

# 脑卒中后重度上肢功能障碍的康复评估与治疗

刘庆芝<sup>1</sup>, 徐海东<sup>1</sup>, 田 婧<sup>2</sup>, 李 响<sup>1</sup>, 王鹤玮<sup>2\*</sup>

1 济宁医学院附属医院, 山东 济宁 272000;

2 复旦大学附属华山医院, 上海 200040

\* 通信作者: 王鹤玮, wanghew@fudan.edu.cn

收稿日期: 2025-04-07; 接受日期: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(82102665); 山东省医药卫生科技项目(202416010199);

上海市科学技术委员会“扬帆计划”项目(21Y1404600)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2026.04008

**摘要** 脑卒中后重度上肢功能障碍是临床康复领域中的一个复杂且亟待解决的问题。其康复过程面临诸多挑战, 包括评估标准不够明确、神经重塑机制尚未完全阐明以及常规康复手段存在显著瓶颈等。本文首先通过量表评分、经颅磁刺激(TMS)评定、弥散张量成像(DTI)和功能性磁共振成像(fMRI)分析, 探讨了重度上肢功能障碍的界定标准。系统性梳理了脑卒中后重度上肢功能康复所涉及的复杂且多层次的神经生物学机制, 重点分析了神经系统的可塑性和修复能力。针对患者缺乏主动训练能力、痉挛与异常运动模式、心肺适能下降及神经可塑性窗口期限制等问题, 阐述了“零功能门槛”技术、全面痉挛管理策略、综合体能恢复方案以及窗口前移与分级干预策略的应用价值。强调早期干预、个体化治疗和多技术联合应用的重要性, 为突破重度上肢功能障碍康复过程中的“平台期”提供了理论支持与实践指导。

**关键词** 脑卒中; 重度上肢功能障碍; 新技术; 康复策略; 评估

脑卒中是一种高致残率神经系统疾病, 脑卒中后运动功能障碍显著降低了患者的生活质量。据统计我国每年新增约 394 万例脑卒中患者, 患病总人数超过 2 800 万人<sup>[1]</sup>。其中, 超过 50% 患者存在上肢功能障碍, 重度上肢功能障碍患者其手部精细运动功能的丧失与上肢粗大运动功能的缺损交织存在, 严重影响日常生活能力, 并导致长期预后不佳<sup>[2]</sup>。尽管常规康复手段对脑卒中后轻、中度上肢功能障碍患者疗效较好, 但是对重度上肢功能障碍患者的作用有限, 其上肢功能康复常停滞于“平台期”<sup>[3]</sup>。此外, 现有评估体系因“地板效应”难以准确区分重度患者在低分段的表现差异。更为重要的是, 学界针对脑卒中后重度上肢功能障碍的恢复规律及神经重塑机制的研究较为缺乏, 且尚未构建起统一的恢复理论或模型, 这为制定有效的康复策略带来了挑战。本文聚焦于脑卒中后重度上肢功能

障碍, 明确“重度”的界定标准, 探讨重度上肢功能障碍的神经修复机制, 剖析现有康复治疗的局限性和改进方向, 并讨论新技术在临床实践中的应用潜力。

## 1 脑卒中后重度上肢功能障碍的界定标准

脑卒中后上肢功能障碍的严重程度划分是制定康复方案和判断预后的重要依据。目前, 临床和科研中常用的功能性量表、神经电生理检测及神经影像指标等多种工具被用于划分其严重程度。然而, 由于样本量有限、患者群体的异质性较高以及纵向随访数据不足等因素, 尚未就脑卒中后上肢功能障碍的严重程度划分形成统一的标准。鉴于此, 本节将对现有文献中的相关资料进行系统梳理与深入分析, 旨在厘清当前界定标准的多样性及其局限性, 为临床评估提供参考依据。

**引用格式:** 刘庆芝, 徐海东, 田婧, 等. 脑卒中后重度上肢功能障碍的康复评估与治疗[J]. 康复学报, 2026, 36(4): 275-284, 298.

LIU Q Z, XU H D, TIAN J, et al. The rehabilitation assessment and treatment of severe upper limb dysfunction after stroke [J]. Rehabil Med, 2026, 36(4): 275-284, 298.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2026.04008

©《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

### 1.1 基于量表评分的界定标准

功能性量表是临床常用的评估工具,能够在一定程度上量化脑卒中患者的上肢运动功能水平。不同量表通常涉及上肢运动功能的不同维度,包括上肢粗大运动、精细运动、痉挛程度及日常生活表现等。因此,对于重度障碍的划分标准各有差异。

Fugl-Meyer 上肢运动功能评定量表(Fugl-Meyer Assessment of Upper Extremity, FMA-UE)由瑞典学者 Fugl-Meyer 于 1975 年设计,用于评估脑卒中患者的上肢运动功能恢复情况,是许多临床研究的主要评价指标,被视为“金标准”<sup>[4]</sup>。FMA-UE 包含 33 个项目,总分 0~66 分,分数越高表示功能越好。其中,肩-上肢部分 0~36 分,腕-手部分 0~24 分,协调/速度 0~6 分。重度上肢功能障碍界定标准为总分 <31 分,提示患者可以在屈肌或伸肌协同模式下完成少量关节动作(如肘部屈曲伴肩内收),但动作僵硬且不协调。此外,腕手部功能相对缺失,无法独立于协同模式活动,即使存在轻微抓握,也无法自主松开手指<sup>[5]</sup>。

上肢动作研究量表(Action Research Arm Test, ARAT)量表是 Lyle 于 1981 年基于 Carroll 教授开发的上肢功能测试(upper extremity function test, UEFT)量表简化而成的脑卒中上肢运动功能标准化评测工具,主要测试上肢在实际动作任务中的表现,可有效反映手部精细动作与粗大运动的协调能力<sup>[6]</sup>。ARAT 共 19 个条目,包括 4 个子项目:抓(grasp)、握(grip)、捏(pinch)及粗大运动(gross movement),总分 0~57 分。总分 <15 分为重度上肢功能障碍,患者仅能完成肩部的粗大运动,抓握和捏取功能显著受限<sup>[7]</sup>。

除上述 2 种量表,还存在其他重度上肢功能障碍的界定标准。例如:徒手肌力测试 <3 级,表明上肢无法抗重力活动;Brunnstrom 分期 I~III 期,提示上肢弛缓性瘫痪、痉挛伴联合反应或共同运动,但动作僵硬且无关节分离活动;Chedoke-McMaster 卒中评估法(手臂部分) <4 期,表明上肢痉挛明显,屈伸肌协同运动可自主诱发但动作僵硬,患者无法完成特定抗重力动作<sup>[8]</sup>。尽管临床上有多种常用的脑卒中后上肢运动功能评估量表,但大多数缺乏明确的重度功能障碍界定标准,亟需相关临床研究填补这一空白。

### 1.2 基于经颅磁刺激评估的界定标准

经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation,

TMS)可以利用脉冲磁场刺激大脑初级运动皮层(primary motor cortex, M1)的锥体神经元,并在靶肌肉记录运动诱发电位(motor evoked potential, MEP),通过不同的刺激范式可以量化脑卒中后皮质脊髓束(corticospinal tract, CST)的完整性和兴奋性、皮质内抑制/促进及跨半球相互作用<sup>[9]</sup>。

TMS 评定可以反映脑卒中患者运动功能损伤程度。重度上肢损伤患者患侧半球 M1 区通常无法诱发出对侧上肢靶肌肉的 MEP,提示 CST 解剖或功能性断裂<sup>[10]</sup>。脑卒中早期(平均病程 24 d)能检测到 MEP 的患者,其上肢功能和手指主动关节活动度显著高于 MEP 缺失的患者<sup>[11]</sup>。有研究通过 TMS 刺激健侧半球 M1 区,记录对侧上肢小指展肌 MEP,发现 60% 的重度脑卒中患者发病 48 h 内中枢运动传导时间(central motor conduction time, CMCT)延长,而 CMCT 的持续延长提示上肢运动功能恢复不良<sup>[12]</sup>。患侧半球运动皮层图面积扩大提示皮层功能重组,可能与手功能的运动再学习相关<sup>[13]</sup>。MEP 的潜伏期缩短提示神经传导速度改善,与上肢肌力和功能的改善有关<sup>[14]</sup>。对于偏瘫侧的近端肢体,MEP 有时可通过健侧半球的刺激诱发,但其潜伏期通常长于非偏瘫侧,提示健侧半球代偿性支配作用伴随潜伏期延长<sup>[15]</sup>。在急性期和亚急性期,CST 完整性指标(如 MEP 和运动阈值)与运动功能密切相关。超过 3 个月后,运动功能与皮质内兴奋性指标,如短间隔皮质内抑制(short-interval intracortical inhibition, SICI)、长间隔皮质内抑制(long-interval intracortical inhibition, LICI)以及皮质内易化(intracortical facilitation, ICF)的测量更相关,提示不同阶段依赖于不同的神经机制<sup>[9]</sup>。此外,健侧半球对患侧半球的跨半球抑制持续存在与重度脑卒中上肢功能障碍相关<sup>[16]</sup>。

TMS 评定还可以预测脑卒中上肢功能的恢复<sup>[17]</sup>。在脑卒中后 3 周能够成功诱发 MEP 的患者,几乎均会在 6 个月后展现出一定程度的手部运动功能恢复(高特异性)<sup>[18-19]</sup>。但 MEP 的敏感性较低(54%~57%)且受检测时间窗影响较大,并非所有最终恢复手部运动功能的患者都能被早期 TMS 检测识别<sup>[18]</sup>。MEP 缺失则与较差的上肢功能预后相关,急性期 MEP 缺失的患者 3 个月后 ARAT 评分通常为 5~13 分,而能够诱发 MEP 的患者评分可达 42~47 分<sup>[20]</sup>。此外,短潜伏期传入抑制(short-latency afferent inhibition, SAI)反映感觉运动整合中胆碱能

系统的调控,其抑制程度与6个月后运动功能恢复正相关<sup>[21]</sup>。

### 1.3 基于磁共振成像影像标志物的界定标准

磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)技术能够无创地反映脑卒中中对大脑结构与功能的影响,具备高分辨率、较高特异性和多模态成像的优势<sup>[22]</sup>。其中,弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)可提供关于脑结构及其连接的详细信息<sup>[23]</sup>,而功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)则可用于揭示静息状态或任务执行过程中皮层激活模式及脑区间功能连接(functional connectivity, FC)的特征<sup>[24-25]</sup>。

**1.3.1 基于DTI评价神经纤维束的完整性** 在脑白质中,水分子沿神经纤维方向的扩散速度快于垂直方向,通过测量这种扩散的各向异性,DTI可以描绘大脑中神经纤维束的完整性<sup>[26]</sup>。最常用的DTI参数为各向异性分数(fractional anisotropy, FA),患侧半球CST的FA通常呈现降低趋势,以内囊后肢的FA值最具代表性,能反映CST的结构保留度。患侧和健侧半球FA的比值(ratio of fractional anisotropy, rFA)以及FA的不对称性指数(asymmetry of fractional anisotropy, aFA)是FA的重要衍生指标。一般而言,FA值与rFA值越低,aFA值越高,患者运动功能的受损程度越严重<sup>[27]</sup>。PUIG等<sup>[28]</sup>研究发现,脑卒中患者在病程1个月时的rFA与病程2年时的运动功能损伤程度显著相关,rFA值<0.689提示重度损伤,0.689~0.982则提示轻度到中度损伤,该方法具有较好的灵敏性和特异性。根据STINEAR等<sup>[29]</sup>提出的经典预测模型,联合急性期肩外展与手指伸展量表(Shoulder Abduction and Finger Extension, SAFE)评分(评估肩外展、手指伸展肌力之和),MEP(评估皮质脊髓束的功能完整性),以及内囊后肢FA(评估皮质脊髓束的结构完整性),可以预测慢性期的上肢功能恢复结局。

在脑卒中后重度上肢功能障碍患者中,胼胝体微结构可以作为功能损伤和修复的生物标志物,因为胼胝体可以实现健患侧半球间的沟通和代偿。HAYWARD等<sup>[30]</sup>发现脑卒中患者的CST白质纤维微结构与上肢运动障碍之间存在整体相关性。1项19例中重度慢性脑卒中患者的研究发现,患侧半球侧网状脊髓束的FA与上肢协同运动严重程度显著

相关,而健侧半球侧红核脊髓束的FA与手部损伤严重程度显著相关,表明DTI可评估上肢运动相关神经纤维束的微观结构变化<sup>[31]</sup>。此外,丘脑梗死患者在发病后1周、4周、3个月和6个月的DTI检查显示,患侧与对侧丘脑辐射纤维的FA值逐渐增加,且与临床评分变化相关,表明神经纤维的增殖和重组可能促进神经功能恢复<sup>[32]</sup>。本课题组以胼胝体纤维束对应的左右大脑半球32对同源脑区为感兴趣区域,发现双侧感觉运动皮层间及健侧感觉运动皮层与患侧额上回之间的FC与运动功能恢复显著相关,可作为慢性重度偏瘫脑卒中患者上肢运动功能恢复的预测指标<sup>[23]</sup>。

**1.3.2 基于fMRI的影像标志物分析** fMRI是神经影像技术的“金标准”,可实现局部血氧代谢的可视化,间接反映神经元活动,具备较高的空间分辨率、无创性和多模态优势<sup>[33-34]</sup>。静息态fMRI不依赖于患者的功能水平,可通过FC、有效连接及图论等方法反映脑网络特征<sup>[35]</sup>。既往研究发现,轻中度脑卒中患者的双侧同伦脑区,如双侧M1区的FC较健康对照组下降,但伴随上肢运动功能改善,双侧FC增强且呈正相关<sup>[36]</sup>。然而,本课题组前期通过静息态fMRI的FC、有效连接、低频振幅、独立成分分析等发现重度上肢功能障碍患者的脑重塑机制不同于轻、中度患者,表现为健侧半球运动前区、前额叶、顶下小叶和基底节核团的代偿,而非双侧FC增强<sup>[37-40]</sup>。任务态fMRI是研究特定脑区功能的有效工具,但其应用受限于患者的主动运动能力,难以用于重度患者。本课题组采用被动握拳任务fMRI范式,发现重度上肢功能障碍患者在运动想象训练后,双侧大脑半球的代偿性激活减弱,FC分析进一步定位了与运动功能重塑相关的多个脑区,包括初级感觉运动皮层、顶下小叶和壳核<sup>[41]</sup>。目前,fMRI研究主要描述重度患者的脑网络连接或激活模式,尚未明确重度界定标准。

## 2 脑卒中后重度上肢功能障碍康复的神经重塑机制

脑卒中后上肢功能的恢复涉及复杂且多层次的神经生物学机制,其核心在于神经系统的可塑性及修复能力。神经可塑性通过突触重塑、树突新生、轴突再生及皮层地图重构等过程实现功能代

偿<sup>[42]</sup>。动物实验表明,脑卒中后3个月内突触可塑性最显著,病灶周围及远端脑区的突触数量增加,树突棘密度提升,促进新神经连接形成,这与临床早期快速恢复阶段一致<sup>[43]</sup>。神经营养因子和血管新生有助于神经元存活和突触形成,运动训练可上调脑源性神经营养因子(brain-derived neurotrophic factor, BDNF)表达,促进突触可塑性和神经干细胞增殖<sup>[44]</sup>。运动训练还可以增加脑血流量,促进侧支循环形成,并减少凋亡、自噬和焦亡相关蛋白表达<sup>[45]</sup>。缺血半暗带内血管新生可以改善局部血供, BDNF和血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)在此过程中起协同作用<sup>[46]</sup>。神经炎症反应具有双重作用,急性期加重损伤,恢复期则参与修复。M1型小胶质细胞释放促炎因子(如肿瘤坏死因子- $\alpha$ 和白细胞介素-1 $\beta$ ), M2型分泌抗炎因子(如白细胞介素-10),运动训练可抑制M1极化并促进M2型转化<sup>[44]</sup>。A1型星形胶质细胞释放神经毒性物质, A2型则清除代谢废物并分泌神经营养因子支持修复。因此,小胶质细胞和星形胶质细胞的极化状态是关键调节靶点<sup>[47]</sup>。此外,神经再生与神经干细胞密切相关,是脑卒中后神经功能修复的重要机制<sup>[48]</sup>。

在宏观层面,脑卒中患者可通过皮层区功能重组和传导通路代偿等方式重建上肢运动功能。经典的“半球间抑制模型(interhemispheric inhibition, IHI)”指出,脑卒中后病灶侧与健侧半球之间存在抑制失衡。具体来说,病灶侧损伤减弱了对健侧半球的抑制,而健侧对患侧半球的过度抑制阻碍了功能恢复<sup>[49]</sup>。通过抑制健侧半球M1区或兴奋患侧半球M1区,可恢复半球间平衡,促进上肢功能恢复<sup>[50]</sup>。然而,该模型主要适用于损伤程度较轻的患者,而重度损伤患者的适应性相对较差。相比之下,“代偿模型(compensatory model)”强调激活健侧运动相关脑区来代偿患侧功能,一般适用CST受损严重的患者<sup>[39,50-51]</sup>。DI PINO等<sup>[9]</sup>于2014年提出“双相平衡恢复模型(bimodal balance-recovery model)”,认为CST保留度较高时功能恢复依靠患侧运动皮层重组,保留度较低的则更多依赖健侧半球代偿。功能影像学进一步验证了该模型的可靠性,在高CST保留组中,偏侧指数可恢复至对侧主导状态,患侧M1区激活与Fugl-Meyer评分呈正相关;而在低CST保留组中,偏侧指数离散化,健侧背侧运动前区

皮层(dorsal premotor cortex, PMd)激活与功能恢复显著相关<sup>[52-53]</sup>。此外,还需关注患者神经功能的动态重塑过程,急性期主要依赖代偿机制,而亚急性期则需根据CST恢复情况灵活调整干预策略<sup>[9]</sup>。

### 3 脑卒中后重度上肢功能障碍康复治疗的局限性和应对策略

脑卒中后重度上肢功能障碍的康复治疗受到多种因素的限制,包括但不限于无法启动或维持主动运动训练,痉挛与异常运动模式影响运动能力,体能不足难以承受训练强度,以及神经可塑性的时间窗口限制。本节将系统分析这些问题,并提出解决方案,为相关研究和实践提供支持。

#### 3.1 主动训练能力缺乏与康复技术适配性问题

美国心脏协会(American Heart Association, AHA)2016版《成人脑卒中康复与恢复指南》<sup>[54]</sup>指出,上肢功能康复训练应遵循如下原则:开展针对特定任务的功能性训练,内容需分级设计并逐步提升难度,通过反复练习巩固技能(I级推荐, A类证据)。然而,重度上肢功能障碍患者缺乏主动训练能力,难以独立完成任务导向的训练。例如,强制性运动疗法(constraint-induced movement therapy, CIMIT)虽为指南推荐的A类证据干预措施,但其准入条件较高(偏瘫侧腕关节伸展 $>20^\circ$ ,拇指及其他4指中的任意2指的掌指关节和指间关节伸展 $>10^\circ$ ,且上述动作1 min内可重复3次),仅有约25%的患者符合要求,即使采用最低标准(能够通过可控抓握动作从桌面上提起并放下1条抹布), CIMIT仍主要适用于轻、中度损伤患者,重度患者被排除在外<sup>[55]</sup>。

“零功能门槛”干预技术是解决上述局限性的关键方法。该技术针对功能完全丧失或接近失能的患者,无需依赖残存主动运动能力即可启动康复训练。其核心是通过外部辅助(如神经电刺激、机器人辅助或脑机接口)直接激活神经肌肉通路,打破“无功能无法训练”的壁垒,利用中枢可塑性在损伤早期介入,预防继发性功能退化,并为重度瘫痪患者提供神经重塑的机会。以下列举部分代表性技术:①上肢康复机器人,在指南中的推荐级别为II a,证据等级A级。重力补偿型机器人外骨骼通过机械臂或弹簧系统抵消肢体重力,帮助中度上肢瘫痪患者在无自主肌力时完成关节活动训练。例如, ARMin系统利用动态重力支撑进行三维任务导向

训练,并结合视觉反馈强化运动意图与动作的关联,有效提升中、重度患者FMA-UE评分,疗效优于常规康复训练<sup>[56]</sup>。然而,上肢康复机器人通常不适用于重度上肢痉挛,即改良阿什沃思量表(Modified Ashworth Scale, MAS) > 3分的患者,且有证据提示上肢康复机器人对痉挛的缓解无明显的疗效<sup>[57-58]</sup>。部分上肢机器人通过内置的力学和运动学传感设备,能够精确测量患肢被动运动时的阻力变化,从而可用于脑卒中上肢痉挛的客观评定<sup>[59-60]</sup>。② 神经肌肉电刺激,适用于脑卒中后初期仅表现出轻微自主运动或存在肩关节半脱位的患者(推荐级别Ⅱa,证据等级A)。神经肌肉电刺激能激活 $\alpha$ 运动神经元,预防肌肉萎缩,并通过Ia类传入纤维增强感觉输入,是重度上肢功能障碍康复的常用手段<sup>[61-62]</sup>。③ 动作模拟类技术,包括运动想象(推荐级别Ⅱa,证据等级A)、动作观察及镜像疗法等,属于主动中枢干预技术,通过想象、视觉反馈等形式,在中枢层面调节运动神经网络。由于此类疗法不依赖外周肢体的功能状态,该类技术适用于重度患者<sup>[63]</sup>。本课题组前期研究显示,运动想象对重度脑卒中患者的上肢功能恢复有显著效果,其机制涉及健侧感觉运动皮层的代偿性激活及顶下小叶的参与<sup>[64-65]</sup>。④ 无创神经调控,属于被动中枢干预技术,通过调节大脑皮层或核团的兴奋性促进患者上肢功能恢复。常用技术包括重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)(高频兴奋、低频抑制)、经颅直流电刺激(阳极兴奋、阴极抑制)以及 $\theta$ 脉冲刺激(间歇性兴奋、连续性抑制)。根据《重复经颅磁刺激临床治疗循证指南(2014—2018年更新版)》,针对脑卒中后手功能障碍,亚急性期低频rTMS刺激健侧半球M1区为A级推荐,高频rTMS刺激患侧M1区为B级推荐,慢性期低频rTMS刺激健侧半球M1区为C级推荐<sup>[66]</sup>。针对重度上肢功能障碍患者,探寻M1区以外的靶点(如健侧PMd)及多靶点联合刺激策略成为研究热点<sup>[50,67]</sup>。其他技术如迷走神经电刺激(植入或经耳)、经颅超声刺激、高精度直流电刺激、经颅交流电刺激、硬膜外刺激以及深部脑刺激等亦展现出巨大潜力,但其在重度脑卒中上肢康复中的应用仍需高质量随机对照试验验证<sup>[68]</sup>。为了进一步提升上述神经调控技术的精准度与临床疗效,基于多模态神经影像的个体化靶向刺激则是未来的发展方向<sup>[69]</sup>。⑤ 脑机接口(brain-computer interface, BCI)技术,通过强化“意图-动

作”闭环,激活残留神经网络,促进突触可塑性和上肢功能恢复<sup>[70]</sup>。BCI系统常基于运动想象、稳态视觉诱发电位或P300,外周结合功能性电刺激、机器人外骨骼和虚拟现实设备等,构建中枢到外周的桥梁,适用于重度上肢功能障碍<sup>[71-72]</sup>。BIASIUCCI等<sup>[73]</sup>探讨了BCI联合功能性电刺激(functional electric stimulation, FES)治疗脑卒中后重度上肢功能障碍,结果与假FES相比,BCI联合FES能显著促进慢性期的运动功能恢复,效果持续6~12个月,并增强受损半球运动区的FC。国内研究发现,亚急性期重度患者接受基于运动想象的BCI疗法后,FMA-UE和ARAT评分提高,机制与躯体感觉、视觉、空间处理和运动学习的脑功能网络活动增强相关<sup>[74]</sup>。近10年BCI康复的可视化分析表明,中国在该领域领先但整体仍落后于美国,研究热点为上肢康复疗效及中枢机制,主要关注慢性期患者<sup>[75]</sup>。需要注意,BCI技术并非完全“零功能门槛”,对患者认知和运动想象能力有一定要求<sup>[76]</sup>。BCI也通常不适用于明显的上肢痉挛(MAS评分>2分)的患者,有研究表明脑卒中MAS<1+级的患者在接受BCI手功能干预后其疗效显著优于MAS>1+级的患者<sup>[77-78]</sup>。当前BCI技术还面临其他挑战,如解码精度不足、系统稳定性较弱、个体差异显著(重度患者激活阈值高,需模型优化)、成本高昂、操作便捷性不足等<sup>[79]</sup>。

### 3.2 痉挛与异常运动模式的干扰

痉挛是脑卒中后上运动神经元损伤引发的运动障碍,表现为速度和肌肉长度依赖性的肌张力增高。其主要由过度激活的脑干下行兴奋性通路(如内侧网状脊髓束)引起,导致牵张反射亢进。痉挛与其他运动障碍(如异常力量控制、协同运动模式、拮抗肌共激活、关节挛缩)共享病理生理基础,属于适应不良性神经可塑性表现<sup>[80]</sup>。在重度上肢功能障碍患者中,痉挛及异常运动模式会干扰运动功能恢复,通常出现在急性期和亚急性期,并在慢性期趋于稳定。目前尚无完全纠正这种异常神经可塑性的干预措施。现有证据推荐肉毒毒素注射、苯酚神经阻滞和鞘内巴氯芬泵等方法,但其毒副作用及长期功能恢复疗效仍需进一步研究<sup>[81]</sup>。力学牵伸、冲击波疗法、矫形器或手术矫正可改善活动范围并减少挛缩<sup>[82-83]</sup>。电刺激训练拮抗肌(如手指伸肌)有助于平衡肌力<sup>[84]</sup>。重复性任务训练(如抓握-释放动作)可在痉挛减轻后重建正常运动模式。因此,应采用全面痉挛管理策略,整合药物注射、物理牵

伸、电刺激、冲击波及任务导向训练等多模态、多学科干预,早期促进神经修复并抑制异常可塑性发展,慢性阶段则转向以功能恢复为目标,综合运用痉挛缓解、肌力强化和代偿策略<sup>[81,85]</sup>。

### 3.3 心肺适能不足

脑卒中患者的心肺适能(cardiorespiratory fitness, CRF)是指心肺系统在体力活动中为肌肉提供氧气和清除代谢废物的能力。这一指标直接影响患者的运动耐量、日常生活能力和康复效果,AHA建议将其作为第五大生命体征监测<sup>[86]</sup>。CRF的金标准是通过心肺运动测试评估最大或峰值耗氧量,脑卒中患者发病初期耗氧量显著下降,恢复期虽有所回升,但仍低于健康人群<sup>[87]</sup>。此外,心肺适能不足常与重度上肢功能障碍共存,限制了高强度训练,成为功能恢复的“短板”。为此,有学者提出综合体能恢复方案,以提升CRF为核心,整合有氧耐力训练、抗阻力量训练、平衡协调练习、呼吸肌训练、营养支持及神经调控等多模式实施渐进干预<sup>[88]</sup>。针对重度患者可采用低强度间歇式或适应性机器人辅助训练,积极开展早期干预,实施混合运动训练模式,并利用分阶段能量节约技术(如将每日训练分解为短时高密度任务)突破体能“短板”<sup>[89-90]</sup>。然而,该领域高质量研究仍显不足,特别是针对重度上肢功能障碍患者的循证依据匮乏,未来需进一步探索。

### 3.4 神经可塑性的时间依赖性及窗口期限制

脑卒中患者在慢性期(>6个月)的神经可塑性和上肢功能恢复速度显著下降,表现为运动功能改善幅度减少、对训练反应性降低。重度患者(伴有严重皮质脊髓束损伤)的FMA-UE评分年均改善幅度仅为亚急性期的10%~20%<sup>[91]</sup>。这可能与不可逆性神经解剖结构损伤、抑制性神经微环境的形成、神经营养因子分泌减少以及突触修剪与功能重组失衡等因素相关<sup>[90-94]</sup>。因此,上肢功能恢复的关键窗口期为发病后6个月内。然而,重度患者常因急性期并发症(如昏迷、感染、虚弱或认知心理障碍等)未能及时接受系统化康复干预,错失最佳恢复期。目前,临床早期关注重点多集中于下肢康复,导致上肢手功能康复干预滞后。实际上,上肢功能恢复的最佳窗口期为发病后3个月内,滞后干预可能错过神经可塑性的关键时期<sup>[95]</sup>。为此,应实施窗口前移与分级干预策略,其核心是基于CST保留度进行精准评估,将干预时间前移至发病后早期。对

于CST保留度较高患者,在康复初期即开展上肢功能训练;而对于结构损伤较重患者,则尽早引入中枢-外周闭环调控技术激活残留神经网络,从而实现高保留即刻训练、低保留闭环激活的个性化分级方案。通过长期科学管理与干预,最终实现以回归家庭和社会为目标的功能性康复<sup>[95-96]</sup>。

## 4 小结

本文系统综述了脑卒中后重度上肢功能障碍的评估方法和界定标准、神经重塑机制及康复瓶颈的突破策略。重度损伤需结合功能量表、神经电生理和多模态影像标志物进行评估,核心标志物包括FMA-UE评分<31分与ARAT评分<15分、MEP缺失及内囊后肢FA值降低(aFA>0.15)。功能恢复的关键在于皮质脊髓束保留度与健侧半球代偿能力的动态平衡。现有康复手段面临主动功能缺失导致“训练悖论”、痉挛形成“神经可塑性陷阱”、心肺适能不足限制训练强度、慢性期神经微环境抑制突触再生这四大挑战。机器人辅助、闭环神经调控及脑机接口等技术通过中枢-外周双向干预,为突破瓶颈提供了新路径。

然而,当前研究存在以下局限:①重度患者评估标准不统一,传统量表难以捕捉微小改善,DTI与fMRI影像标志物缺乏标准参考模型;②神经调控的靶点选择、刺激参数及长期疗效需进一步验证;③脑机接口技术的临床转化受限于解码效率低、运动意图-动作闭环延迟、个性化算法不足及作用机制不明;④痉挛管理长效性不足,肉毒毒素平均有效期仅3~6个月且可能抑制神经修复。

未来研究应聚焦多学科交叉,开发基于人工智能的多模态评估模型,结合功能评分、神经电生理、多模态影像和可穿戴传感器建立个性化功能监测系统;推动神经调控精准化,实现个体化靶向调控;研发适用于重度患者的混合BCI系统,强化运动意图-动作关联;建立转化平台,制定康复技术评估标准,推动三级康复技术推广和标准化建设。总之,通过多学科融合与技术创新,有望突破脑卒中后重度上肢功能障碍的康复瓶颈,实现从神经修复到功能重建的跨越式发展。

## 参考文献

- [1] GBD 2019 Diseases and Injuries Collaborators. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study

- 2019 [J]. *Lancet*, 2020, 396(10258): 1204–1222.
- [2] WANG H W, ARCEO R, CHEN S G, et al. Effectiveness of interventions to improve hand motor function in individuals with moderate to severe stroke: a systematic review protocol [J]. *BMJ Open*, 2019, 9(9): e032413.
  - [3] RAFFIN E, HUMMEL F C. Restoring motor functions after stroke: multiple approaches and opportunities [J]. *Neuroscientist*, 2018, 24(4): 400–416.
  - [4] HUYNH B P, DICARLO J A, VORA I, et al. Sensitivity to change and responsiveness of the upper extremity Fugl-Meyer assessment in individuals with moderate to severe acute stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2023, 37(8): 545–553.
  - [5] SANTISTEBAN L, TÉRÉMETZ M, BLETON J P, et al. Upper limb outcome measures used in stroke rehabilitation studies: a systematic literature review [J]. *PLoS One*, 2016, 11(5): e0154792.
  - [6] PADILLA-MAGAÑA J F, PEÑA-PITARCH E, SÁNCHEZ-SUAREZ I, et al. Quantitative assessment of hand function in healthy subjects and post-stroke patients with the action research arm test [J]. *Sensors*, 2022, 22(10): 3604.
  - [7] HAYWARD K S, SCHMIDT J, LOHSE K R, 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.
  - [8] BEHRENDT F, RIZZA J C, BLUM F, et al. German version of the Chedoke McMaster arm and hand activity inventory (CAHAI-G): intra-rater reliability and responsiveness [J]. *Health Qual Life Outcomes*, 2020, 18(1): 247.
  - [9] DI PINO G, PELLEGRINO G, ASSENZA G, et al. Modulation of brain plasticity in stroke: a novel model for neurorehabilitation [J]. *Nat Rev Neurol*, 2014, 10(10): 597–608.
  - [10] 黄连池, 权璐, 文斌, 等. 经颅磁刺激在脑卒中的运动功能障碍康复中的研究进展[J]. *生物医学工程研究*, 2024, 43(1): 9–15.
  - [11] HUANG L C, QUAN L, WEN B, et al. Research advance of motor dysfunction rehabilitation of stroke based on transcranial magnetic stimulus [J]. *J Biomed Eng Res*, 2024, 43(1): 9–15.
  - [12] YEN C C, CHEN H H, LEE C H, et al. Predictive value of motor-evoked potentials for motor recovery in patients with hemiparesis secondary to acute ischemic stroke [J]. *Ann Med*, 2023, 55(1): 2225144.
  - [13] HOONHORST M H J, NIJLAND R H M, EMMELOT C H, et al. TMS-induced central motor conduction time at the non-infarcted hemisphere is associated with spontaneous motor recovery of the paretic upper limb after severe stroke [J]. *Brain Sci*, 2021, 11(5): 648.
  - [14] YAROSSO M, PATEL J, QIU Q Y, et al. The association between reorganization of bilateral M1 topography and function in response to early intensive hand focused upper limb rehabilitation following stroke is dependent on ipsilesional corticospinal tract integrity [J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 258.
  - [15] LÜDEMANN-PODUBECKÁ J, NOWAK D A. Mapping cortical hand motor representation using TMS: a method to assess brain plasticity and a surrogate marker for recovery of function after stroke? [J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2016, 69: 239–251.
  - [16] CLELAND B T, MADHAVAN S. Ipsilateral motor pathways and transcallosal inhibition during lower limb movement after stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2021, 35(4): 367–378.
  - [17] MIRDAMADI J L, XU J, AREVALO-ALAS K M, et al. State-dependent interhemispheric inhibition reveals individual differences in motor behavior in chronic stroke [J]. *Clin Neurophysiol*, 2023, 149: 157–167.
  - [18] VAN KUIJK A A, PASMAN J W, HENDRICKS H T, et al. Predicting hand motor recovery in severe stroke: the role of motor evoked potentials in relation to early clinical assessment [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2009, 23(1): 45–51.
  - [19] HENDRICKS H T, PASMAN J W, VAN LIMBEEK J, et al. Motor evoked potentials in predicting recovery from upper extremity paralysis after acute stroke [J]. *Cerebrovasc Dis*, 2003, 16(3): 265–271.
  - [20] HENDRICKS H T, ZWARTS M J, PLAT E F, et al. Systematic review for the early prediction of motor and functional outcome after stroke by using motor-evoked potentials [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2002, 83(9): 1303–1308.
  - [21] STINEAR C M, BYBLOW W D, ACKERLEY S J, et al. Predicting recovery potential for individual stroke patients increases rehabilitation efficiency [J]. *Stroke*, 2017, 48(4): 1011–1019.
  - [22] DI LAZZARO V, PROFICE P, PILATO F, et al. The level of cortical afferent inhibition in acute stroke correlates with long-term functional recovery in humans [J]. *Stroke*, 2012, 43(1): 250–252.
  - [23] YANG H E, KYEONG S, KANG H, et al. Multimodal magnetic resonance imaging correlates of motor outcome after stroke using machine learning [J]. *Neurosci Lett*, 2021, 741: 135451.
  - [24] 刘灵, 孙莉敏, 王鹤玮, 等. 慢性脑卒中伴严重偏瘫患者经胼胝体相连皮质功能连接异常对运动恢复的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(8): 1130–1142.
  - [25] LIU L, SUN L M, WANG H W, et al. Effects of abnormal functional connectivity in transcallosal cortex connecting to the corpus callosum on motor recovery in chronic stroke patients with severe hemiplegia [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2024, 39(8): 1130–1142.
  - [26] 李倩文, 孙莉敏, 王鹤玮, 等. 慢性脑卒中重度偏瘫患者功能恢复的感觉运动皮质重组模式研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(8): 1111–1121.
  - [27] LI Q W, SUN L M, WANG H W, et al. The reorganization patterns of the sensorimotor cortex during motor recovery in chronic stroke with severe hemiplegia [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2024, 39(8): 1111–1121.
  - [28] FAN H X, WANG H W, LIAN Z X, et al. Dynamic interactions between hemispheres reveal a compensatory pathway for motor recovery in moderate-to-severe subcortical stroke [J]. *J Stroke*, 2026, 28(1): 97–114.
  - [29] 魏戡, 余秋蓉, 尹大志, 等. 基于健康人皮质脊髓束模板分析脑卒中皮质脊髓束损伤[J]. *磁共振成像*, 2021, 12(7): 39–44, 68.
  - [30] WEI Y, YU Q R, YIN D Z, et al. Analysis of corticospinal tract

- injury in stroke based on a corticospinal tract template derived from healthy subjects [J]. *Chin J Magn Reson Imag*, 2021, 12(7): 39-44, 68.
- [27] ZOLKEFLEY M K I, FIRWANA Y M S, HATTA H Z M, et al. An overview of fractional anisotropy as a reliable quantitative measurement for the corticospinal tract (CST) integrity in correlation with a Fugl-Meyer assessment in stroke rehabilitation [J]. *J Phys Ther Sci*, 2021, 33(1): 75-83.
- [28] PUIG J, BLASCO G, DAUNIS-I-ESTADELLA J, et al. Decreased corticospinal tract fractional anisotropy predicts long-term motor outcome after stroke [J]. *Stroke*, 2013, 44(7): 2016-2018.
- [29] STINEAR C M. Prediction of motor recovery after stroke: advances in biomarkers [J]. *Lancet Neurol*, 2017, 16(10): 826-836.
- [30] HAYWARD K S, FERRIS J K, LOHSE K R, et al. Observational study of neuroimaging biomarkers of severe upper limb impairment after stroke [J]. *Neurology*, 2022, 99(4): e402-e413.
- [31] OWEN M, INGO C, DEWALD J P A. Upper extremity motor impairments and microstructural changes in bulbospinal pathways in chronic hemiparetic stroke [J]. *Front Neurol*, 2017, 8: 257.
- [32] LIU Y Y, CHEN L, ZENG J S, et al. Proliferation of bilateral nerve fibers following thalamic infarction contributes to neurological function recovery: a diffusion tensor imaging (DTI) study [J]. *Med Sci Monit*, 2018, 24: 1464-1472.
- [33] 王鹤玮, 贾杰, 孙莉敏. 运动想象疗法在脑卒中患者上肢康复中的应用及其神经作用机制研究进展[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, 41(6): 473-476.  
WANG H W, JIA J, SUN L M. Advances in the application of motor imagery therapy in upper limb rehabilitation of stroke patients and its neural mechanisms [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2019, 41(6): 473-476.
- [34] TAVAZZI E, BERGSLAND N, PIRASTRU A, et al. MRI markers of functional connectivity and tissue microstructure in stroke-related motor rehabilitation: a systematic review [J]. *NeuroImage Clin*, 2022, 33: 102931.
- [35] 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 NeuroEngineering Rehabil*, 2023, 20(1): 159.
- [36] ISMAIL U N, YAHYA N, MANAN H A. Investigating functional connectivity related to stroke recovery: a systematic review [J]. *Brain Res*, 2024, 1840: 149023.
- [37] 孙莉敏, 王鹤玮, 徐国军, 等. 运动想象联合常规康复训练促进脑卒中患者功能恢复的静息态功能性磁共振研究[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, 41(2): 84-90.  
SUN L M, WANG H W, XU G J, et al. The effects of motor imagery training and conventional therapy on the functioning of stroke survivors: a resting-state fMRI study [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2019, 41(2): 84-90.
- [38] 孙莉敏, 杨浩, 孙长慧, 等. 运动想象联合常规康复促进脑卒中患者上肢运动功能恢复的fMRI研究[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2020, 42(6): 493-499.  
SUN L M, YANG H, SUN C H, et al. The neural mechanism of motor imagery training's motor recovery effects after stroke [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2020, 42(6): 493-499.
- [39] WANG X, WANG H W, XIONG X, et al. Motor imagery training after stroke increases slow-5 oscillations and functional connectivity in the ipsilesional inferior parietal lobule [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2020, 34(4): 321-332.
- [40] 吴杰, 赵智勇, 唐朝正, 等. 基于独立成分分析的脑卒中感觉运动网络功能连接异常的研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2017, 32(6): 607-612.  
WU J, ZHAO Z Y, TANG C Z, et al. A resting-state fMRI study of sensorimotor network in stroke based on independent component analysis [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2017, 32(6): 607-612.
- [41] WANG H W, XIONG X, ZHANG K X, et al. Motor network reorganization after motor imagery training in stroke patients with moderate to severe upper limb impairment [J]. *CNS Neurosci Ther*, 2023, 29(2): 619-632.
- [42] SU F, XU W D. Enhancing brain plasticity to promote stroke recovery [J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 554089.
- [43] MURPHY T H, CORBETT D. Plasticity during stroke recovery: from synapse to behaviour [J]. *Nat Rev Neurosci*, 2009, 10(12): 861-872.
- [44] 胡昔权. 运动训练促进脑卒中后神经可塑性的机制研究[J]. *中山大学学报(医学科学版)*, 2021, 42(4): 481-486.  
HU X Q. Advances in the mechanism of physical exercise promoting neuroplasticity after stroke [J]. *J Sun Yat-Sen Univ (Med Sci)*, 2021, 42(4): 481-486.
- [45] ZHANG P Y, YU H X, ZHOU N Y, et al. Early exercise improves cerebral blood flow through increased angiogenesis in experimental stroke rat model [J]. *J NeuroEngineering Rehabil*, 2013, 10(1): 43.
- [46] LIMAYE N S, CARVALHO L B, KRAMER S. Effects of aerobic exercise on serum biomarkers of neuroplasticity and brain repair in stroke: a systematic review [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2021, 102(8): 1633-1644.
- [47] CHOPP M, ZHANG Z G, JIANG Q. Neurogenesis, angiogenesis, and MRI indices of functional recovery from stroke [J]. *Stroke*, 2007, 38(2): 827-831.
- [48] CHEN B H, JIN W F. A comprehensive review of stroke-related signaling pathways and treatment in western medicine and traditional Chinese medicine [J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1200061.
- [49] LUK K Y, OUYANG H X, PANG M Y C. Low-frequency rTMS over contralesional M1 increases ipsilesional cortical excitability and motor function with decreased interhemispheric asymmetry in subacute stroke: a randomized controlled study [J]. *Neural Plast*, 2022, 2022(1): 3815357.
- [50] LI J L, WANG H W, YUAN Y J, et al. Effects of high frequency rTMS of contralesional dorsal premotor cortex in severe subcortical chronic stroke: protocol of a randomized controlled trial with multimodal neuroimaging assessments [J]. *BMC Neurol*, 2022,

- 22(1):125.
- [51] KLOMJA W, GIRON A, MOUNIR EL MENDILI M, et al. Anodal tDCS of contralesional hemisphere modulates ipsilateral control of spinal motor networks targeting the paretic arm post-stroke [J]. Clin Neurophysiol, 2022, 136: 1-12.
  - [52] MCMORLAND A J C, RUNNALLS K D, BYBLOW W D. A neuroanatomical framework for upper limb synergies after stroke [J]. Front Hum Neurosci, 2015, 9: 82.
  - [53] MCPHERSON L M, DEWALD J P A. Abnormal synergies and associated reactions post-hemiparetic stroke reflect muscle activation patterns of brainstem motor pathways [J]. Front Neurol, 2022, 13: 934670.
  - [54] WINSTEIN C J, 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: e98-e169.
  - [55] BANI-AHMED A A. Post-stroke motor recovery and cortical organization following constraint-induced movement therapies: a literature review [J]. J Phys Ther Sci, 2019, 31(11): 950-959.
  - [56] KLAMROTH-MARGANSKA V, BLANCO J, CAMPEN K, et al. Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial [J]. Lancet Neurol, 2014, 13(2): 159-166.
  - [57] LEE D J, BAE S J, JANG S H, et al. Design of a clinically relevant upper-limb exoskeleton robot for stroke patients with spasticity [C]//2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). London: UK. IEEE, 2017: 622-627.
  - [58] PARK J M, PARK H J, YOON S Y, et al. Effects of robot-assisted therapy for upper limb rehabilitation after stroke: an umbrella review of systematic reviews [J]. Stroke, 2025, 56(5): 1243-1252.
  - [59] ZHANG M L, CHEN J, LING Z Q, et al. Quantitative evaluation system of upper limb motor function of stroke patients based on desktop rehabilitation robot [J]. Sensors, 2022, 22(3): 1170.
  - [60] MAURA R M, RUEDA PARRA S, STEVENS R E, et al. Literature review of stroke assessment for upper-extremity physical function via EEG, EMG, kinematic, and kinetic measurements and their reliability [J]. J NeuroEngineering Rehabil, 2023, 20(1): 21.
  - [61] WANG H W, XIANG Y Z, WANG C K, et al. Effects of transcutaneous electrical acupoint stimulation on upper-limb impairment after stroke: a randomized, controlled, single-blind trial [J]. Clin Rehabil, 2023, 37(5): 667-678.
  - [62] KHAN M A, FARES H, GHAYVAT H, et al. A systematic review on functional electrical stimulation based rehabilitation systems for upper limb post-stroke recovery [J]. Front Neurol, 2023, 14: 1272992.
  - [63] 王鹤玮, 陈栋屹, 董安琴, 等. 基于运动想象与动作观察的动作模拟研究报道指南解读 [J]. 中国医刊, 2024, 59(8): 847-851.
  - WANG H W, CHEN Y Y, DONG A Q, et al. Interpretation of action simulation research report guidelines based on the motion imagery and action observation [J]. Chin J Med, 2024, 59(8): 847-851.
  - [64] ZHANG K X, WANG H W, WANG X, et al. Neuroimaging prognostic factors for treatment response to motor imagery training after stroke [J]. Cereb Cortex, 2023, 33(16): 9504-9513.
  - [65] WANG H W, XU G J, WANG X, et al. The reorganization of resting-state brain networks associated with motor imagery training in chronic stroke patients [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2019, 27(10): 2237-2245.
  - [66] LEFAUCHEUR J P, ALEMAN A, BAEKEN C, et al. Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS): an update (2014-2018) [J]. Clin Neurophysiol, 2020, 131(2): 474-528.
  - [67] 刘灿欢, 沈滢, 戴文骏, 等. 重复经颅磁刺激提高脑卒中后上肢功能靶点选择和定位的应用进展 [J]. 康复学报, 2024, 34(3): 294-303.
  - LIU C H, SHEN Y, DAI W J, et al. Progress of the target selection and localization of repetitive transcranial magnetic stimulation to improve upper limb function after stroke [J]. Rehabil Med, 2024, 34(3): 294-303.
  - [68] KESER Z, IKRAMUDDIN S, SHEKHAR S, et al. Neuromodulation for post-stroke motor recovery: a narrative review of invasive and non-invasive tools [J]. Curr Neurol Neurosci Rep, 2023, 23(12): 893-906.
  - [69] HU C P, TI C H E, YUAN K, et al. Effects of high-definition tDCS targeting individual motor hotspot with EMG-driven robotic hand training on upper extremity motor function: a pilot randomized controlled trial [J]. J NeuroEngineering Rehabil, 2024, 21(1): 169.
  - [70] BAI Z F, FONG K N K, ZHANG J J, et al. Immediate and long-term effects of BCI-based rehabilitation of the upper extremity after stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. J NeuroEngineering Rehabil, 2020, 17(1): 57.
  - [71] CHEN S G, SHU X K, WANG H W, et al. The differences between motor attempt and motor imagery in brain-computer interface accuracy and event-related desynchronization of patients with hemiplegia [J]. Front Neurobot, 2021, 15: 706630.
  - [72] MANE R, WU Z Z, WANG D. Poststroke motor, cognitive and speech rehabilitation with brain-computer interface: a perspective review [J]. Stroke Vasc Neurol, 2022, 7(6): 541-549.
  - [73] BIASIUCCHI A, LEEB R, ITURRATE I, et al. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke [J]. Nat Commun, 2018, 9: 2421.
  - [74] 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.
  - WU Q, REN S Y, LE Z, et al. Brain-computer interface and comprehensive training for stroke: a resting state functional magnetic resonance imaging study [J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2020, 26(1): 77-84.
  - [75] 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.
- [76] 邹贵娣, 陈小凯, 谭卉虹, 等. 脑机接口结合外骨骼机器人对脑梗死患者手功能障碍的闭环康复效果[J]. 实用医学杂志, 2024, 40(17): 2395-2400.
- ZOU G D, CHEN X K, TAN H H, et al. The clinical efficacy of closed-loop rehabilitation therapy by brain-computer interface combined with exo-skeleton robotic hand for patients with hand dysfunction after cerebral infarction [J]. J Pract Med, 2024, 40(17): 2395-2400.
- [77] 张温冬, 刘晓露, 闫彦宁, 等. 基于运动想象的脑机协同训练联合常规康复治疗对亚急性期脑卒中偏瘫患者的影响[J]. 康复学报, 2025, 35(2): 146-151.
- ZHANG W D, LIU X L, YAN Y N, et al. Clinical efficacy of motor imagery-based brain-computer interface collaborative training combined with conventional rehabilitation therapy on subacute stroke patients with hemiplegia [J]. Rehabil Med, 2025, 35(2): 146-151.
- [78] WU Q, GE Y X, MA D, et al. Analysis of prognostic risk factors determining poor functional recovery after comprehensive rehabilitation including motor-imagery brain-computer interface training in stroke patients: a prospective study [J]. Front Neurol, 2021, 12: 661816.
- [79] 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.
- [80] LI S, FRANCISCO G E, RYMER W Z. A new definition of post-stroke spasticity and the interference of spasticity with motor recovery from acute to chronic stages [J]. Neurorehabil Neural Repair, 2021, 35(7): 601-610.
- [81] OTERO-LUIS I, MARTINEZ-RODRIGO A, CAVERO-REDONDO I, et al. Effect of botulinum toxin injections in the treatment of spasticity of different etiologies: an umbrella review [J]. Pharmaceuticals, 2024, 17(3): 310.
- [82] CABANAS-VALDÉS R, SERRA-LLOBET P, RODRIGUEZ-RUBIO P R, et al. The effectiveness of extracorporeal shock wave therapy for improving upper limb spasticity and functionality in stroke patients: a systematic review and meta-analysis [J]. Clin Rehabil, 2020, 34(9): 1141-1156.
- [83] BRUSOLA G, GARCIA E, ALBOSTA M, et al. Effectiveness of physical therapy interventions on post-stroke spasticity: an umbrella review [J]. NeuroRehabilitation, 2023, 52(3): 349-363.
- [84] CHASIOTIS A, GIANNOPAPAS V, PAPADOPOULOU M, et al. The effect of neuromuscular electrical nerve stimulation in the management of post-stroke spasticity: a scoping review [J]. Cureus, 2022, 14(11): e32001.
- [85] CHEN B, YANG T, LIAO Z, et al. Pathophysiology and management strategies for post-stroke spasticity: an update review [J]. Int J Mol Sci, 2025, 26(1): 406.
- [86] ROSS R, BLAIR S N, ARENA R, et al. Importance of assessing cardiorespiratory fitness in clinical practice: a case for fitness as a clinical vital sign: a scientific statement from the American Heart Association [J]. Circulation, 2016, 134(24): e653-e699.
- [87] FAN Q W, JIA J. Translating research into clinical practice: importance of improving cardiorespiratory fitness in stroke population [J]. Stroke, 2020, 51(1): 361-367.
- [88] DU M H, CHEN L W, LI Y, et al. Effect of exercise-based interventions on stroke rehabilitation: an umbrella review of systematic reviews and meta-analyses [J]. J Neuroeng Rehabil, 2025, 22(1): 240.
- [89] 贾杰. 心肺导的“运动-肌肉-脑”外周中枢网络-康复干预理论的卒中应用及研究进展[J]. 中国卒中杂志, 2022, 17(6): 568-571.
- JIA J. Cardiopulmonary mediated "motion-muscle-brain" peripheral central network: research progress and application of rehabilitation intervention theory for stroke [J]. Chin J Stroke, 2022, 17(6): 568-571.
- [90] MACHADO N, WINGFIELD M, KRAMER S, et al. Maintenance of cardiorespiratory fitness in people with stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. Arch Phys Med Rehabil, 2022, 103(7): 1410-1421. e6.
- [91] SALVALAGGIO S, GIANOLA S, ANDÒ M, et al. Predictive factors and dose-response effect of rehabilitation for upper limb induced recovery after stroke: systematic review with proportional meta-analyses [J]. Physiotherapy, 2024, 125: 101417.
- [92] ZEDDE M, GRISENDI I, ASSENZA F, et al. Stroke-induced secondary neurodegeneration of the corticospinal tract: time course and mechanisms underlying signal changes in conventional and advanced magnetic resonance imaging [J]. J Clin Med, 2024, 13(7): 1969.
- [93] LIN Y H, YAO M C, WU H Y, et al. Environmental enrichment implies GAT-1 as a potential therapeutic target for stroke recovery [J]. Theranostics, 2021, 11(8): 3760-3780.
- [94] ZHANG Z, SUN G Y, DING S. Glial cell line-derived neurotrophic factor and focal ischemic stroke [J]. Neurochem Res, 2021, 46(10): 2638-2650.
- [95] HAYWARD K S, KRAMER S F, DALTON E J, et al. Timing and dose of upper limb motor intervention after stroke: a systematic review [J]. Stroke, 2021, 52(11): 3706-3717.
- [96] DOUMEN S, SORBA L, FEYS P, et al. Efficacy and dose of rehabilitation approaches for severe upper limb impairments and disability during early acute and subacute stroke: a systematic review [J]. Phys Ther, 2023, 103(4): pzad002.

(下转第 298 页)