7.23)岁;平均病程(5.21±2.63)月。

二、研究方法

(一)研究设备

Tecnobody 公司生产的 Pro-kin 254P 型数字化跑台(意大利)、P2-9632 型四通道 FES 治疗仪(广州市凡科医疗设备有限公司)、BS-3000 型近红外光谱成像系统(武汉市资联虹康有限公司)。

(二)脑功能信号采集方法

8 例脑卒中后偏瘫患者均佩戴 fNIRS 设备中的光纤帽(佩戴前闭上眼睛,避免近红外光刺激眼睛),光纤帽贴合顶叶区,在头部中点(central zero, CZ)点对应通道 18,额中点(frontal zero, FZ)-CZ-顶中点(parietal zero, PZ)与通道 22-18-19 对齐,T3-CZ-T4 与通道 5-18-35 对齐,佩戴好光纤帽,并在下巴固定绑带。依照 Brodmann 分区法对应的通道序号(表 1),采用国际 10-20 系统脑电极分布图方法进行 fNIRS 通道与脑区配准(图 1)。采样区域包括前运动皮质(pre-motor cortex, PMC)、辅助运动区(supplementary motor area, SMA)、初级运动皮质(primary motor cortex, M1)和初级体感皮质(primary somatosensory cortex, S1),其中 M1 和 S1 统称感觉运动皮质(sensorimotor cortex, SMC),采样频率为 20 Hz。

表 1　大脑 Brodmann 分区对应通道列表

Brodmann 分区法	通道序号
初级体感皮质:BA 1,2,3	CH03/05/06/09/11、CH21/29/30/35/37、CH01/36
韦尼可区:BA40	02/31(wernick 区)
中央下区:BA43	CH3/37
初级运动皮质:BA4	CH08/10/15/16/19/20/25/26/28
前运动皮质和辅助运动区:BA6	CH04/07/12/13/14/15/17/18/22/23/24/27/32/33/34

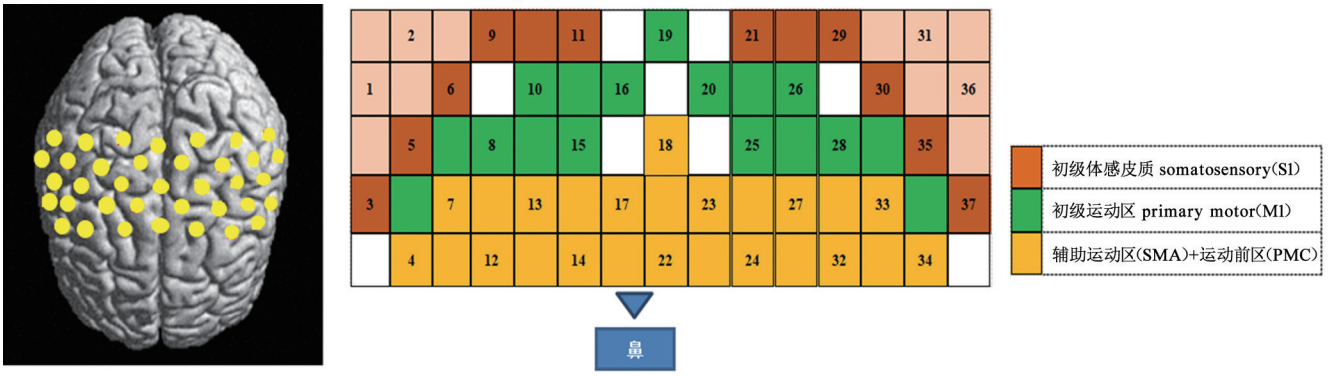

图 1　fNIRS 通道与脑区配准示意图

(三)步行任务

本研究采用自身对照方法,8 例脑卒中后偏瘫患者均完成单纯步行和 FES 辅助步行任务各 1 次,在完成任务的同时参照上述采集方法进行脑功能信号采集,2 项任务间隔 1 d。

1. 单纯步行任务:偏瘫患者着宽松衣物(必要时以悬吊保护预防摔倒,但无减重作用),步行任务分 2 个阶段,即预备期和任务期。预备期中,患者处于站立休息状态,持续 10 s;任务期中,由康复医师发出"走"和"停"的指令,患者听到"走"的指令后即开始以2 km/h的速度步行 30 s,当听到指令"停",则停止行走,原地站立位休息 30 s,然后重复上述任务 5 次(图 2a)。

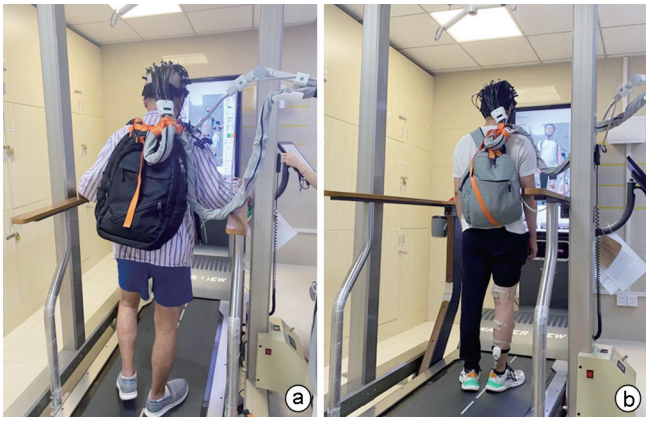

图 2　跑台步行训练图

2. FES 辅助步行任务:选取患侧下肢胫前肌、股四头肌中间和外侧头、腓肠肌、腘绳肌等四组肌肉,使用自带的定位笔在肌腹最明显处标记运动点,然后将 4 组电极片分别放置在上述肌肉。参数设置为行走模式,双相方波,频率为 30 Hz,脉宽为 200 μs,步行周期为 5 s,电流强度以患者最大耐受为限[17],详见图 2。偏瘫患者步行方案与单纯步行任务相同,但患侧下肢需在步行任务中同步接受 FES 电刺激(图 2b)。

三、数据分析方法

在 Matlab 环境下运行 NIRS-SPM 工具包[18],计算步行任务下不同脑区氧合血红蛋白(oxy-hemoglobin, OxyHb)的激活图。具体操作步骤包括:①nirs 格式转换为.mat 格式;②选择 wavelet-mdl 消除心跳、呼吸等噪音;③选择 hrf 低通滤波 filter 消除信号漂移和毛刺等;④通过一般线性模型(general linear model, GLM)整合任务效应,得到的参数 β 值估计模型;⑤根据实验设计,通过 SPSS 或内部脚本,对脑卒中患者在单纯步行或 FES 辅助步行任务下各通道的 beta 值进行单样本 t 检验,检验值为 0,输出统计量信息、激活热点图;对两种步行任务下各通道的 beta 值进行配对样本 t 检验,比较不同步行任务下差异激活的脑区,以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结　　果

一、脑卒中偏瘫患者在单纯步行任务时的脑激活分析

图 3 可见,脑卒中右侧偏瘫患者在单纯跑台步行任务未被显著激活的通道有 ch1、ch2、ch3、ch4、ch5、ch6、ch7、ch9、ch12、ch21、ch22、ch29、ch31,其余通道

ch8、ch10、ch11、ch13、ch14、ch15、ch16、ch17、ch18、ch19、ch20、ch23、ch24、ch25、ch26、ch27、ch28、ch30、ch32、ch33、ch34、ch35、ch36、ch37 均被激活（$P<0.05$）；其中 ch15 通道被显著激活，该结果显示，偏瘫患者单纯步行时，健侧半球以 M1 显著集中激活为主；而患侧半球则是 M1、S1、SMA 和 PMC 轻度激活。

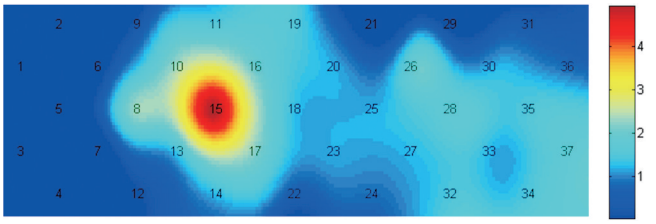

图 3　单纯步行任务时的大脑各通道激活 t 值热量图

二、脑卒中偏瘫患者在 FES 辅助步行任务时的脑激活分析

图 4 可见，脑卒中右侧偏瘫患者在 FES 辅助步行时未被显著激活的通道有 ch1、ch2、ch3、ch4、ch5、ch6、ch7、ch12、ch21、ch29，其余通道 ch8、ch9、ch10、ch11、ch13、ch14、ch15、ch16、ch17、ch18、ch19、ch20、ch22、ch23、ch24、ch25、ch26、ch27、ch28、ch30、ch31、ch32、ch33、ch34、ch35、ch36、ch37 均被激活，其中 ch8、ch10、ch15、ch24、ch27、ch32、ch33、ch34、ch35、ch37 被显著激活（$P<0.05$），该结果显示，FES 辅助步行时健侧半球以 M1 大面积显著激活为主；患侧半球则是 M1 轻度激活，SMA、PMC 和 S1 均明显激活。

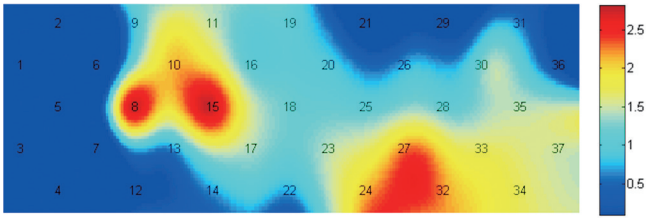

图 4　FES 辅助步行任务时大脑各通道激活 t 值热量图

三、不同步行任务下的脑激活特点

图 5 可见，不同步行任务下差异激活的脑区包括 ch9、ch24、ch27、ch32、ch33（$P<0.05$），该结果显示，相较于单纯步行状态，FES 辅助步行可额外增强健侧 S1、患侧 SMA 和 PMC 的激活水平。

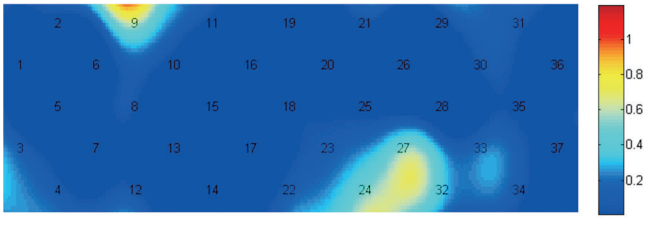

图 5　2 种步行任务下大脑各通道差异性激活 t 值热量图

讨　论

本研究结果显示，单纯步行任务和 FES 辅助步行任务时，共同激活的脑区均以健侧半球 M1 区显著激活为主，患侧半球 M1 和 SMA、PMC 区激活为辅。该结果提示，偏瘫患者步行时的脑激活特点为健侧 M1 显著激活，而患侧 M1 轻度激活的不对称性。其他 fNIRS 研究与本研究结论相近，如 Miyai 等的研究发现[19]，重度偏瘫患者在完成跑台步行时，健侧半球 SMC 激活水平明显高于患侧，患侧 PMC 的兴奋水平较健侧增高现象。Song 等[20]的研究也发现，偏瘫患者在完成机器人辅助步行任务时，其健侧 M1 的激活水平高于患侧半球。本课题组认为，脑卒中患者在完成步行时，M1 区不对称性激活，同理于偏瘫者可被诱导出双侧肢体不对称性 MEP，患侧半球的刺激阈更高，呈更低的 MEP 波幅和长潜伏期的特点，这可能与半球间竞争性抑制机制有关[21]。

其次，本研究结果显示，除了双侧 M1 区不对称性激活外，均有广泛的患侧 SMA、PMC 和少量的 S1 激活特点。该结果提示，M1/S1（统称 SMC）、SMA、PMC 组成的运动控制网络参与了步行环节。Kim 等[22]采用 fNIRS 检测发现，健康受试者在常规步行、跑台步行、机器人辅助步行任务中，均涉及不同程度的运动控制网络 SMC-PMC-SMA 的激活。Miyai 等[23]在 fNIRS 研究中也发现，健康受试者在完成跑台步行时，其双侧 SMC 和 SMA 的氧合和总血红蛋白浓度均显著增加。

本研究结果还显示，相较于单纯步行任务，FES 辅助步行可额外增强健侧 S1、患侧 SMA 和 PMC 的激活水平，而对患侧 M1 激活无明显改变。本课题组推测，患侧 SMA/PMC 激活水平的增强在偏瘫步态康复中有重要意义。Song 等[20]的研究发现，偏瘫患者在进行了 3 周的机器人辅助步行训练后，其双侧半球不对称性激活现象得到改善，且可见患侧 SMA 和 PMC 的激活水平增强。Miyai 等[23]的研究也发现，偏瘫患者经 2 个月的跑台训练，双 M1 区的不对称性激活得到改善，其患侧半球的 PMC 激活水平也显著增强，该研究认为，对称性 M1 激活对脑卒中后运动功能的恢复有重要意义，且患侧 PMC 激活水平的增强与稳定步态和姿势控制能力的恢复有关[24]。本课题组认为，FES 可能通过提高脑卒中后偏瘫患者患侧 PMC/SMA 的兴奋性，来发挥患侧皮质的运动代偿作用。目前，FES 辅助步行训练的实时脑功能研究较少，尚缺乏此类的研究来支持上述观点，但本研究从大脑皮质可塑性角度阐述了 FES 辅助步行对脑卒中后偏瘫患者存在脑激活效应，在一定程度上揭示了 FES 可能的疗效机制。

本研究存在几点不足。首先，主要关注在运动脑

区,未讨论前额叶(Prefrontal cortex,PFC)在运动步态控制中的作用;其次,存在样本量不足的问题,仅可初步探讨现实环境下脑卒中后偏瘫患者步行时的运动皮质功能状态;另外,考虑到患者的耐受和安全问题,本研究将 2 km/h 作为所有患者的跑台速度,未探讨不同步速对脑激活的影响[25]。因此,在后续的研究中,本课题组将扩大样本量、覆盖更多的脑区,探讨复杂任务和长期步行训练对受试者的脑可塑性的影响。

综上所述,单纯步行和 FES 辅助步行时,脑卒中后偏瘫患者均表现为健侧 M1 被显著激活而患侧 M1 被轻度激活的不对称性激活特点,而 FES 辅助步行可额外增强其健侧 S1 和患侧 SMA、PMC 的激活水平。本研究初步证实了 FES 辅助步行对脑卒中后偏瘫患者存在脑激活效应,具体疗效机制还有待后续研究。

参 考 文 献

[1] Rudberg AS, Berge E, Laska AC, et al. Stroke survivors' priorities for research related to life after stroke[J]. Top Stroke Rehabil,2021,28(2):153-158.DOI: 10.1080/10749357.2020.1789829.

[2] Blennerhassett JM, Levy CE, Mackintosh A, et al. One-quarter of people leave inpatient stroke rehabilitation with physical capacity for community ambulation[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis,2018,27(12):3404-3410. DOI:10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2018.08.004.

[3] Howlett OA, Lannin NA, Ada L, et al. Functional electrical stimulation improves activity after stroke: a systematic review with meta-analysis[J]. Arch Phys Med Rehabil,2015,96(5):934-943. DOI: 10.1016/j.apmr.2015.01.013.

[4] Bogataj U, Gros N, Kljajic M, et al. The rehabilitation of gait in patients with hemiplegia: a comparison between conventional therapy and multichannel functional electrical stimulation therapy[J]. Phys Ther,1995,75(6):490-502. DOI:10.1093/ptj/75.6.490.

[5] Moreno JC, Del AA, de Los RA, et al. Neurorobotic and hybrid management of lower limb motor disorders:a review[J]. Med Biol Eng Comput, 2011, 49 (10): 1119-1130. DOI: 10. 1007/s11517-011-0821-4.

[6] Robbins SM, Houghton PE, Woodbury MG, et al. The therapeutic effect of functional and transcutaneous electric stimulation on improving gait speed in stroke patients: a meta-analysis[J]. Arch Phys Med Rehabil,2006,87(6):853-859. DOI: 10.1016/j.apmr.2006.02.026.

[7] Qian JG, Rong K, Qian Z, et al. Effects of a multichannel dynamic functional electrical stimulation system on hemiplegic gait and muscle forces[J]. J Phys Ther Sci,2015,27(11):3541-3544. DOI: 10.1589/jpts.27.3541.

[8] Tan Z, Liu H, Yan T, et al. The effectiveness of functional electrical stimulation based on a normal gait pattern on subjects with early stroke: a randomized controlled trial[J].Biomed Res Int,2014,2014:545408. DOI: 10.1155/2014/545408.

[9] Berenpas F, Weerdesteyn V, Geurts AC, et al. Long-term use of implanted peroneal functional electrical stimulation for stroke-affected gait: the effects on muscle and motor nerve[J]. J Neuroeng Rehabil,2019,16(1):86. DOI: 10.1186/s12984-019-0556-2.

[10] Kido Thompson A, Stein RB. Short-term effects of functional electrical stimulation on motor-evoked potentials in ankle flexor and extensor muscles[J]. Experimental Brain Research,2004,159(4):491-500. DOI: 10.1007/s00221-004-1972-4.

[11] 刘慧华,燕铁斌,谭志梅,等.功能性电刺激对急性脑梗死大鼠运动功能及室管膜下区内源性神经干细胞的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2015,37(9):646-652. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2015.09.002

[12] Corp DT, Youssef GJ, Clark RA, et al. Reduced motor cortex inhibition and a 'cognitive-first' prioritisation strategy for older adults during dual-tasking[J]. Exp Gerontol,2018,113:95-105. DOI:10.1016/j.exger.2018.09.018.

[13] Cutini S, Brigadoi S. Unleashing the future potential of functional near-infrared spectroscopy in brain sciences[J]. J Neurosci Methods,2014,232:152-156. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2014.05.024.

[14] Saliba J, Bortfeld H, Levitin DJ, et al. Functional near-infrared spectroscopy for neuroimaging in cochlear implant recipients[J]. Hear Res,2016,338:64-75. DOI: 10.1016/j.heares.2016.02.005.

[15] Berger A, Horst F, Müller S, et al. Current state and future prospects of EEG and fNIRS in robot-assisted gait rehabilitation: a brief review[J]. Front Hum Neurosci, 2019, 13: 172. DOI: 10. 3389/fnhum.2019.00172.

[16] 曾进胜,蒲传强. 我国各类主要脑血管病诊断要点演变与更新[J].中华神经科杂志, 2019,52(9) : 681-683. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-7876.2019.09.001

[17] Allen JL, Ting LH, Kesar TM. Gait rehabilitation using functional electrical stimulation induces changes in ankle muscle coordination in stroke survivors: a preliminary study[J]. Front Neurol,2018,9:1127. DOI: 10.3389/fneur.2018.01127.

[18] Ye JC, Tak S, Jang KE, et al. NIRS-SPM: statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy[J]. Neuroimage, 2009, 44(2):428-447. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2008.08.036.

[19] Miyai I, Yagura H, Oda I, et al. Premotor cortex is involved in restoration of gait in stroke[J]. Ann Neurol,2002,52(2):188-194. DOI: 10.1002/ana.10274.

[20] Song KJ, Chun MH, Lee J, et al. The effect of robot-assisted gait training on cortical activation in stroke patients: a functional near-infrared spectroscopy study[J]. NeuroRehabilitation,2021,49(1):65-73. DOI: 10.3233/NRE-210034.

[21] Talelli P, Greenwood RJ, Rothwell JC. Arm function after stroke: neurophysiological correlates and recovery mechanisms assessed by transcranial magnetic stimulation[J]. Clin Neurophysiol, 2006, 117(8):1641-1659. DOI: 10.1016/j.clinph.2006.01.016.

[22] Kim HY, Yang SP, Park GL, et al. Best facilitated cortical activation during different stepping, treadmill, and robot-assisted walking training paradigms and speeds: a functional near-infrared spectroscopy neuroimaging study[J]. NeuroRehabilitation,2016,38(2):171-178. DOI: 10.3233/NRE-161307.

[23] Miyai I,Tanabe HC,Sase I,et al.Cortical mapping of gait in humans: a near-infrared spectroscopic topography study[J]. Neuroimage, 2001,14(5):1186-1192. DOI:10.1006/nimg.2001.0905.

[24] Miyai I, Yagura H, Hatakenaka M, et al. Longitudinal optical imaging study for locomotor recovery after stroke[J]. Stroke, 2003, 34(12):2866-2870. DOI: 10.1161/01.STR.0000100166.81077.8A.

[25] Bishnoi A, Holtzer R, Hernandez ME. Brain activation changes while walking in adults with and without neurological disease: systematic review and meta-analysis of functional near-infrared spectroscopy studies[J]. Brain Sci, 2021,11(3):291. DOI: 10.3390/brainsci11030291.

(修回日期:2022-08-07)
(本文编辑:阮仕衡)