

## · 临床研究 ·

## 脑机接口联合运动想象训练对缺血性脑卒中患者上肢功能恢复的影响

陈晓娟 纳金花 马晓红 金俏 张蓉 钟晓君

青海省人民医院康复医学科, 西宁 810007

通信作者: 金俏, Email: jinqiao007@sina.com

**【摘要】 目的** 观察基于运动想象的脑机接口 (BCI) 训练对缺血性脑卒中患者上肢运动功能恢复的影响, 并分析患者运动诱发电位 (MEP) 潜伏期、中枢运动传导时间 (CMCT) 与上肢运动功能间的相关性。**方法** 采用随机数字表法将 46 例缺血性脑卒中伴上肢运动功能障碍患者分为脑机组及对照组, 每组 23 例。2 组患者均给予常规康复干预, 脑机组在此基础上给予基于运动想象训练的脑机接口治疗, 对照组则辅以腕指被动屈伸训练。于治疗前、治疗 4 周后分别采用上肢 Fugl-Meyer 运动功能量表 (FMA-UE)、功能独立性量表 (FIM) 及上肢动作研究量表 (ARAT) 对 2 组患者肢体功能进行评定; 同时检测 2 组患者 MEP 潜伏期及 CMCT, 并对患者上肢功能评分与 MEP、CMCT 进行相关性分析。**结果** 治疗前脑机组、对照组患者 FMA-UE、FIM、ARAT 评分、MEP 潜伏期及 CMCT 组间差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ ); 治疗后 2 组患者 FMA-UE 评分 [分别为 (41.22±13.09) 分和 (32.23±15.49) 分]、FIM 评分 [分别为 (82.96±13.58) 分和 (73.32±18.56) 分]、ARAT 评分 [分别为 32.00 (20.00, 41.00) 分和 21.00 (3.00, 38.25) 分]、MEP 潜伏期 [分别为 (22.84±0.88) ms 和 (23.61±1.32) ms] 及 CMCT [分别为 (10.26±1.09) ms 和 (11.26±1.49) ms] 均较治疗前明显改善, 并且脑机组上述指标改善情况亦显著优于对照组水平 ( $P<0.05$ ); 另外本研究还发现患者 FMA-UE、FIM 及 ARAT 评分与 CMCT 及 MEP 潜伏期具有负相关性。**结论** 基于运动想象的 BCI 训练可显著改善缺血性脑卒中患者 MEP 潜伏期、CMCT 值及上肢运动功能, 并且 FMA-UE、FIM 及 ARAT 评分与 MEP 潜伏期、CMCT 值具有负相关性。

**【关键词】** 缺血性脑卒中; 上肢运动功能障碍; 脑机接口; 运动想象训练; 运动诱发电位

**基金项目:** 青海省应用基础研究项目 (2021-ZJ-767)

**Funding:** The Basic Research Project of Qinghai Province (2021-ZJ-767)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.03.006

据相关资料统计, 我国国民致死首位原因为脑卒中, 其中缺血性脑卒中患者约占卒中患者总量的 60%~80%, 约 2/3 的卒中患者遗留有不同程度功能障碍, 给其家庭及社会造成沉重负担<sup>[1]</sup>。相关循证医学已证实, 康复干预是降低缺血性脑卒中患者致残率最有效的方法之一<sup>[2]</sup>; 但传统康复训练过程枯燥、乏味, 难以调动患者参与训练的积极性, 故整体疗效欠理想。基于运动想象的脑机接口 (brain computer inter-face, BCI) 训练则实现了脑-肢联动的闭环通路, 可充分调动患者主动性及运动再学习能力, 进一步增强神经可塑性、改善运动功能<sup>[3]</sup>。以往研究证实, 肢体运动能力与皮质脊髓束 (corticospinal tract, CST) 功能及结构完整性密切相关, 而临床运动量表结果可反映 CST 介导的运动功能水平, 运动诱发电位 (motor evoked potential, MEP) 及中枢运动传导时间 (central motor conduction time, CMCT) 可反映 CST 功能完整性<sup>[5]</sup>。基于此, 本研究拟观察基于运动想象的 BCI 训练对缺血性脑卒中患者上肢运动功能恢复的影响, 并分析 MEP 及 CMCT 与临床运动量表结果间的相关性, 为提高缺血性脑卒中患者康复治疗及评估水平提供参考资料。

## 对象与方法

### 一、对象及分组

选取 2020 年 2 月至 2021 年 8 月期间在青海省人民医院住

院及门诊治疗的缺血性脑卒中伴上肢功能障碍患者作为研究对象。患者纳入标准包括: ①均符合中国脑血管疾病分类 (2015 年版) 关于缺血性脑卒中的诊断标准<sup>[6]</sup>; ②经头颅 CT 或 MRI 检查确诊为脑梗死, 病程 ≤ 6 个月; ③年龄 18~80 岁; ④病灶仅累及一侧大脑半球, 并可通过刺激患侧初级运动皮质区 (primary motor cortex, M1) 在对侧肢体记录到 MEP; ⑤上肢运动功能障碍; ⑥简易精神状态量表 (mini-mental state examination, MMSE) 评分 > 17 分; ⑦患者对本研究知晓并签署知情同意书。患者排除标准包括: ①因严重失语、认知障碍或精神疾患等原因无法配合治疗; ②有癫痫病史; ③患者生命体征不稳定; ④有严重的肝、肾功能不全; ⑤有磁刺激禁忌证等情况。本研究同时经青海省人民医院伦理学委员会审批 (2022-109)。

参照前述纳入和排除标准, 共纳入 46 例患者, 采用随机数字表法分为脑机组及对照组, 每组 23 例。2 组患者一般资料情况 (详见表 1) 经统计学比较, 发现组间差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ ), 具有可比性。

### 二、治疗方法

2 组患者均予以抗血小板聚集、降压、降脂、降糖、改善脑循环等治疗, 治疗师根据患者评估情况给予针对性康复干预, 包括: ①作业疗法; ②运动疗法, 如 Bobath 技术、Brunnstrom 技术、本体感觉神经肌肉促进疗法 (proprioceptive neuromuscular facilitation, PNF)、Rood 技术、运动再学习技术、平衡及协调性训练

表 1 入选时 2 组患者一般资料情况比较

组别	例数	性别(例)		年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$ )	病程 (d, $\bar{x}\pm s$ )	卒中侧别(例)		病变部位(例)		
		男	女			左半球	右半球	皮质	皮质下层	皮质及皮质下层
脑机组	23	11	12	63.68±11.03	20.16±3.71	11	12	6	11	6
对照组	23	16	7	61.38±10.38	22.33±6.24	13	10	6	10	7

等;③传统中医康复,如针灸、按摩等;④物理因子治疗,如空气压力波治疗、低频电刺激等。

对照组患者在上述干预基础上采用气动式关节手套辅助瘫痪侧上肢进行被动训练,主要针对腕关节及手指的屈伸功能进行强化训练,每次训练约 40 min,每天训练 1 次,每周训练 5 d,持续训练 4 周。脑机组则在常规干预基础上给予基于运动想象的脑机接口(BCI)训练(图 1),采用山东产 LSR-A II 型脑机接口训练系统,该脑机训练系统包括主机、软件、脑电控制器、电刺激器等部件,主机由生物反馈康复仪及脑电集成器组成,脑电控制器由脑电帽及 USB 无线通讯器等部件组成。治疗时患者取坐位,充分放松,告知其训练技巧及注意事项;指导患者佩戴脑电帽,先采集患者在安静状态下的 30 s 脑电图作为基础脑电数据,将电极片贴于瘫痪肢体伸腕肌群处;选择上肢训练模式,要求患者注视训练系统电脑显示器,借助虚拟现实(virtual reality, VR)技术向其示范腕及手指屈伸动作,通过视觉及言语引导患者重复想象瘫痪侧肢体执行相应动作,期间无实际动作输出,但系统会自动采集并分析患者在运动想象意图下的脑电信号,若想象正确则发放电刺激使患者瘫痪侧上肢完成腕、手指屈伸动作,形成一个运动想象、分析、反馈的闭环。上述脑机接口训练每次持续 40 min,每天治疗 1 次,每周治疗 5 d,持续治疗 4 周。



图 1 患者正在进行 BCI 训练

### 三、疗效评价标准

于治疗前、治疗 4 周后对 2 组患者进行疗效评定,采用 Fugl-Meyer 量表上肢部分(Fugl-Meyer assessment-upper extremity,

FMA-UE)评定患者上肢运动功能,该量表共包括 33 个项目,总分 66 分,得分越高表示患者上肢运动功能越好,如患者上肢 FMA 评分<31 分则提示上肢运动功能重度障碍<sup>[7]</sup>;采用上肢动作研究量表(action research arm test, ARAT)评定患者上肢运动功能恢复情况,该量表评定内容包括抓、握、捏及粗大动作功能(共计 19 项,每项分值 0~3 分),总分 57 分,得分越高表明患者上肢运动功能恢复越好<sup>[8]</sup>;采用功能独立性量表(functional independence measure, FIM)评估患者日常生活能力情况,总分 126 分(其中运动功能 91 分,认知功能 35 分),得分越高表示患者功能独立水平越好<sup>[9]</sup>。

本研究同时于上述时间点检测患者 MEP 及 CMCT。检测时患者取坐位或仰卧位,根据脑电 10-20 系统定位标准,将武汉产 OSF-4/T 型磁刺激仪配置的“8”字线圈依次对准患者病变侧 M1 区及 C<sub>7</sub> 部位,将记录电极置于对侧拇短展肌肌腹处,相对应肌腱部位放置参考电极,磁刺激强度为 100%运动阈值水平,MEP 取拇短展肌复合肌肉动作电位(compound muscle action potential, CAMP)潜伏期,CMCT 为分别刺激 M1 区及 C<sub>7</sub> 诱发 MEP 的潜伏期之差<sup>[9]</sup>。

### 四、统计学方法

本研究采用 SPSS 22.0 版统计学软件包进行数据分析,计量资料且符合正态分布以( $\bar{x}\pm s$ )表示,组间比较采用两独立样本 *t* 检验,组内治疗前、后比较采用配对样本 *t* 检验;非正态分布计量资料以中位数(median, *M*)表示,组间比较采用两独立样本秩和检验,组内治疗前、后比较采用配对秩和检验;计数资料比较采用  $\chi^2$  检验;采用 Spearman 检验分析上肢临床量表评分与 MEP、CMCT 的相关性, $P<0.05$  表示差异具有统计学意义或具有显著相关性。

## 结 果

### 一、治疗前、后 2 组患者 FMA-UE、ARAT 及 FIM 评分比较

治疗前 2 组患者 FMA-UE、ARAT 及 FIM 评分组间差异均无统计学意义( $P>0.05$ );治疗 4 周后发现 2 组患者 FMA-UE、ARAT 及 FIM 评分均较治疗前明显升高( $P<0.05$ ),并且治疗后脑机组上述指标评分亦显著优于对照组水平( $P<0.05$ ),具体数据见表 2。

表 2 治疗前、后 2 组患者 FMA-UE、ARAT 及 FIM 评分比较(分)

组别	例数	FMA-UE 评分( $\bar{x}\pm s$ )		ARAT 评分		FIM 评分( $\bar{x}\pm s$ )	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
对照组	23	30.22±15.22	32.23±15.49 <sup>a</sup>	18.50(0.75, 36.50)	21.00(3.00, 38.25) <sup>a</sup>	67.36±18.86	73.32±18.56 <sup>a</sup>
脑机组	23	27.82±13.33	41.22±13.09 <sup>ab</sup>	19.00(5.00, 32.00)	32.00(20.00, 41.00) <sup>ab</sup>	67.21±12.50	82.96±13.58 <sup>ab</sup>

注:与组内治疗前比较,<sup>a</sup> $P<0.05$ ;与对照组治疗后比较,<sup>b</sup> $P<0.05$

### 二、治疗前、后 2 组患者 CMCT 及 MEP 比较

治疗前 2 组患者 MEP 潜伏期、CMCT 组间差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ ); 治疗 4 周后 2 组患者 MEP 潜伏期及 CMCT 均较治疗前明显改善 ( $P<0.05$ ), 并且脑机组上述指标结果亦显著优于对照组水平 ( $P<0.05$ ), 具体数据见表 3。

### 三、MEP 及 CMCT 与上肢功能评分的相关性分析

通过 Spearman 相关性分析发现, 治疗前入组患者 MEP 潜伏期与 FMA-UE、ARAT 及 FIM 评分呈负相关性 ( $r$  值分别为  $-0.57$ 、 $-0.88$ 、 $-0.75$ ,  $P<0.05$ ), 详见图 2~4; 治疗前 CMCT 值与 FMA-UE、ARAT、FIM 评分亦呈负相关性 ( $r$  值分别为  $-0.52$ 、 $-0.89$ 、 $-0.33$ ,  $P<0.05$ ), 详见图 5~7。

## 讨 论

本研究结果显示, 治疗后脑机组患者 FMA-UE、FIM、ARAT 评分、MEP 潜伏期及 CMCT 均较治疗前及对照组明显改善 ( $P<0.05$ ), 表明基于运动想象的 BCI 训练能显著改善缺血性脑卒中患者上肢运动功能, 提高其生活自理能力。

已有证据表明, 基于运动想象的 BCI 训练作为中枢干预技术, 对卒中后偏瘫侧肢体功能改善具有促进作用。如 Carvalho

等<sup>[10]</sup>通过分析大量文献后发现, 经 BCI 训练后脑卒中患者瘫痪侧肢体 FMA 评分显著提高, 与本研究结果基本一致。还有学者通过近红外光谱技术检测大脑皮质神经反馈, 并分析 BCI 训练与患肢 FMA 评分间的相关性, 证实 BCI 训练可显著促进重度偏瘫患者运动功能恢复, 诱导大脑结构及功能发生可塑性改变<sup>[11]</sup>。

将 BCI 训练与运动想象训练相结合, 可将人类运动意志转化为脑电信号, 驱动目标任务达成, 形成中枢与外周的“闭环回路”, 以达到促进肢体功能恢复的目的。通过解码运动想象时相关脑电活动百分比的最大值及平均值, 发现均高于基线水平, 并且不同病程、不同严重程度及不同部位脑卒中患者经 BCI 训练后其肢体运动功能均有明显改善<sup>[12]</sup>。此外患者可通过运动想象训练与 VR 情景下的“虚拟对象”进行交互作用, 利用视、听、触觉反馈促进感觉运动区镜像神经元激活, 有助于皮质功能重组及运动功能恢复<sup>[13]</sup>。吴琼等<sup>[14]</sup>通过静态功能磁共振成像分析经 BCI 训练后脑卒中患者的双侧大脑皮质功能连接 (functional connectivity, FC) 情况, 发现患者大脑皮质运动区、视觉区、听觉区、感觉联合区、躯体感觉区以及眼动相关区域 FC 均有所增强, 且与患者运动功能改善幅度具有正相关性。

表 3 治疗前、后 2 组患者 MEP 潜伏期、CMCT 比较 (ms,  $\bar{x}\pm s$ )

组别	例数	MEP 潜伏期		CMCT	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
对照组	23	23.94±1.36	23.61±1.32 <sup>a</sup>	11.71±1.44	11.26±1.49 <sup>a</sup>
脑机组	23	24.39±0.86	22.84±0.88 <sup>ab</sup>	12.10±1.51	10.26±1.09 <sup>ab</sup>

注: 与组内治疗前比较, <sup>a</sup> $P<0.05$ ; 与对照组治疗后比较, <sup>b</sup> $P<0.05$

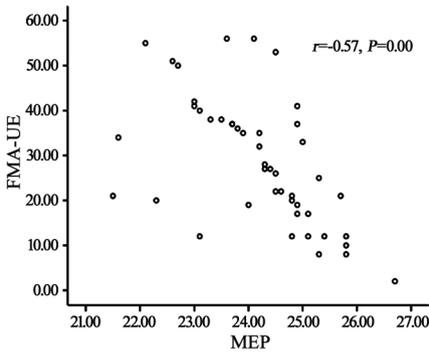


图 2 MEP 与 FMA-UE 评分相关关系散点图

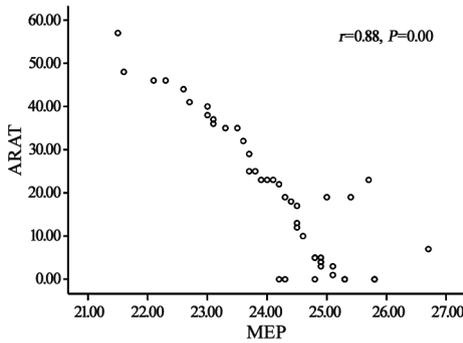


图 3 MEP 与 ARAT 评分相关关系散点图

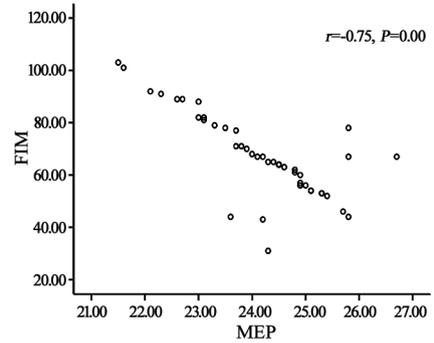


图 4 MEP 与 FIM 评分相关关系散点图

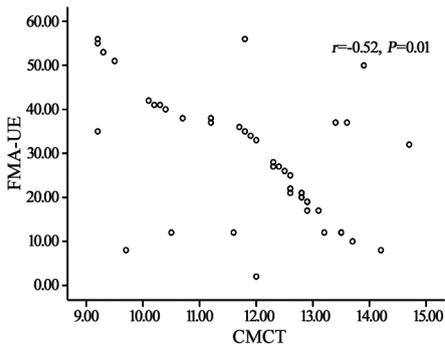


图 5 CMCT 与 FMA-UE 评分相关关系散点图

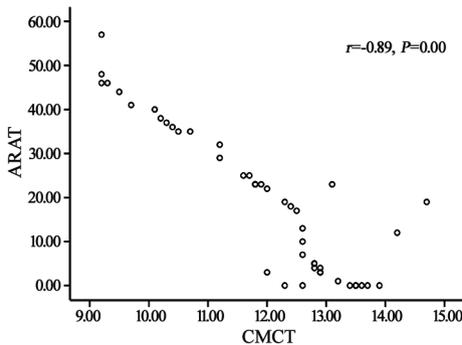


图 6 CMCT 与 ARAT 评分相关关系散点图

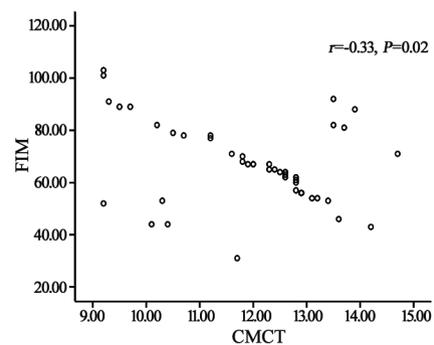


图 7 CMCT 与 FIM 评分相关关系散点图

本研究在常规康复干预基础上,采用基于运动想象的 BCI 训练治疗缺血性脑卒中患者,以 FMA-UE、FIM、ARAT 评分作为运动功能指标,经治疗 4 周后发现患者上述指标均较治疗前及对照组明显改善( $P<0.05$ ),与国内李明芬等<sup>[15]</sup>报道结果基本一致。分析其作用机制可能包括以下方面:①在人机交互模式下采用 VR 技术指导患者进行训练,能增加训练趣味性,充分调动患者主动参与度,训练时根据患者动作意图驱动电刺激反馈,能实时调整运动想象模式,增强运动再学习能力,加速肢体受损功能恢复;②重复运动想象能反复刺激受损脑皮质,促进神经轴突及树突芽生、脑损伤周边组织重构<sup>[12]</sup>;③当病灶侧脑功能增强后,能通过胼胝体作用减弱健侧大脑对患侧大脑的抑制,促进双侧大脑功能重新恢复动态平衡,有助于肢体功能改善<sup>[3]</sup>。由于脑卒中后 CST 传导通路脱髓鞘或中断,患者可出现 MEP 潜伏期及 CMCT 延长<sup>[5]</sup>。本研究发现入选脑卒中后患者经治疗后其 MEP 潜伏期及 CMCT 均较治疗前明显缩短,且与 FMA-UE、ARAT 及 FIM 评分具有负相关性,提示病灶侧 CST 损伤越严重,则偏瘫侧上肢运动功能障碍程度越显著。

综上所述,基于运动想象的 BCI 训练对缺血性脑卒中患者具有显著疗效,能进一步改善患者上肢运动功能,另外本研究还发现 MEP 潜伏期及 CMCT 与患者上肢功能评分具有负相关性,能作为反映 CST 传导通路完整性及评估患者上肢功能的重要指标。需要指出的是,本研究还存在诸多不足,包括样本量较小、纳入患者病程较短、未进行长期随访等,后续研究将针对上述不足进一步完善。

## 参 考 文 献

- [1] Roth GA, Mensah GA, Johnson CO, et al. Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990-2019; update from the GBD 2019 study[J]. J Am Coll Cardiol, 2020, 76(25): 2982-3021. DOI: 10.1016/j.jacc.2020.11.010.
- [2] Winstein CJ, Stein J, Arena R, et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery; a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association[J]. Stroke, 2016, 47(6): e98-e169. DOI: 10.1161/STR.0000000000000098.
- [3] 曲斯伟, 宋为群. 脑-机接口技术在卒中患者康复中的研究进展[J]. 中国脑血管病杂志, 2016, 13(3): 156-161. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5921.2016.03.010.
- [4] 杨雅馨, 李颖, 袁海峰, 等. 脑卒中后肢体运动功能障碍的生物学评估指标分析[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2019, 41(10): 740-744. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.10.005.

- [5] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国急性缺血性脑卒中诊治指南 2014[J]. 中华神经科杂志, 2015, 48(4): 246-257. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-7876.2015.04.002.
- [6] Hayward KS, Schmidt J, Lohse KR, et al. Are we armed with the right data? Pooled individual data review of biomarkers in people with severe upper limb impairment after stroke[J]. Neuroimage Clin, 2017, 13: 310-319. DOI: 10.1016/j.nicl.2016.09.015.
- [7] Li YC, Liao WW, Hsieh YW, et al. Predictors of clinically important changes in actual and perceived functional arm use of the affected upper limb after rehabilitative therapy in chronic stroke[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2020, 101(3): 442-449. DOI: 10.1016/j.apmr.2019.08.483.
- [8] Mackintosh S. Functional independence measure[J]. Aust J Physiother, 2009, 55(1): 65. DOI: 10.1016/s0004-9514(09)70066-2.
- [9] 金俏, 吴世政, 任启晶, 等. 重复经颅磁刺激偶联功能性电刺激对脑梗死患者运动功能恢复的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2017, 39(10): 747-749. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2017.10.006.
- [10] Carvalho R, Dias N, Cerqueira JJ. Brain-machine interface of upper limb recovery in stroke patients rehabilitation; a systematic review[J]. Physiother Res Int, 2019, 24(2): e1764. DOI: 10.1002/pri.1764.
- [11] Mihara M, Hattori N, Hatakenaka M, et al. Near-infrared spectroscopy-mediated neurofeedback enhances efficacy of motor imagery-based training in poststroke victims: a pilot study[J]. Stroke, 2013, 44(4): 1091-1098. DOI: 10.1161/STROKEAHA.111.674507.
- [12] Frolov AA, Mokienko O, Lyukmanov R, et al. Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based brain-computer interface (BCI)-controlled hand exoskeleton: a randomized controlled multicenter trial[J]. Front Neurosci, 2017, 11: 400. DOI: 10.3389/fnins.2017.00400.
- [13] 高政, 杨婷, 王晓菊, 等. 运动想象训练联合经颅直流电刺激对脑卒中偏瘫患者上肢功能的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2021, 43(7): 611-614. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2021.07.007.
- [14] 吴琼, 任诗媛, 乐赞, 等. 脑机接口综合康复训练对亚急性期脑卒中疗效的静息态功能磁共振研究[J]. 中国康复理论与实践, 2020, 26(1): 77-84. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2020.01.014.
- [15] 李明芬, 贾杰, 刘焯, 等. 基于运动想象的脑机接口康复训练对脑卒中患者上肢运动功能的影响[J]. 老年医学与保健, 2012, 18(6): 347-352. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8296.2012-06-08.

(修回日期: 2022-07-02)

(本文编辑: 易 浩)