

·名家论坛·

基于脑电图的运动想象脑机接口训练在脑卒中康复领域的应用

白玉龙*

复旦大学附属华山医院,上海 200040

* 通信作者:白玉龙, E-mail: dr_baiyl@fudan.edu.cn

收稿日期:2025-10-10;接受日期:2025-11-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3601204);国家中医药管理局、国家卫生健康委员会中西医协同“旗舰”科室建设项目(复旦大学附属华山医院康复医学科)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2026.02001



白玉龙,主任医师、教授、博士研究生导师,复旦大学附属华山医院康复医学科执行主任、复旦大学华山临床医学院康复与运动医学教研室主任。长期从事神经系统伤病康复的基础与临床研究。兼任中国康复医学会神经康复专业委员会副主任委员和脑血管病介入治疗与康复专业委员会副主任委员、中国卒中学会卒中康复分会副主任委员、中德医学会康复医学分会副主任委员、中国健康管理协会慢病康复管理分会副会长、国家卫生健康委员会百万减残工程专家委员会委员、国家健康科普专家库成员。上海市医师协会第五届“仁心医者-上海市杰出专科医师奖”获得者。主持国家卫生健康委员会康复医学临床重点专科建设项目和国家中医药管理局中西医协同“旗舰”科室建设项目各1项、国家自然科学基金项目4项、国家重点研发计划专项1项、省部级和市级科研项目等10余项。以第一或通信作者发表论文180余篇,其中SCI论文30余篇。主译、副主编和参编康复医学相关专著20余部。获教育部科学技术进步奖二等奖等多项奖励。

摘要 脑卒中作为全球主要致残性疾病,严重损害患者生活质量。基于脑电图的运动想象脑机接口(MI-BCI)技术通过实时解码患者运动意图相关的脑电信号并转化为多模态外部反馈,为脑卒中后运动功能康复提供了新途径。本研究系统阐述了MI-BCI在脑卒中上肢和下肢康复中的临床应用进展。MI-BCI结合康复机器人、功能性电刺激、虚拟现实等末端效应器可改善脑卒中患者上肢运动功能;联合经颅直流电刺激或经颅磁刺激等神经调控技术,可进一步提升解码效率和康复效果;在下肢康复方面,MI-BCI通过结合下肢康复机器人、踏车或功能性电刺激(FES)等设备,可改善脑卒中患者步态、平衡功能和下肢运动功能。但目前研究仍存在样本量小、参数(如训练强度、干预时间、反馈模式等)不统一、机制研究不深入等问题,BCI盲现象及下肢解码准确率较低等问题也限制了MI-BCI技术的普适性。未来研究需开展大样本、多中心的随机对照试验,确定不同干预策略的最佳组合与疗效;深入探索MI-BCI促进大脑功能重组的内在机制,为实现个体化精准康复奠定理论基础;同时技术创新需聚焦于提高信号解码精度,开发更智能自适应反馈模式,推动MI-BCI在卒中康复中的临床转化与应用。

关键词 脑卒中;运动功能障碍;脑电图;运动想象;脑机接口;智能康复

引用格式:白玉龙. 基于脑电图的运动想象脑机接口训练在脑卒中康复领域的应用[J]. 康复学报, 2026, 36(2): 75-81, 86.

BAI Y L. Application of motor imagery brain-computer interface training based on electroencephalogram in stroke rehabilitation [J]. Rehabil Med, 2026, 36(2): 75-81, 86.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2026.02001

©《康复学报》编辑部, 开放获取CC BY-NC-ND 4.0协议

© Rehabilitation Medicine, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

脑卒中是全球第二大死亡原因,2023年导致约679万人死亡,作为高致残率疾病,严重影响患者生活质量,给家庭和社会带来沉重的经济和生活负担^[1]。传统康复手段如物理疗法、作业疗法等存在治疗周期长、神经可塑性激发不足等问题。脑机接口(brain-computer interface, BCI)作为一种新技术,通过直接建立大脑与外部设备之间的通信通路,绕过受损的神经肌肉通路,为脑卒中后运动功能障碍患者提供了一种全新的康复方式^[2]。BCI主要分为侵入式BCI与非侵入式BCI。侵入式BCI需通过手术将微电极阵列植入大脑皮层或深层神经组织,目前主要应用于基础研究,仅在少数严重运动功能障碍患者中进行试验性临床应用,尚未实现广泛临床推广^[3]。非侵入式BCI则通过放置在头皮表面的传感器来记录大脑活动。常见的非侵入式信号采集技术包括脑电图、功能性近红外光谱和脑磁图等技术。其中,基于脑电图(electroencephalogram, EEG)的BCI系统,因其无创性、操作简便性、成本相对较低以及高时间分辨率等优势,在临床康复领域获得较为广泛的研究和应用^[4]。在非侵入式EEG-BCI的众多范式中,运动想象(motor imagery, MI)范式因其独特的神经生理学基础和临床应用潜力,成为脑卒中康复领域广泛应用的模式之一。MI-BCI技术在脑卒中康复领域具有较大临床潜力,本研究旨在系统梳理和探讨MI-BCI在脑卒中后运动功能康复中的应用研究进展,为临床实践和科学研究提供参考。

1 MI-BCI概念

MI指患者不伴随实际肌肉收缩的心理模拟运动,它能激活与实际运动执行相似的大脑运动网络,包括初级运动皮层(primary motor cortex, M1)、辅助运动区、前运动皮层以及顶叶皮层等核心区域^[5-6]。在进行运动想象时,感觉运动皮层的 μ 节律(8~12 Hz)和 β 节律(13~30 Hz)会出现事件相关去同步(event-related desynchronization, ERD)现象,而在想象结束或放松状态下则表现为事件相关同步(event-related synchronization, ERS)现象。

基于EEG的MI-BCI系统通过实时采集头皮脑电图信号,结合先进的信号处理和机器学习算法,准确解码与运动意图相关的ERD/ERS模式^[7]。这些解码后的神经信号可实时转化为控制指令,驱动外部设备实现闭环反馈和主动康复训练。

2 MI-BCI在脑卒中上肢康复中的应用

上肢运动功能障碍是脑卒中后最常见的后遗症之一,约80%脑卒中患者存在不同程度的上肢运动功能损伤。由于上肢运动功能康复涉及精细、复杂的运动控制,其恢复过程面临长期挑战。MI-BCI通过实时解码患者的运动意图信号并触发外周效应器产生即时反馈,旨在强化“中枢-外周-中枢”神经环路的闭环干预系统。

2.1 MI-BCI的干预模式与效果

目前,MI-BCI上肢康复系统通常结合不同末端效应器[如康复机器人、功能性电刺激(functional electric stimulation, FES)、虚拟现实(virtual reality, VR)等],在运动想象过程中提供与意图相匹配的反馈,以增强神经可塑性和运动恢复效果。

既往的单中心临床研究已初步证实MI-BCI在脑卒中上肢康复中的积极作用。在与康复机器人结合方面,亚急性期和慢性期脑卒中患者均可从MI-BCI康复训练中获益,试验组Fugl-Meyer上肢运动功能评定量表(Fugl-Meyer Assessment of Upper Extremity Scale, FMA-UE)和上肢动作研究量表(Action Research Arm Test, ARAT)评分均明显高于常规康复组^[8-9]。陆蓉蓉等^[10]研究显示,与单纯VR反馈比较,MI-BCI结合腕关节机器人训练能提高运动诱发电位引出率,并增强偏瘫侧腕伸肌群表面肌电平均波幅,这提示,视觉反馈与本体觉反馈的协同作用在促进皮质脊髓束重塑方面具有独特优势。基于此,LU等^[11]进一步将视觉、听觉、触觉与本体感觉整合为多模态感觉反馈,用于治疗严重上肢功能障碍的慢性期脑卒中患者,该研究通过功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)与Granger因果分析发现,其疗效不局限于M1区的局部重组,而是依赖于默认模式网络、背侧/腹侧注意网络等高阶跨模态网络的激活与整合。上述结果表明,提供更丰富且接近自然运动体验的多感觉反馈,可能更有助于增强神经可塑性,促进运动恢复。

此外,有研究发现MI-BCI结合FES在改善缺血性脑卒中患者上肢运动功能方面优于单纯FES治疗^[12-14]。多中心大样本随机对照试验结果显示,在常规康复基础上增加MI-BCI(结合FES与VR)训练,脑卒中患者经4周干预后和3个月随访时FMA-UE评分均明显高于对照组,且安全性良好^[15]。这为MI-BCI在脑卒中早期康复的临床应用转化提供

有力的循证医学证据。

但目前研究多采用单中心设计,存在诸多局限性,如样本量较小、随访时间不足、不同末端效应器方案与训练强度等关键参数的系统比较研究仍缺乏。针对MI范式的脑机接口系统评价或Meta分析较少。以往有关BCI的Meta分析多将MI、稳态视觉诱发电位、P300等多种范式的研究合并分析^[16]。这些分析证实了BCI技术的整体有效性,但无法精准揭示MI这一特定范式的作用,也难以明确其临床应用中的最优参数。

2.2 MI-BCI联合非侵入性神经调控技术的协同效应

15%~30%脑卒中患者皮层兴奋性降低,MI相关脑电信号微弱不稳定,BCI解码精度较低,限制了MI-BCI康复效果和适用性。神经调控技术能够预先调节大脑皮层兴奋性,增强神经可塑性,为MI-BCI训练奠定基础。MI-BCI通过解码MI期间脑信号、构建实时闭环反馈,进一步强化神经调控诱导的大脑功能重组,形成“调控-解码-强化”的协同效应,提升康复效果。

2.2.1 经颅直流电刺激与MI-BCI的协同作用

经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)是一种通过在头皮施加低强度直流电流,改变皮层神经元的膜电位,进而调节皮层兴奋性的非侵入性神经调控技术。阳极tDCS通常能够增强靶区皮层的兴奋性,阴极tDCS则发挥抑制作用。tDCS通过预处理增强运动想象相关脑区的激活强度,MI-BCI训练通过多模态反馈(视觉、听觉、本体觉)强化神经环路重塑。WEI等^[17]对健康受试者的研究显示,与单纯MI-BCI训练比较,在MI-BCI训练前先进行15 min tDCS能诱导 μ 波(10~14 Hz)与 β 波(14~26 Hz)的ERD幅度增强,在特定算法下可使MI-BCI离线分类准确率提高8.53%。该研究明确tDCS的增效作用具有“频率特异性”和“算法依赖性”,提示临床转化需要匹配优化的信号处理策略。此外,ANG等^[18]研究结果显示,20 min tDCS能提高MI-BCI的在线准确率,联合组在线准确率(62.9%)高于假刺激组(57.0%)。tDCS虽然未额外提高脑卒中患者运动功能,但是能提高患者MI能力(ERD增强)和MI-BCI性能,帮助难以通过BCI筛查的患者参与康复训练。HONG等^[19]研究显示,MI-BCI联合tDCS可诱导慢性脑卒中患者脑可塑性改变,联合组患侧皮质脊髓束和双侧胼胝体的分数各向异性值

增加,患侧感觉运动区的脑血流灌注降低,这可能是由于皮质兴奋性增强,神经活动效率优化。此外,CHEW等^[20]研究发现BCI组和联合训练组FMA-UE评分均明显提升,但联合组患侧M1区的静息运动阈值明显降低。对于运动诱发电位不可记录的严重脑卒中患者,联合组FMA-UE评分明显改善,这提示临床应用需要根据脑卒中患者皮质脊髓束完整性分层设计治疗方案。对于损伤严重的脑卒中患者可以采用联合方案增加康复效果。

目前,tDCS与MI-BCI的联合应用仍处于探索阶段。现有研究普遍样本量较小,大多数随机对照试验(randomized controlled trials, RCTs)纳入样本量<20例,且tDCS参数(如电极放置位置、刺激强度与持续时间)存在明显异质性,统计效力有限,两者协同效应的结论仍存在一定争议。关于tDCS的Meta分析指出,BCI联合tDCS在改善FMA-UE评分方面,明显优于单独tDCS、常规康复及其他组合干预法^[21]。但是,有RCT研究表明,尽管MI-BCI联合tDCS在运动功能改善方面优于单独tDCS治疗,但其疗效未明显高于单独MI-BCI训练^[22]。这提示联合干预的效果并非简单的线性叠加,tDCS参数(强度与时长)、与MI-BCI训练的时序关系(作为预处理、同步刺激或训练后巩固)以及任务设计与注意负荷等因素均可能对最终疗效产生重要影响。未来研究需通过大样本、多中心RCT明确两者的最佳组合策略与作用机制。

2.2.2 经颅磁刺激与MI-BCI的联合应用

经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)是一种利用线圈产生短时强磁场脉冲,通过电磁感应诱发局部电流,以调节神经元兴奋性的非侵入性神经调控技术。根据其刺激频率、模式和靶点,TMS可发挥兴奋或抑制作用^[23]。TMS与MI-BCI的联合应用主要围绕单侧开环靶向调控、双侧开环平衡调控及闭环状态依赖调控3种策略。

2.2.2.1 单侧开环靶向调控

通常将刺激靶点置于患侧或健侧M1区,重建半球间的兴奋-抑制平衡,促进运动想象相关脑区的激活。在TMS与MI-BCI联合训练中,常见模式是先进行TMS刺激预处理,随后再进行MI-BCI训练^[24-28]。JOHNSON等^[24]采用低频rTMS干预3例慢性脑卒中患者健侧M1区,结果显示,联合干预阶段健侧至患侧的跨半球抑制明显减弱,患侧运动皮层激活增强,且BCI准确率从联合干预阶段到常规BCI训练阶段时提升了47.5%。

虽然该研究样本量较小,但可为rTMS通过重建半球间抑制平衡、增强MI-BCI效果提供初步证据。此外,有研究通过精准时机的TMS刺激与MI诱发的神经活动实现时间耦合,增强运动皮层激活。CHEN等^[25]在健康人MI任务的前2 s施加单脉冲经颅磁刺激,作用于MI对侧M1区,结果显示,与单纯MI-BCI训练比较,联合组训练后表现出明显 μ 频段事件相关去同步化增强,BCI识别率明显提高,双侧运动皮层局部功能连接也增强。JIA等^[26]对26例亚急性脑卒中患者的分层研究结果显示,患者对rTMS的反应存在个体差异,无皮层损伤者在接受患侧M1区高频rTMS刺激后,MI-BCI解码准确率和患侧感觉运动区激活水平均明显提高,而伴有皮层损伤的患者未表现出类似改善。脑卒中后神经重组模式及病灶部位是影响rTMS联合MI-BCI疗效的重要因素。对于无皮层损伤且呈患侧运动皮层激活的脑卒中患者,可采用患侧M1区高频rTMS以增强皮层兴奋性和BCI表现;而对于皮质损伤或以对侧代偿为主的脑卒中患者,则需进一步探索个体化的刺激策略。但该研究样本量有限,未对神经重组模式的动态变化及病灶大小、脑卒中病程等影响因素开展深入探索,也未明确皮层损伤患者适配的有效rTMS干预策略,这些均需后续研究完善。

2.2.2.2 双侧开环平衡调控 目前,关于双侧开环TMS控制的研究较少,现有研究多采用低频rTMS抑制健侧M1区,同时高频rTMS兴奋患侧M1区,发现可增强脑卒中患者 α 波ERD幅度,并改善运动与触觉功能^[29-30]。

2.2.2.3 闭环状态依赖调控 与开环TMS调控采用固定参数的方式比较,闭环调控通过实时采集MI-BCI训练中的脑电信号(如运动皮层 μ 、 β 频段的ERD)触发TMS,实现脑状态与刺激时机的精准匹配,诱导状态依赖的长时程增强(long-term potentiation, LTP)样突触可塑性,强化皮质脊髓兴奋性通路、感觉运动网络间的连接^[31-33]。GHARABAGHI等^[31]验证了MI-BCI联合TMS的闭环范式可行性,发现1例慢性脑卒中患者经过20次闭环TMS训练后,运动诱发电位可以引出,平均波幅也增大。KRAUS等^[32]进一步探索闭环TMS诱导可塑性的持久性,构建了由 β 频段ERD控制的闭环TMS系统,发现运动诱发电位(motor evoked potential, MEP)振幅的增加在刺激后和去增强任务后仍持续存在。在静息状态下,TMS对健康人运动皮层兴奋性的影

响与中央后回来源的 μ 节律(约10 Hz)瞬时相位相关^[34-35]。当100~200 Hz TMS三连脉冲精准锁定该节律的波谷相位时,可诱导MEP振幅在刺激后至少30 min内保持LTP样增强,增强新获得运动技能的记忆巩固^[36-37]。下一步研究可以在检测运动想象诱发的事件相关去同步化的基础上实时捕捉感觉运动节律的高兴奋性状态,并在相位窗口施加TMS强化刺激,更高效地激活皮质间连接,减少能量浪费,避免对抑制性通路的误激活。目前闭环TMS在运动功能康复领域的应用,仍以临床前研究和初步临床探索为主,缺乏多中心、RCT研究验证,尚未达到临床常规应用的标准。

3 MI-BCI在脑卒中下肢康复中的临床应用

脑卒中后下肢运动功能障碍是导致患者活动受限、平衡功能障碍、步态异常甚至跌倒的主要原因之一,严重影响患者的独立生活能力和生活质量。下肢运动皮层位置较深,位于中央旁小叶,导致EEG信号衰减严重、信噪比低,难以精确捕捉;且步态控制涉及多块肌肉和关节在步态周期内的协同调控,下肢运动时产生的肌电等生理伪迹干扰较强,使MI-BCI在下肢康复中的应用面临独特挑战^[38]。近年来随着技术发展,MI-BCI通过结合下肢康复机器人、踏车、FES等末端执行器,在改善脑卒中患者下肢运动功能、平衡及步态方面已有初步研究。

3.1 MI-BCI联合下肢康复机器人

康复机器人可为脑卒中患者提供躯干和下肢支撑,帮助患者完成下肢的屈伸、步行等动作。MI-BCI通过解码患者下肢运动意图,驱动机器人辅助患侧肢体完成特定运动,形成视觉、听觉和本体感觉多模态反馈,从而强化皮层运动通路。翟晓雪等^[39]开展了基于MI-BCI的足踝机器人RCT研究结果显示,与传统踝关节牵伸机器人训练比较,MI-BCI试验组踝关节背屈活动度、Fugl-Meyer下肢评定量表评分和平衡功能评分均明显改善,这表明聚焦足踝部位的MI-BCI训练能改善脑卒中患者足下垂。有研究结果显示,MI-BCI集成下肢步行机器人模拟步行训练可以激活亚急性期患者的运动皮层下肢功能区,且临床疗效与BCI准确率及Cz通道 β 波ERD变化呈明显相关,这为MI-BCI促进神经可塑性提供了电生理学证据^[40-41]。

3.2 MI-BCI联合踏车

有研究使用基于前额叶单通道脑电的注意力指数实时调控蹬车速度的BCI训练,发现能同时改善患者的平衡功能与注意力,且二者改善程度呈正相关,为认知与运动功能的协同康复提供证据^[42-43]。此类研究主要采集前额叶皮层的EEG信号,虽操作简便且实时性强,但未对MI相关神经信号进行有效分离与解码,系统可能受非运动认知活动干扰,从而削弱BCI训练的靶向性与机制解释能力。未来可以引入多通道EEG采集结合源分离与空域滤波算法以纯化MI特征信号,提升BCI系统的任务特异性。

3.3 MI-BCI联合FES训练

MI-BCI结合FES训练通过解码患者的下肢运动想象意图,并将其转化为对患侧目标肌肉的电刺激,从而诱发被动运动。在刺激靶点方面,现有研究主要聚焦在与踝关节背屈相关的胫骨前肌上,这是改善足下垂和实现摆动相廓清的关键肌。有研究也纳入股四头肌,在FES与机器人协同下实现膝关节伸展^[44]。LUO^[45]研究发现,通过解码急性期脑卒中患者足背屈、足内翻和膝伸展等运动想象意图,触发相应下肢肌肉电刺激,可改善FMA-LE与MBI评分,这提示在脑卒中早期引入BCI-FES干预,能够有效地促进下肢运动功能、步行能力及日常生活活动能力恢复。有研究发现,通过MI-BCI触发FES刺激胫骨前肌,可改善慢性期脑卒中患者步行速度、步频和健侧步长,但在平衡功能的疗效上还有争议^[46-47]。BCI通过EEG捕捉运动意图触发FES,实现上下运动神经元同步激活,而常规FES仅能刺激下运动神经元,缺乏高阶认知参与,在促进皮层神经重塑方面效果较弱。

当前研究存在样本量较少、部分研究未采用假刺激对照排除安慰剂效应,结果的普适性有限。此外,对于MI-BCI促进神经可塑性机制的直接证据仍显薄弱。目前的研究结论多基于功能评定量表的改善和步态参数的变化进行间接推断,缺乏直接证实大脑结构与功能重组的神经影像学或神经生理学证据,这限制了从机制层面深入理解MI-BCI-FES如何重塑受损的神经环路。

MI-BCI技术在下肢康复中的应用仍面临2个问题:①下肢MI信号特征弱。下肢MI诱发的 μ/β -ERD幅值常低于上肢,在线解码准确率多为55%~70%,难以满足实时控制外骨骼或FES的需求。②BCI盲现象,限制了技术的普适性。研究表明,联

合干预、多肢体协同或“感觉增强”设计新型范式,可以提升临床适用性。部分研究采用tDCS预先调节运动皮层兴奋性的方法,发现可以增强训练过程中 μ 节律的ERD现象,但因为是单病例研究,缺乏随机对照试验证据,尚不能得出该干预方法优于常规BCI训练的结论^[48]。有研究基于丰富的感觉输入能强化运动中中枢激活的原理,设计视觉-时空触觉同步刺激范式,在视觉上引导足部着地想象,同时按“足跟-足中-前足外侧-前足内侧”时序振动的触觉马达模拟行走中的足底压力变化,结果显示,解码准确率可明显提升12.52%^[38,49]。多感觉同步刺激可提升MI沉浸感,为BCI干预提供新思路。但是,目前相关研究主要局限于健康人群,尚缺乏针对脑卒中后运动功能障碍患者的临床验证。

4 小结

基于脑电图的MI-BCI为脑卒中后运动功能康复提供了新途径。MI-BCI与不同末端效应器以及神经调控技术的协同作用,已在脑卒中患者上肢和下肢康复中展现出良好前景。但是,MI-BCI技术的广泛临床应用仍面临多重挑战。当前研究样本量普遍较小且为单中心设计,证据等级较低;MI-BCI系统的关键参数(如训练强度、干预时间、反馈模式等)尚未标准化;对于其诱导神经可塑性的深层机制,仍缺乏基于神经影像学与神经生理学的直接证据。此外,BCI盲现象及下肢解码准确率较低等问题也限制了技术的普适性。未来研究应致力于开展大样本、多中心的RCTs,以确定不同干预策略的最佳组合与疗效;需深入探索MI-BCI促进大脑功能重组的内在机制,为实现个体化精准康复奠定理论基础;同时技术创新需聚焦于提高信号解码精度,开发更智能自适应反馈模式。通过跨学科合作,共同推动MI-BCI技术从实验室走向临床,充分发挥MI-BCI技术在神经系统疾病康复中的潜力,改善脑卒中患者的生活质量和社会参与度。

参考文献

- [1] GBD 2023 Causes of Death Collaborators. Global burden of 292 causes of death in 204 countries and territories and 660 subnational locations, 1990–2023: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2023 [J]. *Lancet*, 2025, 406 (10513): 1811–1872.
- [2] EDELMAN B J, ZHANG S L, SCHALK G, et al. Non-invasive brain-computer interfaces: state of the art and trends [J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2025, 18:26–49.

- [3] LORACH H, GALVEZ A, SPAGNOLO V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface [J]. *Nature*, 2023, 618(7963):126-133.
- [4] LIU X Y, WANG W L, LIU M, et al. Recent applications of EEG-based brain-computer-interface in the medical field [J]. *Mil Med Res*, 2025, 12(1):14.
- [5] TANAMACHI K, KUWAHARA W, OKAWADA M, et al. Relationship between resting-state functional connectivity and change in motor function after motor imagery intervention in patients with stroke:a scoping review [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 20(1):159.
- [6] SHARMA N, SIMMONS L H, JONES P S, et al. Motor imagery after subcortical stroke: a functional magnetic resonance imaging study [J]. *Stroke*, 2009, 40(4):1315-1324.
- [7] YADAV H, MAINI S. Decoding brain signals: a comprehensive review of EEG-based BCI paradigms, signal processing and applications [J]. *Comput Biol Med*, 2025, 196(Pt C):110937.
- [8] MA Z Z, WU J J, CAO Z, et al. Motor imagery-based brain-computer interface rehabilitation programs enhance upper extremity performance and cortical activation in stroke patients [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1):91.
- [9] JI X, LU X, XU Y, et al. Effects and neural mechanisms of a brain-computer interface-controlled soft robotic glove on upper limb function in patients with subacute stroke: a randomized controlled fNIRS study [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2025, 22(1):171.
- [10] 陆蓉蓉, 高天昊, 胡义茜, 等. 基于运动想象的脑机接口系统联合不同末端效应器对慢性期脑卒中患者上肢运动功能改善的初步研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(8):1104-1110.
- LU R R, GAO T H, HU Y Q, et al. Improving upper limb motor function in chronic stroke patients using a brain-computer interface system based on motor imagery combined with different end effectors: a preliminary study [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2024, 39(8):1104-1110.
- [11] LU R R, PANG Z, GAO T H, et al. Multisensory BCI promotes motor recovery via high-order network-mediated interhemispheric integration in chronic stroke [J]. *BMC Med*, 2025, 23(1):380.
- [12] 侯思言, 汪丽丽, 王春方. 基于运动想象的脑机接口训练改善脑卒中患者上肢及脑功能的研究[J]. *中国康复*, 2024, 39(11):643-648.
- HOU S Y, WANG L L, WANG C F. Improvement of upper limb and brain function in stroke patients through motor imagery-brain computer interface training [J]. *Chin J Rehabil*, 2024, 39(11):643-648.
- [13] BRUNNER I, LUNDQUIST C B, PEDERSEN A R, et al. Brain computer interface training with motor imagery and functional electrical stimulation for patients with severe upper limb paresis after stroke: a randomized controlled pilot trial [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1):10.
- [14] LIU X L, ZHANG W D, LI W B, et al. Effects of motor imagery based brain-computer interface on upper limb function and attention in stroke patients with hemiplegia: a randomized controlled trial [J]. *BMC Neurol*, 2023, 23(1):136.
- [15] WANG A X, TIAN X, JIANG D, et al. Rehabilitation with brain-computer interface and upper limb motor function in ischemic stroke: a randomized controlled trial [J]. *Med*, 2024, 5(6):559-569. e4.
- [16] LI D, LI R Y, SONG Y P, et al. Effects of brain-computer interface based training on post-stroke upper-limb rehabilitation: a meta-analysis [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2025, 22(1):44.
- [17] WEI P F, HE W, ZHOU Y, et al. Performance of motor imagery brain-computer interface based on anodal transcranial direct current stimulation modulation [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2013, 21(3):404-415.
- [18] ANG K K, GUAN C T, PHUA K S, et al. Facilitating effects of transcranial direct current stimulation on motor imagery brain-computer interface with robotic feedback for stroke rehabilitation [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2015, 96(3 Suppl):S79-S87.
- [19] HONG X, LU Z K, TEH I, et al. Brain plasticity following MI-BCI training combined with tDCS in a randomized trial in chronic subcortical stroke subjects: a preliminary study [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1):9222.
- [20] CHEW E, TEO W P, TANG N, et al. Using transcranial direct current stimulation to augment the effect of motor imagery-assisted brain-computer interface training in chronic stroke patients-cortical reorganization considerations [J]. *Front Neurol*, 2020, 11:948.
- [21] ZHENG K Q, GUO L, LIANG W D, et al. Comparison of the effects of transcranial direct current stimulation combined with different rehabilitation interventions on motor function in people suffering from stroke-related symptoms: a systematic review and network meta-analysis [J]. *Front Neurol*, 2025, 16:1586685.
- [22] ZHANG M, WU Y, JIA F, et al. Efficacy of kinesthetic motor imagery based brain computer interface combined with tDCS on upper limb function in subacute stroke [J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1):11829.
- [23] BAI Z F, ZHANG J Q, FONG K N K. Effects of transcranial magnetic stimulation in modulating cortical excitability in patients with stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19(1):24.
- [24] JOHNSON N N, CAREY J, EDELMAN B J, et al. Combined rTMS and virtual reality brain-computer interface training for motor recovery after stroke [J]. *J Neural Eng*, 2018, 15(1):016009.
- [25] CHEN X L, LI T Q, LIU D M, et al. Using transcranial magnetic stimulation to improve motor cortical excitability during motor imagery [J]. *IEEE Sens J*, 2024, 24(10):16943-16952.
- [26] JIA T Y, MO L H, MCGEADY C, et al. Cortical activation patterns determine effectiveness of rTMS-induced motor imagery decoding enhancement in stroke patients [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2025, 72(3):1200-1208.
- [27] 甄婷婷, 胡顺庭, 王争, 等. 低频重复经颅磁刺激联合脑机接口康复机器人对脑卒中患者上肢运动功能障碍的影响[J]. *天津医药*, 2025, 53(9):957-962.
- ZHEN T T, HU S T, WANG Z, et al. Influence of low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation combined with brain-

- computer interface rehabilitation robot on stroke patients with upper limb motor dysfunction [J]. *Tianjin Med J*, 2025, 53(9): 957-962.
- [28] SHU X K, CHEN S G, CHAI G H, et al. Neural modulation by repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) for BCI enhancement in stroke patients [C]//2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Honolulu, HI, USA. IEEE, 2018:2272-2275.
- [29] AFONSO M, SÁNCHEZ-CUESTA F, GONZÁLEZ-ZAMORANO Y, et al. Investigating the synergistic neuromodulation effect of bilateral rTMS and VR brain-computer interfaces training in chronic stroke patients [J]. *J Neural Eng*, 2024, 21(5):056012.
- [30] SÁNCHEZ CUESTA F J, GONZÁLEZ-ZAMORANO Y, MORENO-VERDÚ M, et al. Effects of motor imagery-based neurofeedback training after bilateral repetitive transcranial magnetic stimulation on post-stroke upper limb motor function: an exploratory crossover clinical trial [J]. *J Rehabil Med*, 2024, 56:18253.
- [31] GHARABAGHI A, KRAUS D, LEÃO M T, et al. Coupling brain-machine interfaces with cortical stimulation for brain-state dependent stimulation: enhancing motor cortex excitability for neurorehabilitation [J]. *Front Hum Neurosci*, 2014, 8:122.
- [32] KRAUS D, NAROS G, BAUER R, et al. Brain state-dependent transcranial magnetic closed-loop stimulation controlled by sensorimotor desynchronization induces robust increase of corticospinal excitability [J]. *Brain Stimul*, 2016, 9(3):415-424.
- [33] WANG H M, ZHENG H X, WU H R, et al. Behavior-dependent corticocortical contributions to imagined grasping: a BCI-triggered TMS study [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2023, 31:519-529.
- [34] ZRENNER C, ZIEMANN U. Closed-loop brain stimulation [J]. *Biol Psychiatry*, 2024, 95(6):545-552.
- [35] CHEN H, LIU T, SONG Y L, et al. State-dependent transcranial magnetic stimulation synchronized with electroencephalography: mechanisms, applications, and future directions [J]. *Brain Sci*, 2025, 15(7):731.
- [36] HOUGLAND J R, KIRCHHOFF M, VETTER D E, et al. Fluctuations in the optimal sensorimotor mu-rhythm phase associated with high corticospinal excitability during TMS-EEG [J]. *Brain Stimul*, 2025, 18(6):1843-1851.
- [37] HUSSAIN S J, VOLLMER M K, STIMELY J, et al. Phase-dependent offline enhancement of human motor memory [J]. *Brain Stimul*, 2021, 14(4):873-883.
- [38] WANG W Z, SHI B, WANG D, et al. Enhanced lower-limb motor imagery by kinesthetic illusion [J]. *Front Neurosci*, 2023, 17:1077479.
- [39] 翟晓雪, 曹莹瑜, 郝泽轩, 等. 基于运动想象足踝脑机接口治疗对脑卒中患者下肢运动功能和平衡能力的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2025, 40(6):822-829.
- ZHAI X X, CAO Y Y, HAO Z X, et al. The effect of foot ankle brain-computer interface therapy based on motor imagery on lower limb motor and balance function in stroke patients [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2025, 40(6):822-829.
- [40] 韩诗雨, 赵国顺, 彭小柯, 等. 脑机接口外骨骼对卒中患者下肢康复疗效及皮层激活探究[J]. *中国康复医学杂志*, 2025, 40(6):830-840.
- HAN S Y, ZHAO G S, PENG X K, et al. Effects of brain-computer interface exoskeleton on lower limb rehabilitation and exploration of cortical activation in patients with stroke [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2025, 40(6):830-840.
- [41] 唐欢, 苏彬, 车培, 等. 脑机接口联合末端驱动型下肢机器人对脑卒中患者平衡及步行功能的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(6):791-797.
- TANG H, SU B, CHE P, et al. Effects of a brain-computer interface combined with an end-driven lower limb robot on the balance and walking function in stroke patients [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2024, 39(6):791-797.
- [42] YUAN Z W, PENG Y, WANG L S, et al. Effect of BCI-controlled pedaling training system with multiple modalities of feedback on motor and cognitive function rehabilitation of early subacute stroke patients [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2021, 29:2569-2577.
- [43] WAN C L, ZHANG Q Y, QIU Y, et al. Effects of dual-task mode brain-computer interface based on motor imagery and virtual reality on balance and attention in patients with stroke: a randomized controlled pilot trial [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2025, 22(1):187.
- [44] LEERSKOV K S, SPAICH E G, JOCHUMSEN M R, et al. Design and demonstration of a hybrid FES-BCI-based robotic neurorehabilitation system for lower limbs [J]. *Sensors*, 2025, 25(15):4571.
- [45] LUO X. Effects of motor imagery-based brain-computer interface-controlled electrical stimulation on lower limb function in hemiplegic patients in the acute phase of stroke: a randomized controlled study [J]. *Front Neurol*, 2024, 15:1394424.
- [46] SIEGHARTSLEITNER S, SEBASTIÁN-ROMAGOSA M, CHO W, et al. Upper extremity training followed by lower extremity training with a brain-computer interface rehabilitation system [J]. *Front Neurosci*, 2024, 18:1346607.
- [47] CHUNG E, LEE B H, HWANG S. Therapeutic effects of brain-computer interface-controlled functional electrical stimulation training on balance and gait performance for stroke: a pilot randomized controlled trial [J]. *Medicine*, 2020, 99(51):e22612.
- [48] LIMA J P S, SILVA L A, DELISLE-RODRIGUEZ D, et al. Unraveling transformative effects after tDCS and BCI intervention in chronic post-stroke patient rehabilitation—an alternative treatment design study [J]. *Sensors*, 2023, 23(23):9302.
- [49] YIN S, YUE Z, QU H, et al. Enhancing lower-limb motor imagery using a paradigm with visual and spatiotemporal tactile synchronized stimulation [J]. *J Neural Eng*, 2025, 22(2):026030.

(下转第86页)