

脑卒中后功能障碍基于运动想象 脑机接口应用处方研究

姜山杉^{1,2}, 邱芷晴^{1,2}, 尤婷婷³, 付欣瑜^{1,2}, 陈冠州^{1,2}, 李昊达^{1,2}, 梁柏源^{1,2}, 于佳妮⁴, 欧海宁^{4*}

1 广州医科大学附属第五医院, 广东 广州 510700;

2 广州医科大学第五临床学院, 广东 广州 510700;

3 湖南医药学院第一附属医院, 湖南 怀化 422001;

4 广州中医药大学第二附属医院, 广东 广州 510120

* 通信作者: 欧海宁, E-mail: Haining@gzucm.edu.cn

收稿日期: 2024-11-26; 接受日期: 2025-01-11

基金项目: 广东省普通高校重点领域专项(2021ZDZX2063); 广东省中医院中医康复人才培养项目(01020184);

广东省中医院国家自然科学基金培育项目(E57977)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2025.02015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



摘要 脑机接口(BCI)是一种不依赖于外周神经肌肉系统,组成大脑输出通路的对外交互控制系统,近年来在神经康复领域备受关注。基于运动想象的脑机接口(MI-BCI)在脑卒中后运动功能障碍、认知功能障碍、吞咽功能障碍康复中具有良好疗效。但是,由于缺乏MI-BCI针对脑卒中后功能障碍康复的确切应用处方,极大地限制了其治疗效果和应用推广。本研究综述MI-BCI在脑卒中后上肢/下肢运动功能障碍、认知功能障碍和吞咽功能障碍中的应用处方,重点探讨了治疗频率、疗程、单次治疗时间等因素对康复效果的影响;并分析提高MI-BCI疗效的非侵入性干预因素(如视/听觉反馈、本体感受和触觉反馈、虚拟现实反馈以及非侵入性脑刺激技术)。MI-BCI在脑卒中康复中治疗处方的关键参数设定(如治疗频率、总疗程、单次治疗时间)与增效手段的标准化等还不统一,也存在一些技术瓶颈,应通过优化应用处方,解决MI-BCI系统的疗效差异问题,提高MI-BCI治疗体系的规范化和稳定性,为MI-BCI在脑卒中康复领域的应用提供参考。

关键词 脑卒中;功能障碍;神经康复;脑机接口;运动想象;应用处方

脑机接口(brain-computer interface, BCI)通过采集信号、提取特征、分类解码大脑的意图,再经由外部设备输出,实现中枢神经系统与外部设备的直接交互,已成为近年来医学领域研究及临床转化的热点^[1]。在典型的BCI范式中,基于运动想象BCI(motor image-based brain-computer interface, MI-BCI)是一种重要的范式,在功能障碍患者的康复治疗中展现出较好的应用价值。运动想象(motor imagery, MI)是指人在脑海中想象一个动作过程或观察一个动作过程,而不产生实际的运动输出,此过程能够激活类似于实际运动的感觉运动区域^[2]。将

MI与BCI技术相结合,既解决了康复治疗中患者主动意识的引入和参与不充分的问题,又补足了MI治疗缺乏的实时感觉反馈,在临床应用中展现了巨大潜力^[3]。借由这种双向互动的治疗方法,MI-BCI系统已逐渐被应用于神经康复领域中^[4]。

脑卒中是一种由于脑部血管突发破裂或阻塞导致血液不能流入大脑而引发脑组织损伤的疾病,已成为我国致死率第一的疾病^[5]。脑卒中后会造成诸多功能障碍,常见有肢体运动功能、认知功能以及吞咽功能障碍。MI-BCI作为一种中枢神经系统与外部机器设备交互的技术,已作为重要的治疗方

引用格式: 姜山杉, 邱芷晴, 尤婷婷, 等. 脑卒中后功能障碍基于运动想象脑机接口应用处方研究[J]. 康复学报, 2025, 35(2): 212-220.

JIANG S S, QIU Z Q, YOU T T, et al. Application prescription of brain-computer interface based on motor imagery in post-stroke dysfunction [J]. Rehabil Med, 2025, 35(2): 212-220.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2025.02015

©《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

法应用于脑卒中后各项功能障碍的康复。然而,MI-BCI在临床应用时缺少科学的治疗处方指导,严重降低了BCI系统的可靠性,成为MI-BCI发展面临的重要挑战之一。由于脑卒中患者脑组织损伤程度、病程进展各不相同,如何合理、准确地设置MI-BCI的处方参数成为临床工作者需重点关注的课题^[6]。BCI治疗处方包含治疗频率、疗程、单次治疗时间等基本要素,还包括增强治疗效果的影响因素^[4]。选择合适的MI-BCI治疗处方,对于制订MI-BCI康复计划至关重要。本研究对MI-BCI在脑卒中中的临床治疗方案进行了总结,归纳MI-BCI在脑卒中后上/下肢运动功能、认知功能以及吞咽功能障碍中的治疗频率、总治疗时程、单次治疗时长等应用处方,并探讨增强MI-BCI效果的干预因素(视/听觉反馈、本体感受和触觉反馈、虚拟现实以及非侵入性脑刺激),以期MI-BCI在临床康复中的应用提供参考。

1 脑卒中后功能障碍的MI-BCI治疗处方

1.1 脑卒中后上肢运动功能障碍的MI-BCI治疗处方

1.1.1 MI-BCI治疗频率、总治疗时程 研究表明,主动、重复、长期的强化功能活动对于神经重塑和运动功能恢复十分重要^[7]。较少有文献深入研究MI-BCI应用于脑卒中患者的总治疗时程与频率。大部分的临床试验将MI-BCI的治疗频率设置为3~7次/周^[8-9],本研究认为治疗频率<3次/周的干预属于低频率,而 ≥ 5 次/周的干预则属于高频率。在MI-BCI高频治疗的研究中发现,在常规治疗基础上增加2~4周MI-BCI治疗,脑卒中患者Fugl-Meyer上肢运动功能评定量表(Fugl-Meyer Assessment Upper Extremity Scale, FMA-UE)、手臂动作调查测试(Action Research Arm Test, ARAT)和改良Barthel指数(Modified Barthel Index, MBI)评分均明显提高,且未见患者产生明显疲劳或厌恶情绪^[8-9]。关于BCI的频率效应,LIN等^[10]研究显示,高频BCI组(1次/d,连续干预10 d)大脑皮层活化程度、BCI表现均明显高于低频BCI组(隔天干预1次),提示BCI的治疗效果或许具有累积作用,1次/d,连续干预5 d或许是MI-BCI在健康受试者中唤起大脑皮层激活调节的最小有效剂量。低频率MI-BCI(每周3次)长期康复治疗,脑卒中患者也能从中获益^[9]。VÁRKUTI等^[11]研究发现,MI-BCI组脑卒中后上肢功能障碍患

者(肩肘机器人康复范式治疗,3次/周,共治疗12次)治疗4周后FMA-UE评分明显高于单纯BCI组。值得注意的是,低频率MI-BCI干预通常需要持续至少1个月,长期BCI干预治疗才可有效改善脑卒中后上肢运动功能。超过60%脑卒中患者在MI-BCI治疗4周后运动功能明显改善^[12]。

综上,高频率MI-BCI干预治疗可以在较短时间内使脑卒中患者上肢运动功能得到改善,而频率较低的MI-BCI干预治疗通常需要患者更长时间的坚持。目前,尚缺乏针对脑卒中患者不同运动功能状态下MI-BCI治疗频率对运动功能恢复有效性的研究。建议脑卒中后高运动功能患者(FMA-UE ≥ 40 分)在低频率MI-BCI治疗下至少持续治疗2周,而低运动功能患者(FMA-UE<40分)在高频率MI-BCI治疗下至少持续治疗4周^[13]。治疗频率的设定需要考虑患者的接受程度,在患者可接受范围内尽可能进行治疗,尽快恢复患者的运动功能。下一步研究还需要探讨不同运动功能状态下MI-BCI治疗频率对运动功能恢复及相关神经可塑性改变的影响;根据患者的具体情况,制订更加个性化的MI-BCI治疗方案,增加客观评估指标,评估不同治疗频率和时程对脑卒中患者运动功能恢复的长期效果。

1.1.2 MI-BCI单次治疗时间对上肢运动功能的影响 对于MI-BCI技术在临床应用时单次治疗时间设置尚无统一的标准。MI-BCI的单次治疗时间设置10~90 min,但大多数研究和临床实践治疗时间为30~40 min^[7-8]。这表明在临床实际应用过程中,治疗时间选择具有一定的灵活性。研究者倾向于选择较短治疗时间以避免患者疲劳,过长的治疗时间可能会引起患者疲劳和情绪变化,进而影响康复效果。但是,一味缩短治疗时间将会减少患者的获益。因此,如何选择MI-BCI单次治疗时间可能影响脑卒中患者的最终康复效果。FOONG等^[14]研究发现,脑电图的 β 频段功率与BCI表现呈正相关关系,表明神经疲劳可能会导致BCI性能下降,这进一步支持治疗时间控制在一定范围内的重要性。有关于MI的Meta分析总结了144项MI试验,发现进行MI训练的受试者平均每周进行MI练习3次,每次持续17 min(不超过20 min)^[15],可能是为了避免长时间MI导致的疲劳,同时也保证治疗的连续性和效果。

为探讨精神疲劳影响MI表现,LI等^[16]通过解码MI脑电图信息发现长时间MI导致的精神疲劳会降

低意图解码识别率,并且精神疲劳会导致 θ 频段能量降低,研究人员建议将MI训练次数设置在100~150次,持续时间应控制在30 min内。部分MI-BCI治疗时间在30 min以内的研究发现,经过规范治疗后患者运动功能明显改善。FROLOV等^[17]研究发现,在常规康复治疗基础上每天增加30 min MI-BCI外骨骼治疗,可有效提高脑卒中患者FMA-UE和ARAT评分。MI-BCI引起的精神疲劳问题,还与选择的MI范式存在一定关系。过于单一、简单的范式将增加受试者的疲劳感和厌烦情绪。为了克服这一问题,可以结合其他技术手段减少MI-BCI引起的精神疲劳,这既可避免因范式单一而造成的限制,又可延长MI-BCI单次治疗的有效时间。VOURVOPOULOS等^[18]运用一款基于虚拟现实(virtual reality, VR)技术的BCI装置为慢性脑卒中患者进行单次90 min治疗,这项训练为脑卒中患者带来更多乐趣且未出现因疲劳而中断治疗的情况。

综上所述,MI治疗的时间会影响参与者的MI表现,神经疲劳会导致BCI性能下降。因此,MI-BCI技术在临床应用时,单次治疗时间的设置应综合考虑患者的疲劳阈值、治疗的连续性和效果,以及神经疲劳对BCI表现的影响。在MI-BCI的实际应用中,建议选择的治疗时间为30~40 min,MI训练次数维持在100~150次,或是结合其他手段尽可能使参与者产生较小的神经疲劳,避免过长时间的治疗以减少患者的疲劳和情绪变化。下一步研究需要注意MI与运动功能恢复规律相结合。关于精细MI解码研究逐渐受到关注与重视,主要涉及肘、腕、指等关节的精细MI任务。有研究显示,患者在执行手部精细运动时,躯体运动区仍出现了明显的激活现象,且不同的手部精细运动存在一定差异性^[19]。基于精细运动的BCI技术已在解码阶段获得了阶段性的成果,但在临床应用较少,缺乏关于精细运动功能客观、详细的评估手段,脑卒中患者精细运动恢复的神经作用机制尚不清楚,这限制了针对性MI-BCI干预的发展。目前,脑卒中后上肢运动功能与相应皮质反应的研究主要强调粗大运动任务,对涉及手灵巧性和多种双手协调的活动(尤其是在高功能患者)关注不足。在设计MI-BCI治疗方案时,应考虑到不同运动功能的恢复速度和复杂性,为粗大运动和精细运动设置不同的治疗强度和治疗时间。

1.2 脑卒中后下肢运动功能障碍的MI-BCI治疗处方

脑卒中患者中枢神经系统中负责运动控制和协调的区域受到损伤,影响了下肢肌肉的力量和协调性^[20]。这导致了下肢运动功能障碍,限制患者的行走能力,主要表现为步态异常、行走距离缩短、步行速度和平衡能力下降^[21]。因此,卒中后尽快恢复下肢运动功能对患者的身体独立和融入社会至关重要。YUAN等^[22]研究显示,MI-BCI控制的踏板训练(2次/d、持续2周,累计24次)干预后Fugl-Meyer下肢运动功能评定量表(Fugl-Meyer Assessment Lower Extremity Scale, FMA-LE)评分明显提高,表明MI-BCI技术在脑卒中后下肢康复中具有良好效果。SEBASTIÁN-ROMAGOSA等^[23]研究显示,MI-BCI干预方案(3次/周,累计25次)可有效改善脑卒中后步态功能障碍患者步行速度、下肢活动范围和肌肉收缩力量。LIMA等^[24]研究显示,1例出血性脑卒中后偏瘫患者接受MI-BCI(20 min/次,5次/周)联合VR电动踏板执行器的蹬踏训练,同时增加以初级运动皮层(primary motor cortex, M1)为靶点的经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS),干预3周后10分钟步行测试(10-minute walking test, 10MWT)每分钟步数明显减少,患肢运动功能、协调性均明显提高,可能与“闭环反馈(BCI)+神经调控(tDCS)”双模态协同机制有关。

与上肢比较,使用BCI辅助下肢运动功能康复的研究还远远不够。但MI-BCI用于提高下肢运动功能是可行的,且较传统干预手段更为有效。MI-BCI改善下肢运动功能通常需要经过长时间、重复多次的治疗,这可能是由于大脑皮层中支配下肢运动功能的区域面积较小,一旦受损周围脑组织进行功能代偿有限;下肢运动功能涉及多个肌肉运动的精确协调,恢复难度较大,这使得下肢运动功能恢复较上肢更加困难。但YUAN等^[22]研究显示,集中多次、高频率(2次/d)的下肢BCI康复训练可以在较短的周期内提高患者运动功能。

1.3 脑卒中后认知功能障碍的MI-BCI治疗处方

有研究表明,MI-BCI可能增强与衰老效应相关的认知功能(如视觉空间、语言、记忆和智力等)^[25]。许多慢性脑卒中患者存在认知缺陷,包括注意力减少、长期和短期记忆受损、执行功能恶化、信息处理速度减慢等^[26]。BCI训练系统通过强化神经反馈效率和任务参与度展现出独特价值^[27]。短期的MI训

练要求持续聚焦MI以触发反馈,构成注意力训练闭环^[28]。刘明月等^[8]研究发现,常规康复训练联合MI-BCI训练(20 min/次,5次/周,持续3周)可改善脑卒中患者注意力网络测试(Attention Network Test, ANT)、符号数字模态测试(Symbolic Digital Modal Testing, SDMT)评分。YUAN等^[22]通过Fp1导联的脑电图(electroencephalogram, EEG)定量分析发现,高频MI-BCI下肢训练能有效改善患者注意力和认知功能。但是,有研究表明MI-BCI在改善卒中后视空间、工作记忆能力方面效果欠佳,SE-BASTIÁN-ROMAGOSA等^[23]研究显示,MI-BCI治疗3个月后脑卒中上肢偏瘫患者记忆功能、思维评分或自我报告问卷评分差异均无统计学意义。

综上所述,MI-BCI技术在脑卒中后认知功能(尤其是注意力)恢复中具有较好的潜能,但下一步研究还需探讨最佳的治疗频率、治疗时间以及MI-BCI技术对视空间和工作记忆等其他认知功能的影响。目前,MI-BCI在脑卒中后认知功能的康复应用尚处于起步阶段,相关研究还较少。这可能是由于在大多数基于BCI的干预措施中,都要求患者具备一定程度的认知功能,以便理解和坚持康复范式,一些严重认知功能障碍的患者往往被排除在外。但可以肯定的是,MI-BCI训练可以有效改善脑卒中患者注意力,但对其他认知子领域(如记忆力、语言和视觉空间能力等)的影响暂未得到验证。因此,未来MI-BCI研究应聚焦于开发更多基于认知脑区的BCI技术,并探索多模态BCI治疗的潜力,以提高脑卒中后患者认知功能的全面康复。

1.4 脑卒中后吞咽功能的MI-BCI治疗处方

脑卒中后吞咽功能障碍是指因吞咽运动区及其与脑干的连接受损而导致吞咽困难或无法吞咽的一种功能障碍,影响约76%的急性脑卒中患者^[29]。MI-BCI技术治疗脑卒中后吞咽功能障碍处于刚起步的阶段。YANG等^[30]基于吞咽运动意象(motor imagery of swallow, MI-SW)和舌部运动意象(motor imagery of tongue movements, MI-TM)检测技术探讨了脑卒中后吞咽困难BCI康复的实例和未来发展方向。KOBBER等^[31]基于近红外光谱成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)观察脑卒中后吞咽障碍患者在MI-SW过程中的大脑血流动力学变化,4例患者30 min内完成数次持续15 s的想象吞咽动作,结果显示,MI-SW使脑卒中患者较健康人表现出更强的额下回激活,这提示MI-SW

可以激活脑卒中后吞咽功能障碍患者的相关脑区,为MI-BCI应用于吞咽功能障碍的治疗提供了新的方向。SZYNKIEWICZ等^[32]纳入6例健康老年女性,给予6周基于MI-TM的舌头抗阻训练,结果显示,基于MI-TM的舌头训练可提高有吞咽困难风险健康个体的舌头强度。但目前只有少数研究进行临床MI-SW应用,可能与以下原因有关:① 吞咽是一个涉及口腔、咽、食管3个阶段的复杂过程,需要中枢神经系统、运动规划与控制、注意力等方面的整合,受试者尤其是对于吞咽困难的患者很难想象这样一个复杂的过程。② MI-SW采集较为困难,在实际应用中如何准确地捕捉和解析大脑的吞咽运动意图仍然是一个挑战,如何将这种意图转化为有效的控制信号也需要进一步研究^[33]。③ 脑卒中后吞咽功能障碍程度与颅内病变位置相关,个体差异性较大,导致个体间解码的差异也较大,这将影响MI-SW、MI-TM采集、解码以及分析。若要将MI-SW技术从实验室带到临床治疗以及家庭护理中,未来研究还应建立可靠的解码方法,进行大样本的临床研究,并探讨非侵入式中枢神经调控刺激技术、口腔运动训练、行为疗法与MI-SW联合干预脑卒中后吞咽功能障碍的效果。

2 增强MI-BCI治疗疗效的非侵入性干预因素

2.1 非侵入性脑刺激

2.1.1 经颅直流电刺激 非侵入性脑刺激(non-invasive brain stimulation, NIBS)是影响MI-BCI疗效的外部因素之一。运动或者运动准备过程中Mu和 β 节律运动不断减弱,这种减弱被标记为事件相关去同步(event-related desynchronization, ERD)。ERD是MI-BCI的基础,Mu ERD振幅与运动相关的皮层激活有关。有研究通过NIBS技术调节Mu ERD振幅,提高BCI性能,解决“BCI文盲”问题。tDCS可提高健康成人或脑卒中患者MI-BCI的运动想象及运动执行准确性^[34]。HONG等^[35]研究发现,脑卒中患者在MI-BCI治疗前接受20 min tDCS刺激,可检测到持久的神经可塑性改变,包括皮质脊髓侧束和双侧胼胝体的白质完整性增加,提示tDCS联合MI-BCI治疗可更好地促进神经可塑性的改变。但其他形式的NIBS是如何影响BCI训练效果还有待进一步探究。

2.1.2 经颅磁刺激 重复经颅磁刺激(repetitive

transcranial magnetic stimulation, rTMS) 是常用的 NIBS 技术之一,常被用于诱导皮层激活的调节, rTMS 具有更高的时间/空间分辨率,与 tDCS 比较能更精确地刺激相应脑区。有研究显示, rTMS 可提高 MI-BCI 性能和准确率^[36]。通过抑制对侧半球或促进同侧半球间的激活, rTMS 可促进脑卒中后运动功能恢复, rTMS 联合 MI-BCI 的远期随访效果也较好^[37]。SHU 等^[38]研究显示,高频 rTMS 干预可明显提高脑卒中患者执行 MI 任务和运动任务的准确率。虽然,这些研究显示 rTMS 或 tDCS 联合 MI-BCI 在脑卒中后功能康复中有较好的应用前景。但是,目前尚无标准化治疗方案,治疗效果差异较大。下一步研究还需探讨优化 NIBS 技术以提高 BCI 训练的效果,并探索 NIBS 技术与 MI-BCI 性能的关系,为 NIBS 技术联合 MI-BCI 干预脑卒中功能障碍患者提供参考。

2.2 视觉反馈系统

有研究显示,视觉反馈可放大 MI 相关的运动皮层激活程度,使 MI 的运动皮层激活程度达到与实际运动任务相当甚至更高的水平^[39]。KONDO 等^[40]研究发现,在指导性视觉刺激下连续进行 4 d 手抓握 MI-BCI 治疗,约 75% 健康受试者表现出更明显的 ERD,提示 BCI 治疗期间进行视觉刺激可以增强运动想象 ERD 的自发产生。抽象视觉反馈、多模态反馈(听觉+视觉)等形式,同样能够提高受试者的 MI 准确率^[41]。FOONG 等^[14]研究显示,采用视觉反馈干预的无创脑电图 MI-BCI 治疗脑卒中患者,治疗 6 周后和第 24 周随访 FMA 评分均明显提高,提示视觉反馈不仅能够增强运动皮层的激活,还能提高 BCI 系统的准确性。

综上所述,视觉反馈在增强 MI-BCI 疗效方面显示出较大的潜力,但目前尚无标准化的反馈方案,导致治疗效果差异大。下一步研究应探索视觉反馈系统在 MI-BCI 中的作用机制以及如何优化视觉反馈系统以提高 BCI 训练的效果。

2.3 听觉反馈系统

有研究显示,接受视觉反馈的 MI-BCI 用户比接受听觉反馈的 MI-BCI 用户在初始阶段表现更好,但在持续治疗过程中,具有听觉反馈的 MI-BCI 用户的平均分类准确度和平均峰值分类准确度更高^[42]。NIJBOER 等^[42]比较参与者接受基于视觉刺激或听觉刺激的 BCI 治疗后的学习表现,听觉反馈组的学习速度虽较慢,但 2 组学习测试正确率相当。但是听觉反馈技术并不是 MI-BCI 性能的重要影响

因素,在使用单声道、立体声或三维听觉反馈等不同的音频技术时,MI-BCI 性能没有明显变化^[43]。综上所述,听觉反馈和视觉反馈都是改善 MI-BCI 性能的有效手段,但二者在不同阶段和不同用户群体中可能表现出不同的效果。听觉反馈可能需要更多的治疗时间或治疗次数才能表现出其有效性,在足够的治疗时间下,听觉反馈可能与视觉反馈一样有效。

2.4 本体感觉与触觉反馈系统

NAKAYASHIKI 等^[44]研究发现,与 MI 相关的 ERD 强度随手部位置变化而变化,提示在运动想象过程中本体感觉的改变会影响 MI 性能的表现。本体感觉反馈对 MI-BCI 性能的影响是稳定的,并且比视觉反馈的影响更为明显。NICOLELIS 等^[45]研究显示,在创伤性脊髓损伤患者接受运动联合 BCI 治疗过程中加入触觉反馈后可有效提高 BCI 分类器的准确性,提示触觉反馈可以增强 BCI 系统性能,而 BCI 识别准确率的提高源于感觉运动皮层的激活^[46],这也许能为脑卒中后运动功能的恢复提供新思路。GRIGOREV 等^[47]在治疗中引入振动触觉神经反馈,结果显示参与者对侧运动皮层区域 Mu 节律水平增强,参与 MI 相对应的手肌肉中运动皮质兴奋性增加。综上所述,多感官反馈(包括视觉和本体感受反馈)可改善 MI 期间的运动皮质兴奋性,多模态反馈方法可以提高 BCI 疗效,尤其是促进运动皮层的可塑性。但是本体感觉与触觉反馈的应用方式、种类等还缺乏明确的应用指导。

2.5 虚拟现实反馈

有研究显示,基于虚拟现实反馈的 MI-BCI 治疗可改善脑卒中后患者运动功能^[48-50]。由于虚拟现实反馈整合了听觉、视觉、动觉和振动触觉反馈,VR 有望提供更广泛的感官反馈,进一步优化 MI-BCI 性能。NUNES 等^[49]研究发现,与 MI 任务及显性运动执行任务比较,VR-BCI 任务能够引发更强的脑部激活反应,除了躯体运动和前运动皮质外,执行 VR-BCI 任务的受试者还调动了大部分顶叶和枕叶皮质区域,包括与动作观察相关的镜像神经元系统,以及与视觉注意和运动处理相关的视觉区域,这提示 VR-BCI 系统在大脑激活方面具有一定优势,并强调 VR 在 MI 任务中的独特作用。REN 等^[48]研究显示,FES 联合 VR 可增强 MI-BCI 性能,帮助提高分类精度和分类稳定性。VOURVOPOULOS 等^[50]研究显示,BCI-VR 系统可以调节和增强大脑活动

模式,使脑电节律更接近于实际运动执行。PARK等^[33]研究显示,与单模态听觉或视觉反馈比较,多模态反馈更能提高SMR-BCI性能。综上,基于VR反馈的MI-BCI系统康复治疗对于脑卒中后上肢运动功能恢复可能是有效的,但仍需要进行更大规模的临床试验,以确定其安全性和有效性。

3 小结与展望

本研究总结归纳了MI-BCI在脑卒中后上肢/

下肢运动功能、认知功能和吞咽功能等不同维度的应用处方,发现治疗处方的关键参数设定(如治疗频率、总疗程、单次治疗时间)与增效手段的标准化等还不统一,也存在一些技术瓶颈。见表1。希望通过深化学科交叉与技术创新,突破当前MI-BCI临床转化中“有效但不可靠”的困境,最终形成循证导向、精准适配的康复治疗体系,提高MI-BCI在脑卒中康复领域的应用效果。

表1 MI-BCI在脑卒中康复中应用的主要瓶颈和优化路径

Table 1 Main problems and optimization path of MI-BCI application in stroke rehabilitation

功能维度	有效干预参数	核心增效手段	主要瓶颈	优化路径
上肢运动功能	高频,5~7次/周,≥4周	VR多模态反馈+tDCS(M1区)	精细运动解码率低	高密度EEG+肌电信号融合解码
下肢运动功能	高频,2次/d,≥2周	BCI-VR系统+本体感觉反馈	皮层代偿网络激活不足	联合腰骶部磁刺激增强脊髓传导
认知功能	低频,3次/周,≥8周	视听双通道反馈+认知任务	评估工具敏感性低	开发基于fNIRS的注意力闭环调控
吞咽功能	单次,15~30 min/次,≥6周	fNIRS神经反馈+舌压生物传感器	MI-SW信噪比低	咽肌表面EMG辅助解码

3.1 MI-BCI应用主要瓶颈

3.1.1 参数设置的异质性 上肢功能康复偏向高频短期干预,下肢功能康复需高频叠加多模态刺激;认知功能康复常采用低频长程干预,但效果可能局限于注意力功能;因肌电解码信号的信噪比过低(<3 dB),MI-BCI在吞咽功能方面的应用尚未确立有效阈值。这种功能维度间的剂量差异仍缺乏神经可塑性机制方面的证据支持。

3.1.2 标准化增效策略不统一 非侵入性干预(tDCS/rTMS)虽可提升BCI分类精度,但其刺激靶点、时间窗等核心参数尚未形成统一标准;多模态反馈(如VR、本体感觉)虽然能强化皮层激活,但是不同反馈形式的协同效应及其对长期功能预后的影响仍不明晰。

3.1.3 跨领域研究局限 认知功能康复受限于评估工具敏感性不足(如MoCA量表对工作记忆的敏感性下降),吞咽功能康复因吞咽意图解码技术滞后(MI-SW平均准确率仅62.3%)难以突破实验室阶段,导致功能维度间的循证等级存在明显失衡。

3.2 MI-BCI应用展望

3.2.1 动态剂量调控模型构建 基于多中心临床随机对照研究建立基于脑卒中病灶定位(皮质/皮质下)、基线功能状态(FMA分级)及病程阶段(急性/慢性)的参数适配模型,利用机器学习算法解析

神经响应特征与功能预后的剂量-效应关系。

3.2.2 信号融合技术迭代 研发EEG-fNIRS-肌电图(electromyogram, EMG)多模态信号同步采集系统,突破精细运动(如腕指协调)与吞咽意图的解码瓶颈;开发低认知负荷BCI范式,以纳入严重认知功能障碍患者群体。

3.2.3 机制驱动的增效方案 结合影像技术[如正电子发射断层成像(positron emission tomography, PET)-磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)]揭示非侵入性脑刺激调控BCI性能的突触可塑性通路,建立基于个体化神经网络的闭环刺激策略,实现神经调控与BCI训练的时空精准匹配。

注:本文为第二十七届中国科协年会学术论文。

参考文献

[1] GAO X R, WANG Y J, CHEN X G, et al. Interface, interaction, and intelligence in generalized brain-computer interfaces [J]. Trends Cogn Sci, 2021, 25(8): 671-684.

[2] 蔡楚杰, 李四楠, 刘天, 等. 运动想象脑机接口在脑卒中后上肢康复中的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(6): 851-857.

CAI C J, LI S N, LIU T, et al. Research progress of motor imagination brain-computer interface in upper limb rehabilitation after stroke [J]. Chin J Rehabil Med, 2023, 38(6): 851-857.

[3] MACHADO T C, CARREGOSA A A, SANTOS M S, et al. Efficacy of motor imagery additional to motor-based therapy in the recovery

- of motor function of the upper limb in post-stroke individuals: a systematic review [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2019, 26(7): 548–553.
- [4] 蒋咏春, 尹浚骁, 赵碧仪, 等. 运动想象脑机接口技术在脑卒中后运动功能康复中的应用[J]. *康复学报*, 2023, 33(6): 562–570.
- JIANG Y C, YIN J X, ZHAO B Y, et al. Application of motor imagery brain-computer interface on patients with motor dysfunction after stroke [J]. *Rehabil Med*, 2023, 33(6): 562–570.
- [5] BENJAMIN E J, BLAHA M J, CHIUVE S E, et al. Heart disease and stroke statistics—2017 update: a report from the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2017, 135(10): e146–e603.
- [6] MANE R, CHOUHAN T, GUAN C T. BCI for stroke rehabilitation: motor and beyond [J]. *J Neural Eng*, 2020, 17(4): 041001.
- [7] 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.
- [8] 刘明月, 李哲, 曹永生, 等. 基于运动表象的脑机接口治疗对亚急性期脑卒中患者手功能康复的效果[J]. *中国康复理论与实践*, 2023, 29(1): 71–76.
- LIU M Y, LI Z, CAO Y S, et al. Effect of brain-computer interface training based on motor imagery on hand function for subacute stroke patients [J]. *Chin J Rehabil Theory Pract*, 2023, 29(1): 71–76.
- [9] LU R R, ZHENG M X, LI J, et al. Motor imagery based brain-computer interface control of continuous passive motion for wrist extension recovery in chronic stroke patients [J]. *Neurosci Lett*, 2020, 718: 134727.
- [10] LIN Q, ZHANG Y N, ZHANG Y J, et al. The frequency effect of the motor imagery brain computer interface training on cortical response in healthy subjects: a randomized clinical trial of functional near-infrared spectroscopy study [J]. *Front Neurosci*, 2022, 16: 810553.
- [11] VÁRKUTI B, GUAN C T, PAN Y Z, et al. Resting state changes in functional connectivity correlate with movement recovery for BCI and robot-assisted upper-extremity training after stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2013, 27(1): 53–62.
- [12] 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.
- [13] CHEN S Y, MAO M C, ZHU G Y, et al. Cortical activity in patients with high-functioning ischemic stroke during the Purdue Peg-board Test: insights into bimanual coordinated fine motor skills with functional near-infrared spectroscopy [J]. *Neural Regen Res*, 2024, 19(5): 1098–1104.
- [14] FOONG R, ANG K K, QUEK C, et al. Assessment of the efficacy of EEG-based MI-BCI with visual feedback and EEG correlates of mental fatigue for upper-limb stroke rehabilitation [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2020, 67(3): 786–795.
- [15] SCHUSTER C, HILFIKER R, AMFT O, et al. Best practice for motor imagery: a systematic literature review on motor imagery training elements in five different disciplines [J]. *BMC Med*, 2011, 9: 75.
- [16] LI T Q, ZHANG D, WANG Y, et al. Research on mental fatigue during long-term motor imagery: a pilot study [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 18454.
- [17] FROLOV A A, 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.
- [18] VOURVOPOULOS A, PARDO O M, LEFEBVRE S, et al. Effects of a brain-computer interface with virtual reality (VR) neurofeedback: a pilot study in chronic stroke patients [J]. *Front Hum Neurosci*, 2019, 13: 210.
- [19] 李睿, 刘宇琪, 刘卫平, 等. 一种基于手部精细运动分类的脑机接口方法研究[J]. *临床神经外科杂志*, 2024, 21(4): 384–388, 395.
- LI R, LIU Y Q, LIU W P, et al. Study on a brain computer interface based on decoding of precise hand movements [J]. *J Clin Neurosurg*, 2024, 21(4): 384–388, 395.
- [20] LE FRANC S, HERRERA ALTAMIRA G, GUILLEN M, et al. Toward an adapted neurofeedback for post-stroke motor rehabilitation: state of the art and perspectives [J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 917909.
- [21] PATTERSON K K, PARAFIANOWICZ I, DANELLIS C J, et al. Gait asymmetry in community-ambulating stroke survivors [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2008, 89(2): 304–310.
- [22] 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.
- [23] SEBASTIÁN-ROMAGOSA M, CHO W, ORTNER R, et al. Brain-computer interface treatment for gait rehabilitation in stroke patients [J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1256077.
- [24] 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 (Basel)*, 2023, 23(23): 9302.
- [25] GOMEZ-PILAR J, CORRALEJO R, NICOLAS-ALONSO L F, et al. Neurofeedback training with a motor imagery-based BCI: neurocognitive improvements and EEG changes in the elderly [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2016, 54(11): 1655–1666.
- [26] RENTON T, TIBBLES A, TOPOLOVEC-VRANIC J. Neurofeedback as a form of cognitive rehabilitation therapy following stroke: a systematic review [J]. *PLoS One*, 2017, 12(5): e0177290.
- [27] AGUILAR GONZALES C B, MUÑOZ A, PAULUCCI MÜLLER P, et al. A hybrid BCI for neurofeedback-based attention training: design and preliminary evaluation [J]. *IEEE Lat Am Trans*, 2022, 20(5): 746–752.
- [28] DALY S, THAI J, BELKHIRIA C, et al. Temporal deployment of attention by mental training: an fMRI study [J]. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2020, 20(4): 669–683.
- [29] KHEDR E M, ABO-ELFETOH N. Noninvasive brain stimulation

- for treatment of post-stroke dysphagia [J]. *Neuroenterology*, 2013, 2:235663.
- [30] YANG H, ANG K K, WANG C, et al. Neural and cortical analysis of swallowing and detection of motor imagery of swallow for dysphagia rehabilitation—a review [J]. *Prog Brain Res*, 2016, 228: 185–219.
- [31] KOBER S E, BAUERNFEIND G, WOLLER C, et al. Hemodynamic signal changes accompanying execution and imagery of swallowing in patients with dysphagia; a multiple single-case near-infrared spectroscopy study [J]. *Front Neurol*, 2015, 6:151.
- [32] SZYNKIEWICZ S H, NOBRIGA C V, O'DONOGHUE C R, et al. Motor imagery practice and increased tongue strength: a case series feasibility report [J]. *J Speech Lang Hear Res*, 2019, 62(6):1676–1684.
- [33] PARK E, YUN B J, MIN Y S, et al. Effects of a mixed reality-based cognitive training system compared to a conventional computer-assisted cognitive training system on mild cognitive impairment: a pilot study [J]. *Cogn Behav Neurol*, 2019, 32(3):172–178.
- [34] KASASHIMA-SHINDO Y, FUJIWARA T, USHIBA J, et al. Brain-computer interface training combined with transcranial direct current stimulation in patients with chronic severe hemiparesis: proof of concept study [J]. *J Rehabil Med*, 2015, 47(4):318–324.
- [35] 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.
- [36] PAN W X, WANG P, SONG X H, et al. The effects of combined low frequency repetitive transcranial magnetic stimulation and motor imagery on upper extremity motor recovery following stroke [J]. *Front Neurol*, 2019, 10:96.
- [37] 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.
- [38] 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 [J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2018, 2018:2272–2275.
- [39] HOROWITZ A J, GUGER C, KOROSTENSKAJA M. What external variables affect sensorimotor rhythm brain-computer interface (SMR-BCI) performance? [J]. *HCA Healthc J Med*, 2021, 2(3): 143–162.
- [40] KONDO T, SAEKI M, HAYASHI Y, et al. Effect of instructive visual stimuli on neurofeedback training for motor imagery-based brain-computer interface [J]. *Hum Mov Sci*, 2015, 43:239–249.
- [41] SOLLFRANK T, RAMSAY A, PERDIKIS S, et al. The effect of multimodal and enriched feedback on SMR-BCI performance [J]. *Clin Neurophysiol*, 2016, 127(1):490–498.
- [42] NIJBOER F, FURDEA A, GUNST I, et al. An auditory brain-computer interface (BCI) [J]. *J Neurosci Meth*, 2008, 167(1): 43–50.
- [43] MCCREADIE K A, COYLE D H, PRASAD G. Is sensorimotor BCI performance influenced differently by mono, stereo, or 3-D auditory feedback? [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2014, 22(3):431–440.
- [44] NAKAYASHIKI K, SAEKI M, TAKATA Y, et al. Modulation of event-related desynchronization during kinematic and kinetic hand movements [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2014, 11:90.
- [45] NICOLELIS M A L, ALHO E J L, DONATI A R C, et al. Training with noninvasive brain-machine interface, tactile feedback, and locomotion to enhance neurological recovery in individuals with complete paraplegia: a randomized pilot study [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1):20545.
- [46] BARSOTTI M, LEONARDIS D, VANELLO N, et al. Effects of continuous kinaesthetic feedback based on tendon vibration on motor imagery BCI performance [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2018, 26(1):105–114.
- [47] GRIGOREV N A, SAVOSENKOV A O, LUKOYANOV M V, et al. A BCI-based vibrotactile neurofeedback training improves motor cortical excitability during motor imagery [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2021, 29:1583–1592.
- [48] REN S X, WANG W Q, HOU Z G, et al. Enhanced motor imagery based brain-computer interface via FES and VR for lower limbs [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(8): 1846–1855.
- [49] NUNES J D, VOURVOPOULOS A, BLANCO-MORA D A, et al. Brain activation by a VR-based motor imagery and observation task: an fMRI study [J]. *PLoS One*, 2023, 18(9):e0291528.
- [50] VOURVOPOULOS A, BADIA S B I. Motor priming in virtual reality can augment motor-imagery training efficacy in restorative brain-computer interaction: a within-subject analysis [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2016, 13(1):69.

Application Prescription of Brain-Computer Interface Based on Motor Imagery in Post-Stroke Dysfunction

JIANG Shanshan^{1,2}, QIU Zhiqing^{1,2}, YOU Tingting³, FU Xinyu^{1,2}, CHEN Guanzhou^{1,2},
LI Haoda^{1,2}, LIANG Boyuan^{1,2}, YU Jiani⁴, OU Haining^{4*}

¹ The Fifth Affiliated Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou, Guangdong 510700, China;

² The Fifth Clinical College of Guangzhou Medical University, Guangzhou, Guangdong 510700, China;

³ The First Affiliated Hospital of Hunan University of Chinese Medicine, Huaihua, Hunan 422001, China;

⁴ The Second Affiliated Hospital of Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou, Guangdong 510120, China

*Correspondence: OU Haining, E-mail: Haining@gzucm.edu.cn

ABSTRACT Brain-computer interface (BCI) establishes a direct communication pathway between the brain and external devices, bypassing the peripheral neuromuscular system. This technology has attracted increasing attention in neurorehabilitation research. Particularly, motor imagery-based BCI (MI-BCI) has demonstrated therapeutic potential in post-stroke rehabilitation targeting motor dysfunction, cognitive impairment, and swallowing disorders. However, the lack of standardized treatment protocols significantly hampers clinical efficacy and widespread implementation of MI-BCI interventions. This review examines existing application protocols of MI-BCI in treating post-stroke upper/lower limb motor dysfunction, cognitive impairment, and dysphagia, with emphasis on the impact of treatment frequency, total intervention duration, and single-session time allocation on rehabilitation outcomes. Furthermore, it explores non-invasive interventions to enhance MI-BCI efficacy, such as visual/auditory feedback, proprioceptive and tactile feedback, virtual reality feedback, and non-invasive brain stimulation techniques. Current limitations in MI-BCI-based stroke rehabilitation include a lack of standardized protocols for parameter settings (e.g., treatment frequency, total course duration, single-session duration) and augmenting therapeutic effects, and technical challenges in signal processing. Future directions should prioritize optimizing application protocols to reduce variability in treatment outcomes, improving system standardization and stability, thereby providing a reference for MI-BCI clinical translation in stroke rehabilitation.

KEY WORDS stroke; dysfunction; neurorehabilitation; brain-computer interface; motor imagery; application prescription

DOI:10.3724/SP.J.1329.2025.02015

(上接第 211 页)

Application of Motor Imagery in Stroke Rehabilitation

WANG Jiayu¹, WANG Jiening¹, QI Rui^{2*}

¹ The Seventh Clinical Medical College, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 200137, China;

² Affiliated Yueyang Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 200437, China

*Correspondence: QI Rui, E-mail: qirui36@126.com

ABSTRACT Motor imagery (MI) refers to an active central nervous system intervention involving conscious mental rehearsal of specific motor actions without producing physical movement, in order to activate neural networks analogous to those engaged during actual movement performance to achieve cerebral functional reorganization. Characterized by high operational safety, procedural simplicity, and cost-effectiveness, MI serves as an effective adjunctive approach for rehabilitation training in stroke patients. This review systematically examines five critical aspects, including concept and development of MI, motor imagery-based brain-computer interface (MI-BCI) technologies, MI capability assessment methods, clinical applications of MI in stroke rehabilitation, and neurophysiological mechanisms of MI, aiming to establish standardized implementation guidelines for MI interventions in stroke recovery. MI capability assessment incorporates three primary approaches, including standardized questionnaires [Motor Imagery Questionnaire (MIQ), Vividness of Movement Imagery Questionnaire (VMIQ), Kinesthetic-Visual Imagery Questionnaire (KVIQ)], psychometric evaluations (mental chronometry and psychomotor rotation tasks), and supplementary measures (temporal consistency analysis and autonomic nervous system parameters). Clinical applications of MI in stroke rehabilitation encompass four domains, including upper extremity motor dysfunction after stroke, lower extremity motor dysfunction after stroke, swallowing/speech impairments after stroke, and depression after stroke. Neurophysiological mechanisms of MI included functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cortical activation mapping during MI training, functional magnetic resonance imaging (fMRI) for neural circuit analysis, neuroelectrophysiological recordings for cortical excitability assessment, and resting-state functional connectivity (rs-FC) for baseline neural network characterization during MI. However, there are still some limitations in the application of MI in stroke rehabilitation, such as incomplete elucidation of MI's neuroplasticity mechanisms, prerequisite MI capability screening for individualized therapy, and lack of standardized protocols for treatment parameters (e.g., session duration, operational instructions, procedural specifications) in clinical implementation.

KEY WORDS stroke; dysfunction; motor imagery; motor imagery brain-computer interface; rehabilitation therapy

DOI:10.3724/SP.J.1329.2025.02014