

· 综 述 ·

运动想象在脑卒中康复中的应用

王嘉雨¹, 王杰宁¹, 齐 瑞^{2*}¹ 上海中医药大学附属第七人民医院, 上海 200137;² 上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院, 上海 200437

* 通信作者: 齐瑞, E-mail: qirui36@126.com

收稿日期: 2024-10-25; 接受日期: 2025-01-15

基金项目: 国家中医药管理局高水平中医药重点学科建设项目(ZYYZDXK-2023065); 国家重点研发计划“中医药现代化研究”重点专项课题(2019YFC1711805); 上海市临床重点专科项目(shslczdsk04601)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2025.02014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



摘要 运动想象(MI)是指对某一动作的实际运动过程有意识地在脑中重复排练但不产生任何运动的主动中枢干预方式,以激活与实际运动执行相似的神经网络,实现脑功能重组。MI具有应用安全性高、实施过程简易及治疗成本低等优点,可辅助脑卒中患者进行康复训练。本研究综述MI的概念及其发展、运动想象脑机接口(MI-BCI)技术、MI能力的评估方式、MI在脑卒中康复中的应用和作用机制,以期为MI在脑卒中康复领域的规范化应用提供参考。其中MI能力的评估方式包括问卷评估[运动想象问卷(MIQ)、运动想象清晰度问卷(VMIQ)和运动觉-视觉想象问卷(KVIQ)]、心理测量学(心理计时和心理旋转试验)和其他方式(时间一致性评估及自主神经功能指标)。MI在脑卒中康复中的应用主要包括MI在脑卒中后上肢运动功能障碍、脑卒中后下肢运动功能障碍、脑卒中后吞咽及言语功能障碍和脑卒中后抑郁中的应用;MI作用机制研究主要包括基于功能性近红外光谱成像技术(fNIRS)探究MI训练时脑区激活情况;基于功能性磁共振成像(fMRI)探究MI训练时大脑皮层区域活跃情况;基于神经电生理方法探究MI训练时大脑局部皮质神经元兴奋性和基于静息态脑功能连接(rs-FC)探究MI训练时大脑连接基线特征。但MI在脑卒中康复领域的应用还存在一些不足之处,如MI的作用机制尚未完全明确;开展MI康复训练前,需要评估患者的MI能力;临床上对MI辅助康复治疗尚无统一标准,如在治疗时间、操作指令及具体流程等方面还存在诸多差异。

关键词 脑卒中;功能障碍;运动想象;运动想象脑机接口;康复治疗

脑卒中是由于脑部血管突然破裂或血管阻塞致使血液无法流入大脑,引起脑组织损伤的一种急性脑血管病。脑卒中具有高发病率、高致残率、高病死率、高复发率、高经济负担等特点。《中国脑卒中防治报告 2021》数据显示:2019 年全球疾病负担研究中,我国伤残调整生命年的病因排名脑卒中位居第一^[1]。如何改善脑卒中后患者功能障碍,提高生活质量,加快患者回归社会的速度一直是康复领域的研究重点之一。运动想象(motor imagery, MI)作为一种新兴康复疗法应用于脑卒中患者,有助于肢体运动功能恢复^[2],改善言语及吞咽能力^[3-4],增强

患者的康复信心,提高治疗依从性;其机制与大脑的神经可塑性相关^[5]。MI具有应用安全性高、实施过程简易及治疗成本低等优点,有较大的发展潜力。本研究就 MI 在脑卒中康复领域的应用研究进展综述如下。

1 MI 概述

1.1 MI 概念

MI 是指对某一动作的实际运动过程有意识地在脑中重复排练但不产生任何运动的主动中枢干预方式,以激活与实际运动执行相似的神经网络,实现脑功能重组^[6],此过程不产生人体的肌肉收缩

引用格式:王嘉雨,王杰宁,齐瑞. 运动想象在脑卒中康复中的应用[J]. 康复学报, 2025, 35(2): 205-211, 220.

WANG J Y, WANG J N, QI R. Application of motor imagery in stroke rehabilitation [J]. Rehabil Med, 2025, 35(2): 205-211, 220.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2025.02014

©《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

及运动活动。通常将 MI 分为 2 种类型,一种是以第三人称视角进行想象,即作为一名观察者旁观某人完成某一运动动作,此类 MI 称为外在 MI,又称视觉想象;另一种则是以第一人称视角进行想象,即由本人在脑内想象自己在进行某一运动动作,此类 MI 称为内在 MI,又称知觉想象^[7]。将 MI 疗法应用于临床康复治疗时又可分为嵌入型运动想象(embedded motor imagery, EMI)与附加型运动想象(added motor imagery, AMI)^[8]。EMI 是在患者的整个康复训练过程中增加 MI 指令;AMI 是在患者康复训练过程外单独进行 MI 训练,2 种 MI 方式在治疗过程中各有利弊。

1.2 MI 发展

1950 年,HOSSACK^[9]提出了心理意象(mental imagery)概念,MI 在心理意象概念出现后被提出。20 世纪 60~70 年代研究发现,想象能够起到促进学习与记忆的作用^[10],并开始使用 MI 作为运动员运动技能与情绪控制训练的手段;20 世纪 80~90 年代开始逐渐将该疗法应用于肢体功能障碍的康复训练治疗^[11]。心理神经肌肉(psychoneuro muscular, PM)理论认为在大脑进行想象动作练习的过程中会激发相应的神经肌肉活动^[12],人体的中枢神经系统内储存有运动“流程图”,在想象过程中“流程图”会以与实际运动同样的形式运行。脑卒中后患者尽管发生脑损伤,引发相应的肢体运动功能障碍,但其运动“流程图”依然保存,以 MI 进行康复治疗能够促进运动传导通路的修复,达到功能重建的目的。PM 理论一直被认为是 MI 疗法能够改善运动学习的最有力解释^[13]。当前,由于 MI 疗法受训练的器械、场地限制较小,且不要求实际运动输出,可应用于脑卒中各时期康复训练中,因此逐渐在临床康复治疗中被重视和推广。

1.3 运动想象脑机接口技术

21 世纪以来,生物医学工程与人工智能计算机技术飞速发展,医工结合的创新模式使得脑机接口(brain computer interface, BCI)与 MI 疗法常联合应用,运动想象脑机接口(motor imagery-based brain-computer interface, MI-BCI)技术成为脑卒中康复领域的研究热点之一^[14]。MI-BCI 技术可完全不依赖于人体神经肌肉组织所进行的运动输出,而是直接通过计算机采集大脑在想象运动过程中产生的脑电信号,以接收到的中枢神经系统活动所产生的脑电信号对外接设备进行控制,实现与外界环境交互的

目的^[15]。临床研究发现,MI-BCI 技术能有效改善脑卒中患者运动功能障碍^[16-17],且 MI-BCI 技术与外部控制联合应用[如康复机器人、功能性电刺激(functional electric stimulation, FES)、视觉反馈训练及多模态反馈训练等]对患者的运动功能恢复也有疗效^[18-20]。MI-BCI 技术引入“中枢-外周-中枢”的闭环神经反馈模式及多学科交叉融合的特点有利于脑卒中一体化康复平台的建立与推广,为脑卒中患者功能障碍康复提供新方向^[21]。

2 MI 能力的评估方式

想象是一种复杂的脑内活动过程,每个人的想象强度、清晰度及感受程度都不完全一致,有些脑卒中患者可能不具备 MI 的能力^[22]。MI 能力是影响 MI 干预效果的重要因素,因此在进行治疗前有必要对患者的 MI 能力进行评估。

2.1 问卷评估

MI 能力的常用评估问卷有 3 种,分别为运动想象问卷(Movement Imagery Questionnaire, MIQ)、运动想象清晰度问卷(Vividness of Movement Imagery Questionnaire, VMIQ)和运动觉-视觉想象问卷(Kinesthetic-Visual Imagery Questionnaire, KVIQ)。

2.1.1 MIQ MIQ 是一个简要版问卷,1997 年进一步完善后形成评估中较为常用的修订版问卷(Revised Version of Movement Imagery Questionnaire, MIQ-R)。MIQ-R 主要从视觉与运动觉 2 个方面评估受试者的运动想象能力(屈膝、跳跃、上肢及腰部的屈伸能力)^[23]。该问卷对受试者具有较高运动能力要求,适用对象通常为健康人群,而脑卒中患者多存在运动功能障碍,因此在脑卒中后患者 MI 能力评估中较为少见。

2.1.2 VMIQ VMIQ 是评估 MI 清晰度的问卷,分别以第一人称(内部想象)与第三人称(外部想象)角度进行想象清晰度评分。2008 年该问卷进一步完善为 VMIQ-2 版本^[24]。VMIQ 着重于评估受试者想象画面的视觉清晰度,与想象时对运动知觉评估的相关度较低^[25]。

2.1.3 KVIQ KVIQ 是为脑卒中后感觉运动障碍患者定制的 MI 能力评估问卷,具体分为完整版的 KVIQ-20 与精简版的 KVIQ-10^[26]。刘华等^[27]研究显示,中文版 KVIQ-20 与 KVIQ-10 问卷在脑卒中患者评估中具有良好的结构效度,证明 KVIQ 是一种评估 MI 能力的有效工具。目前临床上常用 KVIQ 对

脑卒中患者进行MI能力评估。

2.2 心理测量学

DECETY 和 JEANNEROD^[28]在 20 世纪 90 年代采用心理计时(mental chronometry, MC)评估 MI 能力。心理计时试验将大脑想象动作的持续时间与实际执行动作的持续时间进行比较,二者差异越小,表明想象能力越强^[29]。STUERNE 等^[30]研究发现通过外部刺激可提高受试者的 MC 能力,从而促进受试者 MI 能力提升。

心理旋转试验(mental rotation test, MRT)也是一种能够对受试者进行 MI 能力评估的测试技术。1971 年, SHEPARD 与 METZLER^[31]提出“心理旋转”概念。用于测试 MI 能力的最典型试验任务是手的心理旋转,也称手的偏侧性任务,受试者在该任务中看到一只手在不同方向的照片后判断其为左手或右手^[32]。王鹤玮等^[33]比较脑卒中患者与健康受试者的心理旋转试验结果发现,脑卒中患者的 MI 能力弱于健康人,但心理旋转的基本模式仍相对保留。

2.3 其他方式

除上述评估方式之外,MI 能力还可通过时间一致性及自主神经功能指标等作为辅助手段进行评估^[34]。在临床康复中应结合脑卒中患者的具体情况,考虑各个方法的优缺点后选择最合适的评估方式。

3 MI 在脑卒中康复中的应用

3.1 脑卒中后上肢运动功能障碍

上肢运动功能障碍是脑卒中后遗症中最典型功能障碍之一,较低的上肢活动度对脑卒中患者的日常生活活动产生了极大限制^[35]。有研究显示,MI 可在其他康复治疗手段基础上进一步改善脑卒中后患者亚急性期至后遗症期的上肢运动功能,证明了 MI 应用于临床康复领域的可行性^[36]。JI 等^[37]研究发现,MI+常规康复治疗可改善病程>3 个月的脑卒中患者上肢功能检查(Manual Function Test, MFT)、Fugl-Meyer 评定(Fugl-Meyer Assessment Scale, FMA)及改良 Barthel 指数(Modified Barthel Index, MBI)评分,分级 MI 有利于脑卒中患者上肢运动功能恢复。周静等^[38]研究发现采用功能性近红外光谱成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)对 MI 策略进行评估筛选,能够有效提升 MI 训练效果。SÁNCHEZ 等^[39]研究发现,双侧重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation,

rTMS)与基于 MI 的神经反馈训练相结合,能够提高脑卒中亚急性期及恢复期上肢运动功能。

综上所述,MI 对改善脑卒中患者的上肢运动功能障碍有较好的作用,有助于减轻脑卒中患者功能障碍程度,加快恢复速度,预防终生残疾的发生。此外,将 MI 与其他康复手段进行联合应用,存在较好的协同效应,有利于进一步提高疗效。

3.2 脑卒中后下肢运动功能障碍

脑卒中患者常伴有下肢运动功能障碍,导致行走活动及平衡功能受限,大大增加了脑卒中患者的跌倒风险,降低患者生活质量,影响其回归社会生活。临床研究显示,常规康复治疗联合 MI 疗法可改善亚急性期至后遗症期脑卒中患者下肢运动功能^[40]。YIN 等^[41]将 32 例脑卒中患者随机分为对照组和试验组,2 组均接受常规神经康复治疗,额外接受 20 min MI 训练,治疗 6 周后 Fugl-Meyer 下肢运动功能评定(Fugl-Meyer Assessment-Lower Extremity, FMA-LE)、功能独立性评定(Functional Independence Measure, FIM)、Berg 平衡量表(Berg Balance Scale, BBS)评分明显高于对照组。马云琪和宋智梁^[42]研究发现,MI 疗法与减重步行训练结合可更有效改善脑卒中患者下肢运动功能。徐建奇等^[43]采用经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)联合动觉 MI 疗法对脑卒中恢复期患者进行治疗 4 周后,患者 FMA-LE 评分、功能性步行量表(Functional Ambulation Category Scale, FAC)评级及 MBI 评分均明显提高。由于下肢 MI 任务的解码难度比上肢更大,目前 MI-BCI 技术的研究主要集中于上肢运动功能康复,MI-BCI 技术在下肢运动功能康复中的应用还有待进一步发展。

综上所述,MI 可有效改善脑卒中患者下肢运动功能、步行功能、平衡功能、日常生活活动能力和生活质量。但目前临床下肢 MI 应用样本量偏少,研究进展相对缓慢,需要在未来着重关注和探讨,以提供更客观的循证医学证据。

3.3 脑卒中后吞咽及言语功能障碍

吞咽障碍是脑卒中患者发病率较高的常见并发症之一,由吞咽障碍导致的误吸会极大增加患者的肺部感染率,甚至会导致脑卒中后患者死亡。XIONG 等^[44]探究吞咽动作观察联合 MI 疗法对脑卒中后吞咽功能障碍患者的影响,研究结果显示该方法可激活额顶叶、运动区、视觉区及扣带回系统的更大面积脑区,且在训练任务中脑网络的半球间功

能连接与信息传输效率明显增强。周苏键等^[45]研究显示, rTMS 与 MI 训练联合应用可明显改善脑卒中后吞咽障碍患者吞咽功能, 减少误吸程度。

脑卒中后因特定脑区受损也会引起患者言语相关功能丧失。DURAND 等^[46]研究发现, MI 可使脑卒中失语症患者大脑的视觉运动和语言区域(右楔皮质-左钙上皮质/右中央前回-左舌回)以及参与动作处理区域(右海马前旁回-左上顶叶)的脑功能连接增加。曲广枝^[47]研究发现, MI 可改善脑梗死运动性失语症患者言语功能。窦智等^[48]研究结果显示, MI 疗法联合言语训练可改善脑卒中后失语症患者言语功能、认知功能和神经功能缺损。

综上所述, MI 训练不仅能够改善脑卒中后吞咽障碍患者吞咽功能, 降低吸入性肺炎发生率, 还能够改善脑卒中后失语症患者的言语功能, 增强脑网络连接与神经重塑, 促进认知功能恢复。

3.4 脑卒中后抑郁

脑卒中发病后, 由于大脑病变部位、活动功能障碍及个人情志病史等多方面因素影响, 常导致脑卒中后抑郁(post-stroke depression, PSD)发生。PSD 作为脑卒中常见后遗症之一, 影响患者的功能康复, 降低生活质量, 甚至会使患者轻生。罗美杰等^[49]研究发现, 常规康复治疗联合特征性引导 MI 训练可改善脑卒中偏瘫患者焦虑、抑郁情绪。伦亿禧等^[50]研究发现, MI 疗法联合常规康复治疗可有效改善脑卒中后遗症期患者焦虑、抑郁评分, 并减轻神经功能损伤。任玉等^[51]研究发现, MI 训练可促进脑卒中偏瘫患者肢体运动功能恢复, 改善焦虑、抑郁状态, 提高心理弹性和睡眠质量。

综上所述, MI 可改善脑卒中患者焦虑、抑郁情绪, 调节心理状态, 提高患者的康复信心、治疗依从性与主观能动性, 预防轻生事件的发生。

4 MI 作用机制

有神经影像学研究表明, MI 过程中常见辅助运动区(supplementary motor area, SMA)、运动前区(pre-motor cortex, PMC)、初级运动皮层(primary motor cortex, M1)及顶叶皮层等脑区部位的激活, 与实际运动中所涉及的脑区存在重叠, 而小脑及基底节区等相关部位的损伤会使受试者 MI 能力下降。大脑的分区及相关功能支配较为复杂, 许多研究者利用 fNIRS、功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、神经电生理和静息态脑功

能连接(resting-state functional connectivity, rs-FC)等探讨 MI 的作用机制。

4.1 基于 fNIRS 探究 MI 训练时脑区激活情况

吴毅^[52]采用 fNIRS 实时无创监测大脑皮层中氧合血红蛋白及脱氧血红蛋白含量, 间接反映大脑神经活动。ALMULLA 等^[53]通过 fNIRS 探究 MI 期间的脑区激活情况, 研究结果显示进行站立 MI 训练期间, 大脑前额叶区域明显激活, 并集中在运动区域的相对较高数量显著通道中, 提示 MI 执行期间存在真实的大脑活动, 为记录 MI 过程提供客观依据。

4.2 基于 fMRI 探究 MI 训练时大脑皮层区域活跃情况

fMRI 利用磁共振造影可以检测神经元活动所引发的血流动力学改变, 能够反映局部大脑皮层区域的活跃情况。张亚菲等^[54]利用 fMRI 观察脑卒中患者在患手实际动作或 MI 状态下偏瘫对侧大脑感觉运动区的激活情况, 研究结果显示 MI 期间脑区激活部位与实际运动执行期间激活部位相似(包括双侧 SMC、SMA), 但激活强度较弱; 此外还存在额叶、顶叶、楔前叶等部位的激活, 提示 MI 与实际运动存在相似的功能性神经激活模式。

4.3 基于神经电生理方法探究 MI 训练时大脑局部皮质神经元兴奋性

MI 能够使大脑局部皮质神经元的兴奋性发生变化, 从而改变局部脑电节律和能量。因此, 采用脑电图(electroencephalography, EEG)、脑磁图(magnetoencephalography, MEG)等神经电生理方法也能够评估 MI 对脑功能的重塑程度。魏聪惠等^[55]采集受试者脑电数据, 选择 C3、C4、Cz 通道分析事件相关电位(event related potential, ERP)和事件相关去同步化/同步化(event-related desynchronization and synchronization, ERD/ERS), 结果表明下肢 MI 时以上通道产生几乎相同的 ERP 模式, C3、C4 通道 α 和 β 频段也呈现 ERD。利用脑电节律研究 MI 的神经作用机制, 可为建立一套有效激发脑卒中患者在意识支配下的主动式康复训练方法提供理论依据。

4.4 基于 rs-FC 探究 MI 训练时大脑连接基线特征

rs-FC 是在没有任何刺激或任务的情况下, 功能相关的大脑区域间的显著时间相关信号, 是探索大脑连接基线特征的重要方法。rs-FC 的强度与行为测量有关, 重复特定任务会改变与该任务密切相关的脑卒中患者大脑区域间的 rs-FC。TANAMACHI 等^[56]探究脑卒中患者进行 MI 干预后 rs-FC 与运动

功能变化的关系,结果显示MI训练后患者运动功能明显改善,运动功能变化与rs-FC(如感觉运动网络和顶叶皮层)存在明显相关关系。YOXON等^[57]研究发现,MI训练能引发运动皮层与使用相关的神经可塑性变化。RUFFINO等^[58]研究显示,MI干预后rs-FC的积极变化可能表示重复MI训练会导致脑网络的使用依赖性可塑性增强,从而诱导脑功能重组。

5 小 结

MI作为一种新兴的康复方式,具有操作简便易行、经济成本较低、不受场地限制及应用无创安全等优势。许多学者尝试将MI作为一种辅助手段应用于脑卒中后运动功能障碍、吞咽及言语功能障碍和抑郁康复训练中,并取得良好效果。MI可以与BCI、经颅磁刺激等多项新技术疗法相结合,发挥脑卒中患者在康复训练中的主观能动性;基于fNIRS、fMRI及EEG等检测方式对患者大脑活动进行分析记录,为MI在脑卒中康复中的应用提供理论依据。MI理论的基础是想象能够使大脑与实际动作执行产生相似的神经生理反应,提高神经系统重塑及功能重组速度,从而改善脑卒中患者运动功能。但是脑卒中患者大脑分区活动复杂,MI的作用机制尚未完全明确;MI疗法也存在一定自身局限性,MI不要求患者执行实际运动,但其训练过程需要依靠大脑活动,在开展MI康复训练前,需要评估患者的MI能力。目前,临床上对MI辅助康复治疗尚无统一标准,在治疗时间、操作指令及具体流程等方面还存在诸多差异,需要尽快建立共识,促进临床规范开展MI辅助康复治疗。

注:本文为第二十七届中国科协年会学术论文。

参考文献

- [1] 《中国脑卒中防治报告》编写组.《中国脑卒中防治报告 2021》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2023, 20(11): 783-792, 封3.
Report on Stroke Prevention and Treatment in China Writing Group. Brief report on stroke prevention and treatment in China, 2021 [J]. Chin J Cerebrovasc Dis, 2023, 20(11): 783-792, cover 3.
- [2] DORSCH S, NICHOLSON V, ROMAN E, et al. Motor imagery priming improves activity and impairment outcomes in people after stroke but the effects of other types of priming are unclear: a systematic review [J]. J Physiother, 2024, 70(4): 275-287.
- [3] 陈子雯, 侯冠华, 樊蕊蕊, 等. 运动想象疗法在吞咽障碍患者中的应用进展[J]. 护理与康复, 2024, 23(9): 85-87.
- [4] CHEN Z W, HOU G H, FAN R R, et al. Application progress of motor imagery therapy in patients with dysphagia [J]. J Nurs Rehabil, 2024, 23(9): 85-87.
- [4] 吴金香. 运动想象在脑卒中运动性失语患者中的应用研究[J]. 护士进修杂志, 2019, 34(6): 533-535.
- [5] WU J X. Research on the application of motor imagination in stroke patients with motor aphasia [J]. J Nurses Train, 2019, 34(6): 533-535.
- [5] 杨帮华. 运动想象脑机接口在神经系统疾病康复中的应用[J]. 康复学报, 2023, 33(6): 477-485.
- [6] YANG B H. Application of motor imagery brain-computer interface in rehabilitation of neurological diseases [J]. Rehabil Med, 2023, 33(6): 477-485.
- [6] SILVA S, BORGES L R, SANTIAGO L, et al. Motor imagery for gait rehabilitation after stroke [J]. Cochrane Database Syst Rev, 2020, 9(9): CD013019.
- [7] JEANNEROD M. Mental imagery in the motor context [J]. Neuropsychologia, 1995, 33(11): 1419-1432.
- [8] SCHUSTER C, BUTLER J, ANDREWS B, et al. Comparison of embedded and added motor imagery training in patients after stroke: results of a randomised controlled pilot trial [J]. Trials, 2012, 13: 11.
- [9] HOSSACK J C. Mental imagery [J]. Manic Med Rev, 1950, 30(8): 543-545.
- [10] 杨远滨, 王芾斌. 中医意念与康复的运动想象疗法的比较[J]. 中国康复医学杂志, 2005, 20(10): 43-44.
- [11] YANG Y B, WANG X B. Comparison of motor imagination therapy between traditional Chinese medicine and rehabilitation [J]. Chin J Rehabil Med, 2005, 20(10): 43-44.
- [11] DICKSTEIN R, DEUTSCH J E. Motor imagery in physical therapist practice [J]. Phys Ther, 2007, 87(7): 942-953.
- [12] 李继刚, 田宝. 运动想象的理论模式生理机制与应用研究[J]. 武汉体育学院学报, 2005, 39(5): 64-67.
- [13] LI J G, TIAN B. Physiological mechanisms of sports image theory mode and its application research [J]. J Wuhan Inst Phys Educ, 2005, 39(5): 64-67.
- [13] PAGE S J, LEVINE P, SISTO S, et al. A randomized efficacy and feasibility study of imagery in acute stroke [J]. Clin Rehabil, 2001, 15(3): 233-240.
- [14] FUMANAL-IDOCIN J, WANG Y K, LIN C T, et al. Motor-imagery-based brain-computer interface using signal derivation and aggregation functions [J]. IEEE Trans Cybern, 2022, 52(8): 7944-7955.
- [15] KHADEMI Z, EBRAHIMI F, KORDY H M. A review of critical challenges in MI-BCI: from conventional to deep learning methods [J]. J Neurosci Methods, 2023, 383: 109736.
- [16] 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.
- [17] GANGADHARAN S K, RAMAKRISHNAN S, PAKK A, et al. Characterization of event related desynchronization in chronic

- stroke using motor imagery based brain computer interface for upper limb rehabilitation [J]. *Ann Indian Acad Neurol*, 2024, 27(3):297-306.
- [18] LEE S H, KIM S S, LEE B H. Action observation training and brain-computer interface controlled functional electrical stimulation enhance upper extremity performance and cortical activation in patients with stroke: a randomized controlled trial [J]. *Physiother Theory Pract*, 2022, 38(9):1126-1134.
- [19] 李丹, 刘玲玉, 靳令经, 等. 基于脑机接口的康复训练在脑卒中上肢康复中的研究进展[J]. *中国康复*, 2023, 38(10):621-625.
LI D, LIU L Y, JIN L J, et al. Research progress of upper limb rehabilitation training based on brain-computer interface in stroke patients [J]. *Chin J Rehabil*, 2023, 38(10):621-625.
- [20] 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.
- [21] 刘明月, 樊亚蕾, 张蒙, 等. 近 10 年脑机接口技术用于脑卒中康复领域的可视化分析[J]. *中国康复理论与实践*, 2023, 29(2):223-230.
LIU M Y, FAN Y L, ZHANG M, et al. Brain-computer interface technology for stroke in the past decade: a visualized analysis [J]. *Chin J Rehabil Theory Pract*, 2023, 29(2):223-230.
- [22] CHEPUROVA A, HRAMOV A, KURKIN S. Motor imagery: how to assess, improve its performance, and apply it for psychosis diagnostics [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2022, 12(4):949.
- [23] WILLIAMS S E, CUMMING J, NTOUMANIS N, et al. Further validation and development of the movement imagery questionnaire [J]. *J Sport Exerc Psychol*, 2012, 34(5):621-646.
- [24] ROBERTS R, CALLOW N, HARDY L, et al. Movement imagery ability: development and assessment of a revised version of the vividness of movement imagery questionnaire [J]. *J Sport Exerc Psychol*, 2008, 30(2):200-221.
- [25] 刘华, 张玉, 宋鲁平, 等. 脑卒中患者运动想象能力的评估及影响因素[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2014, 36(8):652-654.
LIU H, ZHANG Y, SONG L P, et al. Evaluation and influencing factors of motor imagery ability in stroke patients [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2014, 36(8):652-654.
- [26] MALOUIN F, RICHARDS C L, JACKSON P L, et al. The Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ) for assessing motor imagery in persons with physical disabilities: a reliability and construct validity study [J]. *J Neurol Phys Ther*, 2007, 31(1):20-29.
- [27] 刘华, 程钰琦, 李洋, 等. 中文版运动觉-视觉想象问卷的结构效度[J]. *中国康复理论与实践*, 2017, 23(5):580-583.
LIU H, CHENG Y Q, LI Y, et al. Construct validity of Chinese version of Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire [J]. *Chin J Rehabil Theory Pract*, 2017, 23(5):580-583.
- [28] DECETY J, JEANNEROD M. Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitts's law hold in motor imagery? [J]. *Behav Brain Res*, 1995, 72(1/2):127-134.
- [29] WILLIAMS S E, GUILLOT A, DI RIENZO F, et al. Comparing self-report and mental chronometry measures of motor imagery ability [J]. *Eur J Sport Sci*, 2015, 15(8):703-711.
- [30] STUERNER J, SEHLE A, LIEPERT J. Extrinsic feedback facilitates mental chronometry abilities in stroke patients [J]. *Neuro-Rehabilitation*, 2023, 53(3):347-354.
- [31] SHEPARD R N, METZLER J. Mental rotation of three-dimensional objects [J]. *Science*, 1971, 171(3972):701-703.
- [32] COOPER L A, SHEPARD R N. Mental transformations in the identification of left and right hands [J]. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 1975, 104(1):48-56.
- [33] 王鹤玮, 王云龙, 陆小锋, 等. 心理旋转试验在脑卒中患者运动表象能力评估中的应用[J]. *中国康复理论与实践*, 2020, 26(7):813-819.
WANG H W, WANG Y L, LU X F, et al. Application of mental rotation test in motor imagery ability assessment for stroke patients [J]. *Chin J Rehabil Theory Pract*, 2020, 26(7):813-819.
- [34] 刘凤, 刘亚兰, 陈泽, 等. 运动想象疗法在脑卒中后功能康复中的研究进展[J]. *临床医学研究与实践*, 2022, 7(15):194-198.
LIU F, LIU Y L, CHEN Z, et al. Research progress of motor imagery therapy on functional rehabilitation after stroke [J]. *Clin Res Pract*, 2022, 7(15):194-198.
- [35] PURTON J, SIM J, HUNTER S M. The experience of upper-limb dysfunction after stroke: a phenomenological study [J]. *Disabil Rehabil*, 2021, 43(23):3377-3386.
- [36] VILLA-BERGES E, LABORDA SORIANO A A, LUCHA-LÓPEZ O, et al. Motor imagery and mental practice in the subacute and chronic phases in upper limb rehabilitation after stroke: a systematic review [J]. *Occup Ther Int*, 2023, 2023:3752889.
- [37] JI E K, WANG H H, JUNG S J, et al. Graded motor imagery training as a home exercise program for upper limb motor function in patients with chronic stroke: a randomized controlled trial [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2021, 100(3):e24351.
- [38] 周静, 杨远滨, 田浩林, 等. 基于近红外脑功能成像技术指导下运动想象训练在脑卒中后上肢运动功能康复中的应用[J]. *中国康复*, 2024, 39(3):131-134.
ZHOU J, YANG Y B, TIAN H L, et al. Application of mental imagery based on fNIRS in rehabilitation of stroke patients with upper limb paralysis [J]. *Chin J Rehabil*, 2024, 39(3):131-134.
- [39] 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:jrm18253.
- [40] ZHAO L J, JIANG L H, ZHANG H, et al. Effects of motor imagery training for lower limb dysfunction in patients with stroke: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2023, 102(5):409-418.

- [41] YIN X J, WANG Y J, DING X D, et al. Effects of motor imagery training on lower limb motor function of patients with chronic stroke: a pilot single-blind randomized controlled trial [J]. *Int J Nurs Pract*, 2022, 28(3): e12933.
- [42] 马云琪, 宋智梁. 运动想象疗法结合减重步行训练对脑卒中患者下肢运动功能康复疗效的研究[J]. *内江科技*, 2023, 44(9): 35-37.
- MA Y Q, SONG Z L. Effect of motor imagery therapy combined with body weight support walking training on lower limb motor function rehabilitation in stroke patients [J]. *Neijiang Sci Technol*, 44(9): 35-37.
- [43] 徐建奇, 王舒, 沈晓艳, 等. 经颅直流电刺激联合运动想象疗法对恢复期脑卒中患者下肢功能的疗效[J]. *神经损伤与功能重建*, 2024, 19(6): 366-368.
- XU J Q, WANG S, SHEN X Y, et al. Effect of transcranial direct current stimulation combined with kinesthetic motor imagination therapy on lower limb function of stroke patients in convalescence [J]. *Neural Inj Funct Reconstr*, 2024, 19(6): 366-368.
- [44] XIONG H, CHEN J J, GIKARO J M, et al. Activation patterns of functional brain network in response to action observation-induced and non-induced motor imagery of swallowing: a pilot study [J]. *Brain Sci*, 2022, 12(10): 1420.
- [45] 周苏键, 王水良, 刘小英, 等. 高频重复经颅磁刺激联合运动想象训练对脑卒中后吞咽功能障碍的影响[J]. *康复学报*, 2023, 33(2): 108-113.
- ZHOU S J, WANG S L, LIU X Y, et al. Effect of high-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation combined with motor imagery training on patients with post-stroke dysphagia [J]. *Rehabil Med*, 2023, 33(2): 108-113.
- [46] DURAND E, MASSON-TROTTIER M, SONTHEIMER A, et al. Increased links between language and motor areas: a proof-of-concept study on resting-state functional connectivity following personalized observation, execution and mental imagery therapy in chronic aphasia [J]. *Brain Cogn*, 2021, 148: 105659.
- [47] 曲广枝. 对脑梗死运动性失语患者采取运动想像疗法的意义分析[J]. *中国现代药物应用*, 2020, 14(17): 237-238.
- QU G Z. Significance of motor imagery therapy in patients with motor aphasia due to cerebral infarction [J]. *Chin J Mod Drug Appl*, 2020, 14(17): 237-238.
- [48] 窦智, 肖凯龙, 陈颖, 等. 运动想象疗法联合语言训练对脑卒中后失语症患者语言功能的影响[J]. *中外医学研究*, 2021, 19(6): 154-156.
- DOU Z, XIAO K L, CHEN Y, et al. Influence of sports imagination therapy combined with language training on the language function of aphasia patients after stroke [J]. *Chin Foreign Med Res*, 2021, 19(6): 154-156.
- [49] 罗美杰, 周慧, 郝习君, 等. 特征性引导运动想象对脑卒中偏瘫患者焦虑抑郁及残疾接受度的影响[J]. *华北理工大学学报(医学版)*, 2022, 24(2): 137-142.
- LUO M J, ZHOU H, HAO X J, et al. Effect of characteristic guided motor imagery on anxiety, depression, and disability acceptance in stroke patients with hemiplegia [J]. *J N China Univ Sci Technol Health Sci Ed*, 2022, 24(2): 137-142.
- [50] 伦亿禧, 李林海, 毛勇, 等. 运动想象疗法联合常规康复治疗改善脑卒中后遗症期患者焦虑抑郁情绪的效果分析[J]. *中国社区医师*, 2023, 39(35): 134-136.
- LUN Y X, LI L H, MAO Y, et al. Analysis on effects of mental imagery therapy combined with conventional rehabilitation treatment on ameliorating anxiety and depression emotions of patients during post-stroke sequelae period [J]. *Chin Community Dr*, 2023, 39(35): 134-136.
- [51] 任玉, 许亮, 任莎莎, 等. 运动想象疗法对脑卒中偏瘫患者上肢功能康复、睡眠障碍及心理状态的影响[J]. *国际精神病学杂志*, 2024, 51(5): 1533-1535.
- REN Y, XU L, REN S S, et al. The effect of exercise imagination therapy on upper limb function rehabilitation, sleep disorders, and psychological status in patients with hemiplegia after stroke [J]. *J Inter Psychiat*, 2024, 51(5): 1533-1535.
- [52] 吴毅. 功能性近红外光谱技术在脑卒中患者康复中的临床应用[J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(11): 1281-1283.
- WU Y. Clinical application of functional near infrared spectroscopy in rehabilitation of stroke patients [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2020, 35(11): 1281-1283.
- [53] ALMULLA L, AL-NAIB I, ATEEQ I S, et al. Observation and motor imagery balance tasks evaluation: an fNIRS feasibility study [J]. *PLoS One*, 2022, 17(3): e0265898.
- [54] 张亚菲, 刘旸, 张通. 运动想象治疗脑卒中患者手部运动功能的功能磁共振研究[J]. *中国康复*, 2020, 35(11): 576-581.
- ZHANG Y F, LIU Y, ZHANG T. Efficacy of motor imagery on hand function in stroke patients: a fMRI study [J]. *Chin J Rehabil*, 2020, 35(11): 576-581.
- [55] 魏聪惠, 刘绍文, 单新颖, 等. 基于下肢运动想象的脑电节律研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2022, 37(6): 737-742, 749.
- WEI C H, LIU S W, SHAN X Y, et al. Study on electroencephalogram rhythm based on lower limb motor imagery [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2022, 37(6): 737-742, 749.
- [56] 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.
- [57] YOXON E, WELSH T N. Rapid motor cortical plasticity can be induced by motor imagery training [J]. *Neuropsychologia*, 2019, 134: 107206.
- [58] RUFFINO C, GAVEAU J, PAPAXANTHIS C, et al. An acute session of motor imagery training induces use-dependent plasticity [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 20002.

(下转第 220 页)