脑机接口辅助脑卒中后重度上肢瘫痪的康复研究进展

孙 健，张 超*

佳木斯大学附属第一医院 黑龙江佳木斯

【摘要】脑机接口（brain-computer interface, BCI）技术可绕过受损外周通路，通过解码运动意图构建闭环神经反馈，为肢体功能重建提供新路径。本文梳理非侵入式 BCI 核心技术范式与神经修复机制，汇总近年循证证据，从术前评估、心理干预、训练监护、不良事件管控、延续护理等维度总结专项策略，分析现存问题并展望方向，以期为临床护理实践提供参考。

【关键词】脑卒中；脑机接口；重度上肢瘫痪；康复护理

【收稿日期】2026 年 9 月 6 日 【出刊日期】2026 年 10 月 8 日 【DOI】10.12208/j.ijcr.20260485

Advances in brain-computer interface for rehabilitation of patients with severe upper limb paralysis after stroke

*Jian Sun, Chao Zhang**

First Affiliated Hospital of Jiamusi University, Jiamusi, Heilongjiang

【**Abstract**】Patients with severe upper limb paralysis following stroke typically lose the ability to perform active movements, rendering traditional rehabilitation interventions highly limited. Brain-computer interface (BCI) technology bypasses damaged peripheral pathways and enables closed-loop neural feedback by decoding motor intentions, thus offering a novel pathway for restoring limb function. This article reviews core non-invasive BCI paradigms and neural repair mechanisms, summarizes recent evidence-based findings, and outlines specialized strategies across preoperative assessment, psychological intervention, training monitoring, adverse event management, and follow-up care. It also analyzes current challenges and future directions, providing insights for clinical nursing practice.

【**Keywords**】Stroke; Brain-computer interface; Severe upper limb paralysis; Rehabilitation nursing

脑卒中是我国高发高危脑血管疾病，是成年人群致残的首要病因。我国脑卒中患病群体持续增长，发病后 70%～80%的患者遗留肢体运动障碍，其中上肢功能恢复周期更长、预后更差[1]。从全球疾病负担看，上肢功能障碍对患者独立生活能力的影响尤为突出，上肢承担进食、穿衣、洗漱等精细活动，功能重度缺损直接导致患者丧失自理能力，易诱发焦虑抑郁，加重家庭与社会负担[2]。传统康复以 Bobath 技术、关节活动度训练、作业疗法为主，患者多处于被动状态，无法主动激发神经重塑，对重度瘫痪患者效果有限。近五年来，BCI 技术逐步突破传统模式，通过脑电信号建立大脑与外部设备的直接连接，实现“意念驱动”式主动康复，已成为重度肢体康复领域的研究热点。

1 BCI 技术原理及在重度瘫痪中的作用机制

1.1 BCI 基本原理与主流临床范式

BCI 采集并解码大脑神经电信号，进而控制外部康复设备。非侵入式 BCI 依靠头皮电极获取脑电图，安全性高且支持床旁实施，是神经康复的主流类型。临床以运动想象 BCI 应用最多，常联合功能性电刺激、外骨骼机器人或虚拟现实开展训练，多数研究采用每周 5～6 次、单次 20～30 min，周期 2～8 周的干预模式[3]。患者进行运动想象时，感觉运动皮层的 μ、β 节律会发生事件相关去同步化/同步化改变，这是 BCI 识别运动意图的电生理基础。蔡楚杰等[4]认为，无创、适配床旁干预等优势，让 MI-BCI 在脑卒中上肢康复中得到广泛应用。MI-BCI 的核心价值体现在“意念驱动闭

第一作者简介：孙健（1985-）女，汉族，黑龙江佳木斯人，本科，副主任护师，研究方向：内分泌科疾病的预防、治疗、护理；
*通讯作者：张超（1975-）女，汉族，黑龙江佳木斯人，硕士，副教授，研究方向：内科。

环康复”：即便患侧肢体完全无法活动，患者想象抓握、伸展动作，系统解析脑电信号后驱动外骨骼、气动手套或 FES 执行对应动作，构建闭环训练。桑振华等[5]发现，相较于传统康复，BCI 主动干预可帮助重度瘫痪患者突破康复平台，提升训练依从性与主观参与度。

1.2 BCI 促进神经修复的核心机制

BCI 能够促进运动功能恢复，核心是调动大脑神经可塑性发生重塑。开展训练时，运动想象生成的神经信号会触发视觉、触觉、电刺激等多模态反馈，强化受损运动皮层的任务相关激活，调动残存的运动神经网络，推动突触重构与受损神经通路修复。影像学与电生理相关研究都证实，BCI 训练可以激活对侧初级运动区，改善双侧感觉运动网络的功能连接，纠正卒中之后大脑半球之间功能失衡，提高患侧皮层的兴奋性。Liu 等[6]提到，重度瘫痪患者脑电信号稳定性不佳，个体差异也较为突出，BCI 实际应用还存在不少技术局限，但现有证据提示该技术依旧能够为这类康复患者带来额外的运动功能改善。

2 BCI 康复临床应用循证证据

2.1 整体康复疗效

有 Meta 分析结果表明，BCI 干预后患者 Fugl-Meyer 上肢功能评分相比对照组平均提高 3.26 分，亚组分析结果提示，把 BCI 和 FES、康复机器人相结合，康复获益会更为突出[7]。还有相关 Meta 分析也观察到，MI-BCI 可切实改善患者上肢功能以及日常活动能力，短期集中开展训练的效果相对更好。李思慧等[8]开展的系统评价再评价同样支持 BCI 对上肢功能和生活自理能力的积极作用，在各类干预方案中，BCI-FES 联合 tDCS 的治疗效果最好，选择亚急性期开展干预获益更明显。该研究同时也提醒，现有相关文献普遍存在方法学质量不高、研究异质性偏大的问题，暂未发现 BCI 可以有效缓解肢体肌肉痉挛，针对下肢康复的疗效尚且没有统一结论。

2.2 重度弛缓性瘫痪患者专项证据

有研究选取 37 例 BrunnstromI期重度瘫痪患者，随机分为 BCI 干预组与单纯运动想象对照组。结果发现，BCI 组的 FMA-UE 总分、腕手亚项得分以及改良 Barthel 指数均明显优于对照组；单纯运动想象组干预 1 周就进入康复平台，而 BCI 组的功能得分仍保持稳步上升，全部受试者均未出现和设备相关的不良反应。刘璇等[9]的研究也观察到，BCI 搭配上肢康复机器人，有助于促进脑卒中患者上肢运动功能恢复，提升日常活动能力。从安全层面来看，非侵入式 BCI 总体耐受性较好，严重不良事件十分少见，仅部分患者会出现头皮接触性皮炎、训练诱发头痛、视觉疲劳这类轻度不适。

3 重度瘫痪患者 BCI 康复专项护理策略

3.1 训练前评估、心理护理与适应证筛选

保障 BCI 训练安全实施，前期的多维度评估必不可少。开展训练之前，需要从神经功能、认知水平、心理状态、躯体耐受能力，还有影像学预后指标等多个角度完成综合评判，以此筛选适宜人群并排除相关禁忌。BrunnstromI期弛缓性瘫痪患者可优先考虑开展该干预；如果患者存在严重认知障碍、头皮皮肤破损或是癫痫尚未得到有效控制，则不宜实施 BCI 训练。重度肢体失能会对患者造成较大心理打击，心理层面的干预不能只局限于训练初期，需要贯穿整个康复过程。此外还需要做好家属健康宣教，发挥家庭支持作用，在每次训练前后留意患者的情绪变化，情绪问题突出时及时请心理专科介入干预。

3.2 训练中护理配合、安全监护与不良事件管理

在 BCI 训练实施阶段，护理工作需要兼顾皮肤护理、训练引导、疲劳监测以及器械安全多个环节。头皮管理上，训练前使用弱酸性清洁剂清洁头皮，查看有无红肿破损问题；训练结束后彻底清除导电膏残留，降低接触性皮炎发生风险。开展运动想象任务前，安排 2～3 min 的放松训练，训练过程中辅以积极的语言提示，帮助患者维持注意力，防止注意力涣散造成脑电信号紊乱。重度瘫痪患者体能储备有限，训练期间留意患者神态和主观反应，一旦出现头痛、乏力等不适，适当缩短单次训练时长或者直接终止当次训练。当 BCI 搭配外骨骼、FES 设备使用时，要规范设备调试，保证器械松紧适度、限位保护有效，电刺激输出强度控制在患者可承受的范围之内[10]。针对长期卧床的患者，还要同步监测血压和体位改变，警惕体位性低血压、坠床、跌倒等并发症发生。

4 讨论与展望

4.1 护理人员在多学科团队中的角色定位

BCI 康复模式已经跳出以往医师-治疗师二元协作框架，转向多学科共同参与的干预模式。护理人员在其中兼具操作者、管理者与协调者的身份，完整参与患者筛选评估、安全监护、不良事件处置以及后续延续康复指导等各个环节。不过现阶段不少护理人员并未接受过 BCI 相关理论和设备操作的系统化培训，大多只是被动执行工作安排，自身的主动评估、临床判断能力没能得到充分发挥。护士与患者接触最为密切，更容易察觉到患者非言语表达的疲劳状态，也能够较早捕捉训

练带来的情绪变化，但现阶段还缺少适配 BCI 康复场景的专用护理评估量表和沟通流程。后续需要让护理人员更多参与 BCI 康复方案的拟定与动态调整，把护理观察所得的指标作为团队决策参考，逐步完成由单纯辅助配合向协同参与的角色转变。

4.2 临床护理实践优化策略

综合已有研究证据，可从多方面优化临床护理工作。首先要完善 BCI 康复护理的标准化评估体系，整合认知功能、肌张力和疲乏自评等多种评估工具，增设训练前 24 h 的动态复评环节，进一步提升患者筛选的准确性。其次，落实不良事件分级处置预案，出现轻度不良反应时，可由护理人员调整电极佩戴方式、缩短训练时长后再持续观察患者状态。再者按照康复不同时期落实护理：急性期重点做好床旁安全管理和皮肤监护；亚急性期侧重心理疏导和疲劳监测；进入慢性期之后，则重视对家属的健康指导，落实居家康复的远程随访督导。同时建立配套培训考核机制，护理人员考核通过之后方可独立开展相关操作。

4.3 发展局限与未来展望

现阶段 BCI 用于重度上肢瘫痪康复依旧存在不少现实阻碍。技术层面，有 15%～30%的患者属于“BCI 盲”，难以产出稳定可识别的脑电信号，信号解码准确率波动大，直接降低患者康复体验，打击训练信心。伦理方面，脑电数据记录患者神经活动信息，隐私属性突出，目前还没有专门针对 BCI 数据采集、第三方共享的护理伦理规范以及知情同意范本。从经济角度看，BCI 设备购置成本偏高，医保报销渠道尚未完善，很大程度限制该技术在基层、社区机构落地推广。伴随干电极轻量化、自适应解码算法迭代，便携式 BCI 设备不断更新，康复应用场景也会从大型三甲医院逐步下沉到社区康复点甚至家庭环境，助力患者实现肢体功能重建。

5 小结

依托意念驱动的闭环训练模式，BCI 弥补了传统康复手段在重度上肢瘫痪干预上的短板，能够激活大脑神经可塑性，促进神经环路重构，对 BrunnstromI期瘫痪患者有确切康复效果，整体安全性尚可。后续还需要开展更多高质量护理相关研究，补齐标准化操作流程与评估工具，推进 BCI 康复护理规范化落地，为脑卒中重度上肢瘫痪患者的功能恢复与生活质量改善提供支持。

参考文献

[1] 国家卫生健康委脑卒中防治工程专家委员会，吉训明.2024 年中国脑卒中防治报告概要[J].首都医科大学学报,2025,46(6):947-960.

[2] 张霖,郑雅兴,熊桃,等.非侵入式脑机接口技术在脑卒中患者上肢功能康复中应用的范围综述及护理启示[J].中华护理杂志,2025,60(13):1658-1664.

[3] 贺新源,王正辉,夏俊博,等.康复脑机接口与运动想象疗法在卒中弛缓性瘫痪期上肢运动功能康复中的疗效对照研究[J].中国卒中杂志,2025,20(10):1222-1228.

[4] 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.

[5] 桑振华,薛司洋,魏宸铭,等.基于脑机接口的脑血管病后肢体运动功能康复研究进展[J].中国卒中杂志,2025,20(1):63-69.

[6] Liu J, Li Y, Zhao D, et al. Efficacy and safety of brain–computer interface for stroke rehabilitation: an overview of systematic review[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2025, 19: 1502347.

[7] Ali U, Khan J A, Ahsan M T, et al. Brain-computer interfaces in the rehabilitation of stroke and spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis of clinical efficacy[J]. Cureus, 2025, 17(10): e94833.

[8] 李思慧,崔慎红,成小菲,等.运动想象脑机接口训练对脑卒中后上肢功能及日常生活能力影响的 Meta 分析[J].神经损伤与功能重建,2026(2):79-85.

[9] 刘璇,高玲,褚凤明,等.脑机接口联合上肢康复机器人对脑卒中患者上肢功能的影响[J].中国康复理论与实践,2025,31(6):703-710.

[10] Zhai X, Hao Z, Wang X, et al. Effect of brain-computer interface-controlled ankle robot training on post-stroke motor rehabilitation and resting qEEG neuroplasticity: a randomized controlled trial[J]. Neurorehabilitation and Neural Repair, 2026, 40(4): 278-290.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心（OAJRC）所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
OPEN ACCESS