

·XXXX·

非侵入式脑机接口在神经康复临床应用中的专家共识

中国康复医学会脑机接口与康复专业委员会

马骏^{1,2}, 张晶晶¹, 曾明^{1,3}, 单春雷^{1,2,4*}

1 上海交通大学医学院附属同仁医院, 上海 200336;

2 上海交通大学医学院源申康复研究院, 上海 200025;

3 嘉兴大学附属第二医院, 浙江 嘉兴 314001;

4 上海交通大学国家语言与健康研究中心, 上海 200240

* 通信作者: 单春雷, E-mail: shancel@shsmu.edu.cn

收稿日期: 2026-01-12; 接受日期: 2026-02-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(82272612); 上海交通大学医学院源申康复研究院重点项目(y SKF3-23-1107-4)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.XXXX.XX001

摘要 非侵入式脑机接口(BCI)具有安全性高、操作便捷和成本低等优点。基于非侵入式脑机接口的闭环康复模式在脑卒中运动功能康复、意识障碍评估康复等方面具有良好的应用潜力。但是,当前非侵入式BCI在神经系统疾病康复临床实践中存在技术标准缺乏、操作规范不完善、适应证与禁忌证界定不清等问题,影响非侵入式脑机接口的临床实践。本研究旨在制定统一的非侵入式BCI专家共识,指导医疗和研发人员明确其治疗规范和适用范围。本专家共识主要介绍专家共识制定方法、非侵入式BCI在临床康复的应用和临床实践推荐与质量管理要点(适应证与禁忌证,临床实施流程与质量控制,安全监测与不良事件管理,伦理、隐私与数据安全)。重点就非侵入式BCI在脑卒中后运动功能障碍康复、意识障碍康复、言语语言障碍康复、认知障碍康复和其他神经系统疾病中的应用所涉及的具体应用形式、参考刺激参数、参考评定指标、推荐意见、实施要点、证据支持和临床操作要点进行规范,以推动非侵入式BCI在我国康复临床实践中的应用与发展。

关键词 神经康复; 运动功能障碍; 意识障碍; 言语语言障碍; 认知障碍; 非侵入式脑机接口; 循证医学; 专家共识

随着我国人口老龄化加剧,脑血管病变和神经退行性改变等神经系统疾病患病率逐年上升,导致运动、认知、言语和意识等功能障碍的康复需求快速增长。脑机接口(brain computer interface, BCI)是一种在脑与外部设备之间建立信息通道的系统,通过采集与解码脑活动实现意图识别,驱动外部设备并实现闭环反馈与人机交互^[1-2]。近年来,基于非侵入式BCI的闭环康复模式在脑卒中运动功能康

复、意识障碍评估康复等方面展现出较大应用潜力^[3-5]。多项系统评价和Meta分析表明,将BCI与功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)、康复机器人/外骨骼和神经调控等技术联合应用有望进一步提升康复效果^[6-8]。

但是,当前非侵入式BCI在神经系统疾病康复临床转化与应用中存在技术标准缺失、操作规范不足以及适应证与禁忌证界定不清等问题,影响非侵

引用格式: 中国康复医学会脑机接口与康复专业委员会马骏, 张晶晶, 曾明, 等. 非侵入式脑机接口在神经康复临床应用中的专家共识[J]. 康复学报, XXXX, XX(XX): 1-13.

MA Jun, ZHANG Jingjing, ZENG Ming, et al. Expert consensus on the clinical application of non-invasive brain-computer interfaces in neurorehabilitation [J]. Rehabil Med, XXXX, XX(XX): 1-13. DOI: 10.3724/SP.J.1329.XXXX.XX001

入式BCI的临床转化与应用。因此,亟待形成统一的非侵入式BCI专家共识,指导医疗和研发人员明确其治疗规范与适用范围。本共识专家组在已有的研究和实践基础上,结合国内外最新研究成果,对非侵入式BCI在神经系统疾病康复应用现状进行总结、分析,明确非侵入式BCI的技术过程、适应症与禁忌证、干预方式和评价方式,为非侵入式BCI在神经系统疾病康复临床规范化应用提供指导^[9-11]。

1 专家共识制定方法

1.1 组织架构与专家组成

本共识由中国康复医学会脑机接口与康复专业委员会主导,组建多学科专家工作组,成员涵盖康复医学、神经病学、神经外科学、神经工程、生物医学工程、循证医学与医学伦理等领域。专家组负责研究问题确定、证据评估、推荐意见形成及终稿审定。

1.2 文献检索与证据收集

于2025年3—12月开展文献检索,检索数据库包括:PubMed、Embase、Web of Science、Cochrane Library、中国知网、维普和万方数据等数据库。检索主题词或自由词包括“brain-computer interface”“BCI”“neurorehabilitation”“motor recovery”“disorders of consciousness”“speech impairment”“cognitive impairment”等。重点纳入国内外BCI相关指南与专家共识、临床随机对照试验(randomized controlled trial, RCT)、前瞻性队列研究、系统评价与Meta分析等,并参考相关研究管理与伦理规范^[6-13]。由2名研究者独立完成文献筛选与数据提取,如存在分歧,由第3方讨论解决。

1.3 证据质量分级与推荐强度判定

本共识采用GRADE (grading of recommendations assessment, development and evaluation)方法对证据质量与推荐强度进行分级,并参考《中国制订/修订临床诊疗指南的指导原则(2022版)》结合我国临床实践特点进行方法学调整^[14-15]。

1.3.1 证据质量等级 根据研究设计类型、偏倚风险、一致性、直接性、精确性及发表偏倚等因素综合评估,将证据质量分为4级。见表1。

1.3.2 推荐强度 综合考虑以下因素:获益与风险/不良事件平衡、证据质量、患者价值与偏好、资源消耗与可及性、临床可实施性。见表2。

表1 证据质量等级

Table 1 Grade of evidence quality

等级	含义
A(高)	进一步研究极可能不改变当前结论
B(中)	进一步研究可能对结论产生重要影响
C(低)	进一步研究很可能改变结论
D(极低)	证据高度不确定

表2 推荐强度分级

Table 2 Grade of recommendation strength

强度	建议用语	临床含义
强推荐	应/推荐实施	获益明显,推荐常规开展
弱推荐	可考虑实施	获益可能存在,需个体化决策

1.4 推荐意见形成流程

在完成证据汇总后,专家组通过多轮讨论形成推荐意见,最终由全体专家审议通过并定稿。

2 非侵入式BCI在临床康复中的应用

非侵入式BCI是指通过无创的方式采集或调控大脑活动的人机交互系统^[10],与侵入式BCI比较,非侵入式BCI具有安全可靠、临床易用和灵活方便等优点,广泛应用于康复领域,特别是用于脑卒中患者的运动、认知和言语等功能康复^[7-9]。

目前,非侵入式BCI的主要信号来源包括脑电图(electroencephalogram, EEG)和功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)^[11-13]。EEG具有成本低、时间分辨率高、便携等优势,是目前应用最广泛的非侵入式BCI信号来源。fNIRS通过检测脑血氧变化来反映脑代谢活动,具有抗电磁和运动干扰等优势,通过与EEG同步采集及多模态融合,可提高系统稳定性并改善输入信号的时间与空间分辨率^[16]。

完整的非侵入式BCI系统通常包括信号采集、特征提取、信号解码和反馈执行4个部分。目前,常用的EEG设备通道数为4~128,其采样率需满足捕获人体自身电生理节律(如 μ 波、 α 波和 β 波)的需求。信号预处理需剔除眼电、肌电及工频干扰等常见伪迹,以提高EEG信号解码的正确率。解码部分常用功率谱密度(power spectral density, PSD)和共空间模式(common spatial patterns, CSP)等算法提取信号特征^[17-18],并结合或单独使用图卷积神经网络、自注意力机制及大模型等先进机器学习算法构建解码模型,以识别脑电信号^[19]。反馈执行部分决定了系统的干预途径与效果,常见的反馈执行形式有视觉反馈[如图形、光标、虚拟现实(virtual reali-

ty, VR)、听觉反馈(如提示音、语音)、触觉或电刺激反馈(FES)、康复机器人/外骨骼或气动/电动手套等协同反馈,以及多模态闭环神经调控反馈等。研究表明,闭环神经反馈比开环BCI更易诱导神经可塑性,有助于提高训练积极性与康复效率^[20]。

非侵入式BCI主要通过监测与解码相关脑活动,并将结果以视觉、听觉和触觉等形式实时反馈给训练者,构建神经闭环训练框架,从而实现对相关网络的调节并可能促进皮质可塑性^[21]。以运动想象(motor imagery, MI)为例,MI训练结合实时运动反馈执行可帮助受试者维持或增强运动皮质的任务相关激活,促进对受损后残存运动网络的募集与重组,提高神经可塑性与运动功能恢复的潜力。

综上,无创性与可重复性是神经康复中非侵入式BCI的主要特征,为康复干预手段多样化、个性化提供技术基础。但非侵入式BCI系统仍存在分辨率低、信噪比低和模型个体化程度差等技术瓶颈,需进一步优化信号解码算法,并在此基础上设计个体化康复方案。

3 临床应用推荐与质量管理要点

3.1 适应证与禁忌证

3.1.1 适应证推荐 ①脑损伤导致的肢体运动功能障碍。②脑损伤所致意识障碍。③脑损伤所致言语功能障碍。④脑损伤所致轻至中度认知功能障碍。⑤其他神经系统疾病导致的功能障碍,经评估后认为可能获益者。

3.1.2 相对禁忌证 ①经药物治疗仍未控制的癫痫。②严重精神障碍或行为异常,无法配合训练。③头部局部皮肤破损、感染或过敏,影响设备正常运行。④严重视听障碍,无法接受任务范式。⑤体内有植入式电子设备(如心脏起搏器、深部脑刺激器等)。⑥其他经评估不适合BCI训练的状况。

3.2 临床实施流程与质量控制

建议在康复医疗机构建立以下标准化实施流程:

3.2.1 筛查与风险分层 综合评估患者功能障碍类型、病程阶段、感觉运动与认知注意力水平、运动想象能力及身心状态(如疲劳、情绪),实施准入筛查与分层管理。

3.2.2 基线评估与适应证筛选 在常规功能量表评估基础上,按需增设神经电生理或神经影像学检查,以明确BCI康复治疗的适应证与禁忌证。

3.2.3 校准与适配性验证 重点评估信号解码准确率、系统稳定性及个体适配性,以识别并排除无法有效使用BCI的高风险人群。

3.2.4 个性化方案制定 明确训练任务范式、设备反馈形式、联合治疗方案及训练参数(如频率、强度、疗程)。

3.2.5 训练实施 强调自适应参数调节(如动态阈值设定、阶梯式难度进阶)及疲劳反应的实时监测与管理。

3.2.6 评估与随访 定期进行疗效评定;治疗结束后进行结局随访,建议设置4~12周的随访窗口以评估疗效维持情况。

3.2.7 数据管理 建立覆盖原始脑电数据、训练日志、参数配置及不良事件记录的全流程可追溯管理体系。流程构建与伦理/数据管理应参照我国相关专家共识^[9-11]。

3.3 安全监测与不良事件管理

在临床康复中实施非侵入式BCI治疗时,应建立多维度安全监测体系。

3.3.1 不良反应监测 密切关注局部皮肤刺激、疼痛及全身性反应(如头痛、头晕、视觉疲劳、情绪改变及训练相关疲劳)。

3.3.2 特殊人群监护 针对意识障碍或重症患者,需持续监测生命体征稳定性,并评估镇静、镇痛类药物对脑电信号及治疗反应的潜在干扰。建议制定标准化不良事件应对预案:一旦出现不良反应,应立即暂停训练,进行原因分析并优化方案,经重新安全评估后方可考虑是否恢复使用非侵入式BCI治疗。此外,上述潜在风险及替代治疗方案应在治疗前向患者或法定代理人进行充分知情告知^[10-11]。

3.4 伦理、隐私与数据安全

脑机接口技术不仅涵盖脑信号采集与算法解码等工程实现,更涉及知情同意、隐私保护、数据最小化与去标识化处理,以及网络与设备安全等多重伦理、隐私与数据安全维度。因此,开展相关临床研究或引入新技术时,须提交具有多学科背景的伦理委员会进行合规性审查,并严格遵循标准化的研究管理流程。国内已陆续发布脑机接口伦理规范与研究实施共识,可作为重要参考^[10-11]。建议在各机构内部形成一套覆盖全流程的管理闭环,包含设备准入审核、操作人员培训、数据规范管理和定期质量审查等。

4 非侵入式BCI在脑卒中后运动功能障碍康复中的应用

非侵入式BCI康复技术可作为脑卒中后上肢运动功能障碍的辅助干预手段,推荐在亚急性期及慢性期与常规康复干预联合应用。常见模式包括基于MI的EEG-BCI解码运动意图,联动视觉/VR反馈、康复机器人/外骨骼或FES构建闭环训练系统,促进皮质-脊髓通路重建与运动控制恢复^[6-8]。下肢BCI常联合步态训练、康复机器人/外骨骼和电刺激治疗,亦显示出潜在获益,但证据异质性较大^[12]。

4.1 具体应用形式

基于非侵入式BCI的脑卒中运动功能康复体现在MI结合康复机器人/外骨骼等辅助运动装置,该装置通过想象手部抓握或屈伸,提取EEG信号中的 $\alpha(\mu)$ 和 β 节律特征,实现运动意图解码,并控制外骨骼、机械臂、气动/电动手套或FES等末端效应器,实现与运动意图匹配的运动执行。上、下肢肌肉或关节在运动过程中也会产生感觉反馈,从而形成意图-执行-反馈闭环,提升运动皮质兴奋性并诱发正向神经可塑性。此外,还可通过VR的手部运动反馈,使MI控制虚拟运动过程实现多模态反馈,在增强训练趣味性的同时,提高神经可塑性的诱发效率。

4.2 参考刺激参数

在实际操作中,EEG采用4~32个通道,至少包含大脑中央区C3、C4、Cz及其附近通道。信号采样率 ≥ 250 Hz。采用MI训练模式时,提取8~30 Hz频段(即 α 、 β 节律),需滤除电源工频干扰及高频肌肉活动产生的伪迹。

在正式训练前,建议先为每位患者进行个体化的系统校准和基线评估,并记录脑电信号分类的准确率与稳定性。通常来说,分类准确率达到或超过70%,可作为参考标准,表明系统对于该患者适用。

反馈执行的形式可以根据实际情况来选择,常见的有VR场景、屏幕显示的光标、提示音、动力驱动的康复机器人/外骨骼、气动/电动手套、以及FES。若使用FES,其参数可参考:脉冲宽度200~300 μ s,频率20~50 Hz,强度以引起肌肉收缩且患者感觉舒适为宜。

关于训练的时间,建议训练20~30 min/次,3~5次/周,总疗程4~8周(或累计总训练时间达到10~20 h)。实际执行时要依据患者的疲劳程度和注意

力状况,阶梯式地调整训练的难度和强度^[6-8]。

4.3 参考评定指标

采用肢体功能量表[如Fugl-Meyer运动功能评定量表(Fugl-Meyer Assessment Scale, FMA)]、日常生活活动能力量表[如改良Barthel指数(Modified Barthel Index, MBI)]、脑功能网络分析指标(EEG分类准确率);肌电指标(如肌电均方根值);其他主观评定指标[如疼痛视觉模拟评分法(Visual Analogue Scale, VAS)、Borg自觉费力程度量表(Borg Rating of Perceived Exertion Scale, Borg RPE)]评价患者治疗效果。

4.4 推荐意见

对于脑卒中后运动功能障碍的BCI康复治疗,结合现有证据提出如下推荐意见。见表3。

4.4.1 强推荐(证据等级B) 对于上肢运动功能严重障碍,如Fugl-Meyer上肢运动功能评定量表(Fugl-Meyer Assessment for Upper Extremity Scale, FMA-UE)评分 < 40 分的患者,目前证据支持在常规康复基础上,采用MI-BCI联合FES或康复机器人/外骨骼进行闭环训练,有助于改善康复效果^[6-8]。

4.4.2 弱推荐(证据等级C) 对于上肢功能轻度至中度障碍(如FMA-UE评分 ≥ 40 分)的患者,可考虑将BCI与VR或视觉反馈训练结合作为辅助手段,以提高动作精细度及训练参与度。目前直接证据尚不充分,可作为个体化康复的补充方案。

4.4.3 弱推荐(证据等级C) BCI用于下肢步行和平衡功能训练目前尚处于探索阶段,仅建议在具备科研条件、通过伦理审查并制定严密随访计划的机构内谨慎开展^[12]。

无论采用何种方式,训练应在康复医疗人员主导下进行,过程中需工程人员提供设备调试与支持。在制定方案前,应对患者的认知水平和运动想象能力进行评估^[5],必要时应结合神经影像检查,评估患者是否适合BCI训练,为患者制定个体化的康复方案^[22-23]。

4.5 证据支持

系统评价与Meta分析表明,基于EEG的MI-BCI训练在常规康复治疗的基础上,可改善脑卒中患者的上肢运动功能、日常生活活动能力及部分神经电生理指标,该改善不仅在恢复早期存在,对进入慢性期的患者同样有益^[6]。BCI与FES结合改善脑卒中后运动功能的证据相对明确,其优势在于形成了由意念触发肌肉收缩并同步获得电刺激增强

表3 基于非侵入式BCI的脑卒中后运动功能康复治疗推荐意见

Table 3 Recommendations for motor function rehabilitation treatment after stroke based on non-invasive BCI

推荐内容	证据等级	推荐强度
MI-BCI联合FES或机器人用于卒中后上肢中重度运动功能障碍	B	强推荐
MI-BCI联合视觉/VR反馈用于轻中度运动功能障碍	C	弱推荐
BCI用于下肢步行/平衡训练	C	弱推荐

的完整闭环,有效增强了大脑与肢体的感觉-运动联系^[7]。BCI与康复机器人/外骨骼联合训练可增加训练重复剂量并改善主动运动控制^[8]。有系统评价显示,BCI联合多种干预对脑卒中后下肢运动及步行能力具有潜在促进作用,但由于相关研究的样本量普遍较小,且训练方案存在较大差异,仍需更多设计严谨的高质量随机对照试验加以证实^[12]。非侵入式BCI训练的不良事件多为轻度疲劳、头皮不适或视觉疲劳,严重不良事件少见,但由于缺乏长期随访数据,其远期疗效与安全性仍有待持续观察与验证^[4-5]。

4.6 临床操作要点

为确保BCI在康复治疗中安全、有效地应用,建议实施此项工作的机构遵循以下操作要点:①需为患者设定清晰的功能改善目标,如提高上肢活动及手的抓握伸展能力,或完成特定的日常生活任务,并根据目标设计对应的BCI训练任务。②训练开始前,进行个体化的系统校准,记录脑信号分类在单次训练内及不同日期间的稳定性。③训练过程中需随时关注患者的注意力集中情况及疲劳程度,必要时可以缩短单次训练时长、增加休息。④为避免训练脱离实际功能,需将BCI训练与常规作业疗法或功能任务训练结合起来。⑤疗效评价时,建议使用统一的功能评定量表,在预定时间点进行规范的评定与随访。⑥所有发生的不良反应事件及设备故障均应详细记录并按规定上报。⑦机构需对相关人员进行规范化培训,做好设备的日常维护保养,确保所有治疗数据可以追溯,严格遵守患者隐私保护的相关规定^[9-11]。

5 非侵入式BCI在意识障碍康复中的应用

非侵入式BCI能够检测昏迷患者的意识水平,通过头皮EEG反映意识障碍(disorders of consciousness, DoC)患者大脑对外界声音、图像、感觉刺激等是否存在反应,评估患者意识状态和残存认知能力^[9]。此外,也可初步用于DoC患者结局预测、替代性沟通和意识水平提升的干预手段^[9,21,24]。非侵入

式BCI用于意识障碍康复领域的研究仍处于初步阶段,现有证据尚不充足,需进一步积累以支持其临床应用。

在考虑使用BCI之前,应首先遵循临床实践指南(如美国神经病学学会、美国康复医学会和美国国家残疾、独立生活和康复研究所发布的指南),使用昏迷恢复量表修订版(Coma Recovery Scale-Revised, CRS-R)对患者进行意识障碍的评估^[25],该量表需重复多次以达更准确评估目的。同时排除镇静状态、癫痫活动、代谢异常以及可能影响刺激感知与反应通路的感觉功能障碍(如视觉、听觉或体感输入受损)等因素对精准BCI评估的干扰。

5.1 具体应用形式

基于BCI的意识检测与辅助诊断通过解码大脑活动,在大脑与外部之间建立了一条不依赖神经肌肉的通信路径^[26],基于EEG的BCI具有成本低、结构紧凑、能实时反馈等优势,适用于床旁环境。BCI在意识障碍诊疗中的核心机制与应用策略如下:BCI通过诱发特异性脑电信号[如事件相关电位(event-related potential, ERP)、稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potential, SSVEP)、感觉运动节律(sensorimotor rhythm, SMR)],检测昏迷、微意识状态(minimally conscious state, MCS)等患者的残余意识水平与信息处理能力^[9,27],为临床评估提供客观依据。其中,命令遵循是鉴别植物状态与微意识状态的关键神经行为学指标。通过BCI检测患者按指令完成认知任务并诱发任务相关脑电响应,可客观证实其保留语言理解与意志性认知加工能力,为残余意识的存在提供神经生理学证据。常见范式包括:

5.1.1 听觉Oddball范式 以小概率目标听觉刺激(如特定频率纯音)与大概率标准刺激(如低频纯音)随机呈现,诱发失匹配负波(mismatch negativity, MMN),通过检测该电位是否存在及其波幅与潜伏期,判断患者是否存在残余意识。

5.1.2 视觉Oddball范式 采用小概率目标视觉刺激(如红色图形)与大概率标准刺激(如蓝色图形)

交替闪烁,诱发视觉P300或N200电位,适用于能睁眼的意识障碍患者。

5.1.3 多模态联合范式 振动触觉主动Oddball是最常用的刺激传递方式,采用2种或3种刺激序列呈现^[24];结合听觉Oddball与视觉刺激,同步采集脑电信号,可提高残余意识检出率,尤其适用于对单一模态刺激无明显反应的患者^[28]。基于听觉和振动触觉刺激,可同时诱发听觉诱发电位和体感诱发电位,分析P300反应数据在3种刺激范式(单一听觉、单一触觉、多模态听觉—触觉)下的差异化响应也可判断意识是否存在^[29]。

将BCI系统作为DoC患者的替代性沟通渠道及康复治疗工具,目前研究仍处于初步阶段。用于沟通的BCI主要依赖P300(包括单独使用或与其他脑信号结合使用),虽已显示出一定的积极结果,但有研究尝试基于运动想象的BCI进行沟通测试,所有DoC患者均未实现有效沟通^[30];对DoC患者进行治疗性任务训练时,宜采用更广泛的感官刺激方式,以应对患者可能存在的特定感觉缺失(如听觉通路损伤、视觉障碍、眼动功能受限等)。构建基于多感官模态的BCI系统可提供更丰富的通路,增加指令的可传达性,并提升患者对任务的感知和响应能力。常见范式包括振动触觉P300范式和视听P300范式。

5.1.3.1 振动触觉P300范式 患者2只手腕和1只脚上放置触觉振动器,系统随机选择一个振动器作为目标,受试者需计数目标位置振动器产生刺激的次数并忽略非目标刺激。部分对行为评估无反应的患者在BCI评估中表现出指令遵从能力,经治疗后其最佳分类准确率得以提高^[31-32],甚至可回答一些个人问题^[33]。

5.1.3.2 视听P300范式 采用语义一致的视听刺激,即“是”与“否”对应。向DoC患者提出情境导向性问题后,电脑屏幕上会出现两个闪烁按钮,分别显示中文“是”与“否”。当按钮闪烁时,系统同步播放对应的“是”或“否”语音。指导患者选择性注视与问题正确答案(“是”或“否”)对应的闪烁按钮及语音。BCI系统通过检测ERP(如P300)来判定患者的选择,检测结果以实时反馈形式呈现。DoC患者使用此范式进行沟通评估时,其分类准确度超越了随机概率水平,表明患者具备沟通潜力^[34]。

5.2 参考刺激参数

BCI参数为8~32通道EEG采集设备(包括Pz、

Cz和Fz等通道),信号采样率 ≥ 250 Hz,滤波带通为0.1~30 Hz(P300)和5~20 Hz(SSVEP),Oddball试验中,靶目标刺激与非靶目标刺激的概率比例为1:4,刺激间隔为1~2 s;SSVEP刺激频率为6~12 Hz,每轮持续3~5 s;每次训练时间为15~20 min,训练频率3~4次/周,训练周期为4~6周;在振动触觉P300试验中,每次运行包含480次刺激,分为60组,每组8次刺激,每个振动触觉刺激持续100 ms,刺激间隔为100 ms,每次运行整个范式约需2.5 min;视听P300试验中,研究人员向患者提问2次,问题对应词汇的音频播放强度为65 dB,每个视听刺激呈现5次,每次持续300 ms,每2个相邻视听刺激之间的时间间隔从700、900、1 100、1 300和1 500ms中随机选择,在2轮视听刺激后,检测到目标,则播放掌声声音并显示检测结果作为反馈,持续4s;否则,屏幕上显示1个十字,持续4 s。基于患者的觉醒水平,整个测试周期持续1~2周。

5.3 参考评定指标

使用CRS-R判断意识状态;脑电参数为MMN波幅、PSD能量值、SSVEP分类准确率;临床反馈为患者家属描述意识状态变化(眨眼、微表情)^[35]。

5.4 推荐意见

基于非侵入式BCI的意识障碍康复治疗推荐见表4。

5.4.1 弱推荐(证据等级B) 对于经规范神经行为学评估(如CRS-R)后仍存在意识水平不确定的意识障碍患者(如微意识状态、植物状态),可考虑采用听觉Oddball范式的非侵入式EEG-BCI作为残余意识评估的辅助工具,以提高对微意识状态的识别能力^[36-37]。

5.4.2 弱推荐(证据等级C) 当听觉Oddball范式未能检测到明确反应时,可在多次评估和多模态证据整合的前提下,尝试振动触觉主动Oddball或视觉Oddball作为补充评估手段。多模态联合刺激范式及BCI联合神经调控的干预方案,目前仍处于探索阶段,建议在多学科协作下开展小样本研究^[36,38]。

5.4.3 强推荐(证据等级A) 非侵入式BCI评估结果不应单独作为意识状态分级、预后判断或治疗决策的依据,应始终结合重复的神经行为学评估和其他神经影像或电生理证据综合判断。

5.4.4 弱推荐(证据等级C) 振动触觉P300范式作为DoC患者沟通能力评估时,部分试验研究未能取得一致性结果,接受测试的患者未达到令人满意

且具有功能性的通信速率^[30,39]。需要进一步研究。

5.4.5 弱推荐(证据等级C) 视听P300范式在DoC患者沟通能力评估中,部分试验患者的分类准确率

未达到适合通信的60%正确率^[40],但仍需进一步验证。

表4 基于非侵入式BCI的意识障碍康复治疗推荐意见

Table 4 Recommendations for consciousness disorder rehabilitation treatment based on non-invasive BCI

推荐内容	证据等级	推荐强度
听觉Oddball范式EEG-BCI可辅助评估意识水平不明确患者的残余意识	B	弱推荐
视觉Oddball可在多模态证据整合基础上作为补充评估手段	C	弱推荐
非侵入式BCI结果不应单独用于意识分级、预后判断或治疗决策	A	强推荐
振动触觉P300范式用于意识障碍患者的沟通评估和交流	C	弱推荐
视听P300范式用于意识障碍患者的沟通评估和交流	C	弱推荐

5.5 实施要点

首先需保证患者可以接收到视、听觉刺激,其次要保证对环境干扰的控制,每次训练建议20~30 min,且要保证充足的休息。如果没有检测到阳性反应,建议在不同的日期重复测试或更换不同的BCI任务模式,尽量减少假阴性结果。

5.6 证据支持

研究表明,基于P300和SSVEP范式的BCI在健康人群中通常具有较高识别率,并已应用于闭锁综合征(意识保留但运动输出受限)患者的辅助沟通,以及用于DoC患者的意识检测和潜在沟通^[24]。但是在DoC患者中,由于意识与注意力水平波动、感觉通路可能受损以及药物等因素影响,BCI识别效果差异较大^[25]。DoC临床实践指南指出,阴性结果不能可靠地排除意识存在,尤其在行为反应不稳定及评估受其他因素影响时,应结合序列评估和多模态证据综合判断;该指南推荐在进行规范的神经行为学检查的基础上,在不同时间点进行多次BCI检测,并与其他多模态检查结果综合判断^[24]。

5.7 临床操作要点

DoC患者应用BCI时,为确保安全与合理实施,需注意以下几点:①首先需保证患者生命体征稳定,处理好呼吸问题、感染问题、癫痫问题、营养支持等基础医疗问题及并发症。②考虑使用BCI前,应对患者的视觉和听觉通路功能以及基本觉醒水平进行评估。如有必要,可使用眼动跟踪、听觉诱发电位等检查进行辅助。③对于病情较重的患者,建议在有监护条件的环境中进行BCI评估或训练,同时记录患者所服用的药物、患者的睡眠-觉醒周期、训练的具体时间。④若患者存在癫痫发作风险或疑似存在脑电异常放电,建议在操作过程中同步开展EEG监测,同时避免使用可能诱发癫痫发作的

高频闪烁视觉刺激。⑤BCI检测结果存在不确定性,应充分与患者家属沟通,说明该技术的局限性及结果解释范围,避免造成误解。

6 非侵入式BCI在言语与语言障碍康复中的应用

非侵入式BCI在言语与语言障碍康复中的应用主要包括2类:①作为辅助与替代沟通工具,利用P300/SSVEP等范式实现字符选择或指令输入,替代言语沟通。②作为促进语言网络重塑的神经反馈训练手段,通过P300、N400等ERP的实时反馈,结合语言训练任务促进语言功能的恢复。目前证据主要集中于脑卒中后失语症与构音障碍,但整体仍处于临床探索阶段,建议在规范语言治疗基础上将其作为增益手段,并优先在具备评估与随访能力的机构开展^[41-42]。

6.1 具体应用形式

非侵入式BCI P300/SSVEP言语康复范式通过字符矩阵随机闪烁目标字符以诱发P300电位,或以不同频率闪烁的字符以诱发SSVEP,通过解码信号识别患者的选择意图,通过屏幕呈现内容以替代言语表达。语义判断采用N400成分(潜伏期400~600 ms),当词语或句子与语境不匹配时,会诱发更大的N400负波,通过其振幅差异判断语义匹配是否成立,用于语义加工训练。

6.2 参考刺激参数

BCI参数采用8~16通道EEG采集设备(包括Fz、Cz、Pz、T3、T4等通道),信号采样率 ≥ 250 Hz,滤波带通为0.1~30 Hz(P300、N400),P300-Speller刺激闪烁频率为5~10 Hz,时间间隔300~500 ms。

6.3 参考评定指标

功能评定量表包括西方失语症成套测验(Western Aphasia Battery, WAB)、波士顿命名测验(Bos-

ton Naming Test, BNT)和Frenchay构音障碍检查量表;脑电图评价指标为P300、N400波幅和EEG分类正确率。

6.4 推荐意见

对于脑卒中后言语语言障碍的康复,BCI可作为一种探索性辅助手段。见表5。

6.4.1 弱推荐(证据等级C) 对于脑卒中后存在严重表达性障碍、且常规言语沟通手段受限的患者,可考虑采用基于P300或SSVEP的非侵入式BCI作

为辅助或替代沟通工具,以满足基本交流需求。此类应用应与常规辅助沟通策略联合使用,而不应替代系统的言语语言治疗^[41-42]。

6.4.2 弱推荐(证据等级C) 若采用基于P300或N400等脑电成分的脑语言网络重塑训练,必须与任务导向的语言治疗(如命名、语义判断、句子理解训练等)紧密结合。训练安排3~5次/周,每次20~30 min/次,持续时间至少6周。在训练过程中,应根据患者反应动态调整刺激强度和任务难度。

表5 基于非侵入式BCI的言语康复治疗推荐意见

Table 5 Recommendations for speech rehabilitation treatment based on non-invasive BCI

推荐内容	证据等级	推荐强度
P300或SSVEP-BCI可作为严重表达性障碍患者的辅助沟通工具	C	弱推荐
语言相关BCI训练应与任务导向的言语治疗联合实施	C	弱推荐

6.5 证据支持

BCI在失语症康复中的研究多采用P300-Speller或ERP神经反馈训练,研究表明BCI可改善命名、理解与交流效率,但存在样本量小、方案差异大等问题,需更多高质量试验验证^[41]。适配视觉P300-BCI的长期训练可带来一定的语言表现改善,但其特异性仍需进一步证实^[42]。研究表明,高强度BCI辅助语言训练有助于提升言语流畅性及句子理解能力^[43-44]。

位置需覆盖额叶和顶叶的若干点位(例如F3、F4、Fz、Pz等),信号采样率 ≥ 250 Hz,可根据康复目标,选择 θ 波或 β 波等作为实时反馈的目标,整个过程需注意去除眼动、肌电等干扰信号。若使用任务训练模式(n-back、Stroop等),一般15~30 min/次,3~5次/周。若采用直接神经反馈训练,建议累计总训练时长 ≥ 300 min。实际训练中,应根据患者实时的疲劳感和任务难度,分段训练,阶梯式调整训练难度^[45]。

7 非侵入式BCI在认知障碍康复中的应用

非侵入式BCI在认知障碍康复中的核心思想是基于ERP的实时反馈或任务相关意图识别,引导患者调控与注意、工作记忆及执行控制相关的脑网络。常见训练包括n-back、Stroop、持续性注意任务及VR-BCI空间认知任务等。现有证据多来自针对老年人群、轻度认知障碍及早期阿尔茨海默病的神经反馈研究,脑卒中后认知障碍与脑外伤后认知障碍的证据相对有限,建议遵循以常规认知康复为基础、BCI神经反馈为增益的原则^[45-46]。

7.3 参考评定指标

功能评估采用蒙特利尔认知评估(Montreal Cognitive Assessment, MoCA)和简易智力状态检查(Mini-Mental State Examination, MMSE)。脑电图测量指标包括 θ 节律和 γ 节律的功率谱密度和任务识别的正确率。

7.1 具体应用形式

采用n-back任务用于认知障碍的康复,包括1-back或2-back;分析前额叶 θ 或 γ 节律,实时反馈注意程度;采用Stroop色-词干扰任务,基于前额叶EEG节律变化评估控制水平;采用VR-BCI空间认知任务,佩戴VR头盔或眼镜,执行空间导航任务,检测 α 、 β 、 γ 节律。

7.4 推荐意见

基于非侵入式BCI的认知障碍康复治疗推荐见表6。

7.2 参考刺激参数

一般使用4~16个通道的脑电图采集设备,电极

7.4.1 弱推荐(证据等级C) 对于轻中度认知障碍(如MoCA评分为18~25分,需结合教育年限校正)且主要表现为注意力或工作记忆下降的患者,可在常规认知训练基础上,谨慎考虑加入基于EEG的神经反馈训练,例如学习调节 α 、 θ 或感觉运动节律(sensorimotor rhythm, SMR),或采用结合特定认知任务的BCI训练,以提高训练专注度和参与度,并促进大脑功能重塑^[45-46]。

7.4.2 弱推荐(证据等级C) 将VR与BCI结合用于空间认知训练,目前仍处于探索阶段,可尝试用于轻度认知障碍患者。操作时需要注意控制VR环境可能带来的眩晕感,并合理设定任务难度,避免

给患者造成过大的认知负担。如果开展此类训练,建议进行至少4~12周随访以观察效果。对于脑卒中后认知障碍、注意缺陷障碍等特定人群的相关应用,目前建议主要在研究项目框架内进行探索,并需要规范地记录和报告训练后的各项结果。

7.4.3 弱推荐(证据等级C) 建议在脑卒中、轻度认知障碍和阿尔茨海默病患者中,应用脑电图神经反馈训练(electroencephalogram neurofeedback training, EEG-NFT)改善注意和记忆能力,且总训练时长应>300 min。

表6 基于非侵入式BCI的认知障碍康复治疗推荐意见

Table 6 Recommendations for cognitive impairment rehabilitation treatment based on non-invasive BCI

推荐内容	证据等级	推荐强度
对于轻中度认知障碍患者,可在常规认知训练基础上,谨慎联合基于EEG的神经反馈或任务相关BCI训练	C	弱推荐
VR联合BCI空间认知训练用于轻度认知障碍患者	C	弱推荐
在脑卒中、轻度认知障碍及阿尔茨海默病患者中,可考虑采用EEG神经反馈疗法	C	弱推荐

7.5 证据支持

Meta分析显示,EEG神经反馈可在老年及MCI人群中改善工作记忆与情景记忆,且总训练时间较长(如>300 min)时效果更稳定^[45];针对MCI与AD的综述提示神经反馈可能带来认知改善,但研究质量参差不齐且结局指标不统一,需更高质量随机对照研究^[46]。目前认知障碍的BCI证据多为小样本研究和算法研究^[47-49]。有Meta分析显示,EEG-NFT可在老年及MCI人群中改善工作记忆与情景记忆,且当总训练时长>300 min时效果更稳定^[45]。

8 非侵入式BCI在其他神经系统疾病康复中的应用

非侵入式BCI可用于辅助交流或替代运动功能,应用于肌萎缩侧索硬化症(amyotrophic lateral sclerosis, ALS)和帕金森病(Parkinson's disease, PD)患者。

8.1 具体应用形式

非侵入式BCI应用于其他神经系统疾病主要包括:①用于ALS的交流BCI,通过P300-Speller系统使患者注视字母矩阵以在电脑屏幕上输出字母进行交流。②用于PD的运动补偿BCI,通过MI-BCI和FES刺激下肢肌肉以改善步态。

8.2 参考刺激参数

参考BCI参数包括8~16通道EEG采集设备(包括Fz、Pz、C3/C4等通道),信号采样率≥250 Hz;滤波带通0.1~30 Hz;P300刺激频率5~10 Hz;FES频率20~40 Hz,脉宽200~300 μs,电流5~20 mA;Go/No-Go间隔1~2 s;训练频率3~4次/周、持续时间15~20 min/次、训练周期4~6周。

8.3 参考评定指标

功能评估采用ALS和PD的常用量表,如ALS功能评定量表修订版、国际运动障碍学会统一帕金森病评定量表。脑电测量指标包括P300波幅、MI事件相关去同步(event-related desynchronization, ERD)激活值和EEG分类准确率。

8.4 推荐意见

基于非侵入式BCI的ALS和PD康复治疗推荐见表7。

8.4.1 弱推荐(证据等级C) 对于ALS等严重运动功能受限但视觉和注意功能相对保留的患者,可考虑采用基于P300的非侵入式BCI作为辅助沟通手段。

8.4.2 弱推荐(证据等级C) 对于PD患者,BCI训练可作为药物治疗的辅助手段,用于步态补偿或运动功能训练,但实施前需评估震颤等运动症状对信号质量的影响,并在训练中密切监测。

表7 基于非侵入式BCI的ALS和PD康复治疗推荐意见

Table 7 Recommendations for rehabilitation treatment of ALS and PD based on non-invasive BCI

推荐内容	证据等级	推荐强度
对ALS等严重运动受限但视觉和注意功能相对保留的患者,可采用非侵入式BCI作为辅助沟通手段	C	弱推荐
对PD患者,非侵入式BCI可用于步态或运动训练	C	弱推荐

8.5 证据支持

研究发现ALS患者随疾病进展会逐渐丧失言

语和肢体交流能力。基于EEG的非侵入式BCI可为ALS患者提供一种比传统P300视觉拼写器更有效

的辅助沟通方式^[50]。此外,对于PD患者,BCI在PD康复中的应用仍处于探索阶段。有研究阐述了基于EEG的非侵入式BCI在PD患者的运动想象训练、神经反馈及认知干预中显示出一定的功能改善潜力,但相关研究样本量小,尚缺乏高质量随机对照试验支持其疗效^[51]。

9 总结与展望

非侵入式BCI在神经系统疾病康复领域具有值得期待的应用前景。对于脑卒中患者肢体运动功能的恢复,非侵入式BCI可作为常规康复治疗的有益补充。当BCI与FES、康复机器人/外骨骼等技术形成闭环联合训练时,患者获益更大^[6-8,12]。在意识障碍评估、言语语言障碍治疗、轻度认知障碍治疗等方面,BCI同样显示出初步潜力,但其整体证据质量仍不高,在评估和长期随访框架内谨慎开展与应用显得十分必要^[24-42,45-46]。本专家共识增添了证据等级、推荐强度、临床执行路径和风险管理与伦理规范等内容,以推动脑机接口在我国康复临床实践中的应用与发展,从最初可以使用的阶段朝着可规范复制、有效质控的阶段迈进。

非侵入式BCI康复预计重点朝着以下方向演进:①技术的可用性和稳定性加强:基于EEG、fNIRS以及眼动信号等的多模态BCI临床可用的设备增多,解码可靠性增强^[52]。②治疗的个性化、智能化提升:依托自适应算法与人工智能技术,有望为患者制定个性化方案,并可在治疗中智能地自适应调整治疗相关参数^[53]。③标志物筛选与最优治疗方案:建立用于人群分层与疗效预测的神经电生理、影像学或BCI可用性等标志物体系,明确联合干预的关键要素与最优组合。④拓展家庭和远程应用:开发家庭和远程康复轻量化BCI设备,建立隐私保护与伦理合规的数据体系^[10-11]。⑤积累本土化高级证据:开展多中心注册登记和真实世界研究,形成中国人群疗效-安全性证据和卫生经济学评价,为将来制订行业标准和相关医保支付政策提供重要证据。

本共识制订专家组名单(按姓氏笔画排序):

丁晶(复旦大学附属中山医院)、马骏(上海交通大学医学院源申康复研究院)、王长明(首都医科大学临床工程系)、王永慧(山东大学齐鲁医院)、王羽(上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院)、王浩冲(西安臻泰智能科技有限公司)、王继先(上海

交通大学医学院附属瑞金医院)、王萍芝(山西白求恩医院)、王隼(上海交通大学医学院康复研究院)、王毅军(中国科学院半导体研究所)、毛雅君(浙江中医药大学附属第一医院)、方珉(上海交通大学医学院附属同仁医院)、尹勇(云南大学附属医院)、叶青(浙江省人民医院)、叶祥明(浙江省人民医院)、白玉龙(复旦大学附属华山医院)、白洋(南昌大学附属康复医院)、冯海霞(甘肃省康复中心医院)、司霄鹏(天津大学)、朱红军(苏州大学附属第一医院)、伏云发(昆明理工大学)、任萌(杭州职业技术大学)、任彩丽(无锡市中心康复医院)、刘书朋(上海大学通信与信息工程学院)、江宁(四川大学华西医院)、李贞兰(吉林大学第一医院)、李金贤(新疆维吾尔自治区人民医院)、李艳(上海交通大学医学院附属同仁医院)、李源莉(上海中医药大学中医智能康复教育部工程研究中心)、李增勇(国家康复辅具研究中心)、杨帮华(上海大学机电工程与自动化学院)、吴文(南方医科大学珠江医院)、吴勤峰(同济大学附属普陀人民医院)、吴霜(贵州医科大学附属第一医院)、余波(上海杉达学院)、沈洁(上海市第八人民医院)、张晶晶(上海交通大学医学院附属同仁医院)、张腾宇(国家康复辅具研究中心)、陈小刚(中国医学科学院生物医学工程研究所)、陈仁吉(首都医科大学附属北京口腔医院)、陈文莉(东南大学附属中大医院)、陈松美(上海市第三康复医院)、陈树耿(复旦大学附属华山医院)、陈健(上海市徐汇区田林街道社区卫生服务中心)、武佳丽(上海交通大学医学院附属同仁医院)、茅慧雯(上海交通大学医学院附属同仁医院)、林诚(福建医科大学)、林强(中山大学附属第七医院)、欧海宁(广东省中医院)、周欢霞(上海中医药大学附属第七人民医院)、周钰(宁夏回族自治区人民医院)、郑伟龙(上海交通大学)、单春雷(上海交通大学医学院源申康复研究院)、项洁(徐州医科大学附属医院)、赵敬璞(深圳市第二人民医院)、钟燕彪(赣南医科大学第一附属医院)、侯景明(陆军军医大学第一附属医院)、洪文军(南京大学医学院附属鼓楼医院)、徐蓉(南京大学医学院附属鼓楼医院)、徐慧(上海交通大学医学院附属同仁医院)、高郑润(蚌埠医科大学)、唐敏(宁波市康复医院)、梁九兴(华南师范大学)、隋晓红(上海交通大学)、董献文(郑州大学第五附属医院)、舒锦(上海市北医院)、曾明(嘉兴大学附属第二医院)、谢平(燕山大学生命健康与智能

医学院)、潘家辉(华南师范大学)、薛夏琰(上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院)、霍明(康复大学康复科学与工程学院)

参考文献

- [1] VÄRBU K, MUHAMMAD N, MUHAMMAD Y. Past, present, and future of EEG-based BCI applications[J]. *Sensors*, 2022, 22(9):3331.
- [2] SLUTZKY M W, VANSTEENSEL M J, HERFF C, et al. A brain-computer interface working definition[J]. *Nat Biomed Eng*, 2025, 9(6):792.
- [3] DALY J J, WOLPAW J R. Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation[J]. *Lancet Neurol*, 2008, 7(11):1032-1043.
- [4] MIKOŁAJEWSKA E, MIKOŁAJEWSKI D. Non-invasive EEG-based brain-computer interfaces in patients with disorders of consciousness[J]. *Mil Med Res*, 2014, 1(1):14.
- [5] KRUSE A, SUICA Z, TAEYMANS J, et al. Effect of brain-computer interface training based on non-invasive electroencephalography using motor imagery on functional recovery after stroke—a systematic review and meta-analysis[J]. *BMC Neurol*, 2020, 20(1):385.
- [6] LI D, LI R Y, SONG Y P, et al. Effects of brain-computer interface based training on post-stroke upper-limb rehabilitation: a meta-analysis[J]. *J NeuroEngineering Rehabil*, 2025, 22(1):44.
- [7] REN C L, LI X M, GAO Q, et al. The effect of brain-computer interface controlled functional electrical stimulation training on rehabilitation of upper limb after stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *Front Hum Neurosci*, 2024, 18:1438095.
- [8] QU H, ZENG F X, TANG Y B, et al. The clinical effects of brain-computer interface with robot on upper-limb function for post-stroke rehabilitation: a meta-analysis and systematic review[J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2024, 19(1):30-41.
- [9] 上海市医学会脑电图与临床神经生理专科分会. 基于头皮脑电信号的无创脑机接口在神经系统疾病中的临床应用上海专家共识[J]. *上海医学*, 2024, 47(4):199-213.
Electroencephalogram and Clinical Neurophysiology Branch of Shanghai Medical Association. Shanghai expert consensus on the clinical application of non-invasive brain computer interface based on scalp electroencephalography in neurological diseases[J]. *Shanghai Med J*, 2024, 47(4):199-213.
- [10] 中华医学会神经外科学分会, 中国卒中学会脑血管外科分会. 神经系统疾病脑机接口临床研究实施与管理的中国专家共识[J]. *中华医学杂志*, 2024, 104(23):2105-2112.
Society of Neurosurgery of Chinese Medical Association, Society of Cerebrovascular Surgery of Chinese Stroke Association. Chinese expert consensus on implementation and management of brain-computer interface clinical research in neurological diseases[J]. *Natl Med J China*, 2024, 104(23):2105-2112.
- [11] 北京大学第六医院, 北京医学伦理学会. 涉及脑机接口临床研究的多学科伦理审查专家共识[J]. *中国医学伦理学*, 2024, 37(9):1119-1125.
Peking University Sixth Hospital, Beijing Medical Ethics Committee. Expert consensus on multidisciplinary ethical review of clinical research involving brain-computer interfaces[J]. *Chin Med Ethics*, 2024, 37(9):1119-1125.
- [12] GUO X Z, LI P, LIU H R, et al. A systematic review of the effects of brain-computer interface on lower limb motor function, balance function, and activities of daily living in stroke patients[J]. *Front Neurosci*, 2026, 19:1641843.
- [13] SUN Z J, HU S, ZHU J J, et al. The impact of non-invasive brain-computer interface technology on the therapeutic effect of patients with spinal cord injury: a summary of evidence based on meta-analysis[J]. *J NeuroEngineering Rehabil*, 2025, 22(1):250.
- [14] 陈耀龙, 杨克虎, 王小钦, 等. 中国制订/修订临床诊疗指南的指导原则(2022版)[J]. *中华医学杂志*, 2022, 102(10):697-703.
CHEN Y L, YANG K H, WANG X Q, et al. Guiding principles for formulating/revising clinical diagnosis and treatment guidelines in China (2022 edition)[J]. *Natl Med J China*, 2022, 102(10):697-703.
- [15] GUYATT G, OXMAN A, VIST G, et al. GRADE: 证据质量和推荐强度分级的共识[J]. *中国循证医学杂志*, 2009, 9(1):8-11.
GUYATT G, OXMAN A, VIST G, et al. GRADE: an emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations[J]. *Chin J Evid Based Med*, 2009, 9(1):8-11.
- [16] GALLEGO-MOLINA N J, ORTIZ A, MARTÍNEZ-MURCIA F J, et al. Multimodal integration of EEG and near-infrared spectroscopy for robust cross-frequency coupling estimation[J]. *Int J Neur Syst*, 2025, 35(6):2550028.
- [17] KIM C, SUN J W, LIU D, et al. An effective feature extraction method by power spectral density of EEG signal for 2-class motor imagery-based BCI[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2018, 56(9):1645-1658.
- [18] KOLES Z J, LAZAR M S, ZHOU S Z. Spatial patterns underlying population differences in the background EEG[J]. *Brain Topogr*, 1990, 2(4):275-284.
- [19] XUE Q W, SONG Y T, WU H P, et al. Graph neural network based on brain inspired forward-forward mechanism for motor imagery classification in brain-computer interfaces[J]. *Front Neurosci*, 2024, 18:1309594.
- [20] JIN W J, ZHU X X, QIAN L F, et al. Electroencephalogram-based adaptive closed-loop brain-computer interface in neurorehabilitation: a review[J]. *Front Comput Neurosci*, 2024, 18:1431815.
- [21] LIU X Y, WANG W L, LIU M, et al. Recent applications of EEG-based brain-computer-interface in the medical field[J]. *Mil Med Res*, 2025, 12(1):14.
- [22] SONG J, NAIR V A, YOUNG B M, et al. DTI measures track and predict motor function outcomes in stroke rehabilitation uti-

- lizing BCI technology[J]. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 195.
- [23] CARIA A, WEBER C, BRÖTZ D, et al. Chronic stroke recovery after combined BCI training and physiotherapy: a case report[J]. *Psychophysiology*, 2011, 48(4):578-582.
- [24] GALIOTTA V, QUATTROCIOCCI I, D'IPPOLITO M, et al. EEG-based Brain-Computer Interfaces for people with Disorders of Consciousness: Features and applications. A systematic review [J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16:1040816.
- [25] GIACINO J T, KATZ D I, SCHIFF N D, et al. Practice guideline update recommendations summary: Disorders of consciousness: Report of the Guideline Development, Dissemination, and Implementation Subcommittee of the American Academy of Neurology; the American Congress of Rehabilitation Medicine; and the National Institute on Disability, Independent Living, and Rehabilitation Research[J]. *Neurology*, 2018, 91(10):450-460.
- [26] HE Q H, HE J H, YANG Y, et al. Brain-computer interfaces in disorders of consciousness [J]. *Neurosci Bull*, 2023, 39(2): 348-352.
- [27] 中国神经科学学会意识与意识障碍分会, 中国康复医学会意识障碍康复专业委员会, 中国康复医学会颅脑创伤康复专业委员会. 慢性意识障碍命名与分类专家共识[J]. *临床神经外科杂志*, 2025, 22(3):241-247.
- Consciousness and Disorders of Consciousness Branch of Chinese Neuroscience Society, Committee on Craniocerebral Trauma Rehabilitation of Chinese Association of Rehabilitation Medicine, Committee on Disorders of Consciousness Rehabilitation of Chinese Association of Rehabilitation Medicine. Expert consensus on nomenclature and classification of prolonged disorders of consciousness[J]. *J Clin Neurosurg*, 2025, 22(3):241-247.
- [28] YANG Y, HE Q H, DANG Y Y, et al. Long-term functional outcomes improved with deep brain stimulation in patients with disorders of consciousness[J]. *Stroke Vasc Neurol*, 2023, 8(5): 368-378.
- [29] ANNEN J, MERTEL I, XU R, et al. Auditory and somatosensory P3 are complementary for the assessment of patients with disorders of consciousness[J]. *Brain Sci*, 2020, 10(10):748.
- [30] CHATELLE C, SPENCER C A, CASH S S, et al. Feasibility of an EEG-based brain-computer interface in the intensive care unit [J]. *Clin Neurophysiol*, 2018, 129(8):1519-1525.
- [31] SPATARO R, XU Y, XU R, et al. How brain-computer interface technology may improve the diagnosis of the disorders of consciousness: a comparative study [J]. *Front Neurosci*, 2022, 16: 959339.
- [32] MUROVEC N, HEILINGER A, XU R, et al. Effects of a vibro-tactile P300 based brain-computer interface on the *Coma* recovery scale-revised in patients with disorders of consciousness [J]. *Front Neurosci*, 2020, 14:294.
- [33] GUGER C, SPATARO R, PELLAS F, et al. Assessing command-following and communication with vibro-tactile P300 brain-computer interface tools in patients with unresponsive wakefulness syndrome[J]. *Front Neurosci*, 2018, 12:423.
- [34] WANG F, HE Y B, QU J, et al. Enhancing clinical communication assessments using an audiovisual BCI for patients with disorders of consciousness[J]. *J Neural Eng*, 2017, 14(4):046024.
- [35] PAN J H, XIAO J, WANG J, et al. Brain-computer interfaces for awareness detection, auxiliary diagnosis, prognosis, and rehabilitation in patients with disorders of consciousness [J]. *Semin Neurol*, 2022, 42(3):363-374.
- [36] 肖庆, 王诚, 周焜, 等. 脑-机接口的技术原理及临床应用 [J/OL]. *中华脑科疾病与康复杂志(电子版)*, 2023, 13(4):241-245.
- XIAO Q, WANG C, ZHOU K, et al. Technical principle and clinical application of brain-computer interface [J/OL]. *Chin J Brain Dis Rehabil Electron Ed*, 2023, 13(4):241-245.
- [37] VASTANO R, WIDERSTROM-NOGA E. Event-related potentials during mental rotation of body-related stimuli in spinal cord injury population[J]. *Neuropsychologia*, 2023, 179:108447.
- [38] CLAYSON P E, BALDWIN S A, ROCHA H A, et al. The data-processing multiverse of event-related potentials (ERPs): a roadmap for the optimization and standardization of ERP processing and reduction pipelines[J]. *Neuroimage*, 2021, 245:118712.
- [39] ANNEN J, BLANDIAUX S, LEJEUNE N, et al. BCI performance and brain metabolism profile in severely brain-injured patients without response to command at bedside[J]. *Front Neurosci*, 2018, 12:370.
- [40] LULÉ D, NOIRHOMME Q, KLEIH S C, et al. Probing command following in patients with disorders of consciousness using a brain-computer interface [J]. *Clin Neurophysiol*, 2013, 124(1): 101-106.
- [41] RIZZARO M D, REMORE L G, FASO V L, et al. Rehabilitation based on brain-computer interface for aphasic patients: a systematic review[J]. *Deep Brain Stimul*, 2025, 11:18-24.
- [42] KLEIH S C, BOTREL L. Post-stroke aphasia rehabilitation using an adapted visual P300 brain-computer interface training: improvement over time, but specificity remains undetermined [J]. *Front Hum Neurosci*, 2024, 18:1400336.
- [43] MUSSO M, BAMBADIAN A, DENZER S, et al. A novel BCI based rehabilitation approach for aphasia rehabilitation [EB/OL]. [2025-11-20]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:102344155>.
- [44] MUSSO M, HÜBNER D, SCHWARZKOPF S, et al. Aphasia recovery by language training using a brain-computer interface: a proof-of-concept study[J]. *Brain Commun*, 2022, 4(1):feac008.
- [45] LIN Y R, HSU T W, HSU C W, et al. Effectiveness of electroencephalography neurofeedback for improving working memory and episodic memory in the elderly: a meta-analysis[J]. *Medicina*, 2024, 60(3):369.
- [46] TAZAKI M. A review: effects of neurofeedback on patients with mild cognitive impairment (MCI), and Alzheimer's disease (AD) [J]. *Front Hum Neurosci*, 2024, 17:1331436.
- [47] MROCZKOWSKA D, BIAŁKOWSKA J, RAKOWSKA A. Neurofeedback as supportive therapy after stroke. Case report [J].

- Postępy Psychiatr i Neurol, 2014, 23(4):190–201.
- [48] HSIAO Y T, WU C T, TSAI C F, et al. EEG-based classification between individuals with mild cognitive impairment and healthy controls using conformal kernel-based fuzzy support vector machine[J]. Int J Fuzzy Syst, 2021, 23(8):2432–2448.
- [49] HOFER D, KOBER S E, REICHERT J L, et al. Spezifische Effekte von EEG-basiertem Neurofeedbacktraining auf kognitive Leistungen nach einem Schlaganfall: Ein nutzvolles Werkzeug für die Rehabilitation?[J]. Lernen Und Lernstörungen, 2014, 3(4):249–267.
- [50] VERBAARSCHOT C, TUMP D, LUTU A, et al. A visual brain-computer interface as communication aid for patients with amyotrophic lateral sclerosis[J]. Clin Neurophysiol, 2021, 132(10):2404–2415.
- [51] ORTEGA-ROBLES E, CARINO-ESCOBAR RI, CANTILLO-NEGRETE J, et al. Brain-computer interfaces in Parkinson's disease rehabilitation [J]. Biomimetics, 2025, 10(8):488. doi:10.3390/biomimetics10080488.
- [52] SI X P, HUANG H, YU J Y, et al. EEG microstates and fNIRS metrics reveal the spatiotemporal joint neural processing features of human emotions[J]. IEEE Trans Affect Comput, 2024, 15(4):2128–2138.
- [53] WILLIAMS C, ANIK F I, HASAN M M, et al. Advancing brain-computer interface closed-loop systems for neurorehabilitation: systematic review of AI and machine learning innovations in biomedical engineering[J]. JMIR Biomed Eng, 2025, 10:e72218.

Expert consensus on the clinical application of non-invasive brain-computer interfaces in neurorehabilitation

The Professional Committee of Brain-Computer Interface and Rehabilitation of Chinese Association of Rehabilitation Medicine

MA Jun^{1,2}, ZHANG Jingjing¹, ZENG Ming^{1,3}, SHAN Chunlei^{1,2,4*}

¹ Tongren Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200336, China;

² Yuanshen Rehabilitation Institute, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China;

³ The Second Affiliated Hospital of Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China;

⁴ National Research Center for Language and Well-Being, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

*Correspondence: SHAN Chunlei, E-mail: shancel@shsmu.edu.cn

ABSTRACT Non-invasive brain-computer interfaces (BCI) have advantages such as high safety, ease of operation, and low cost. Closed-loop rehabilitation models based on non-invasive BCI have demonstrated promising application potential in motor function rehabilitation after stroke, as well as in the assessment and rehabilitation of disorders of consciousness. However, current non-invasive BCI still encounter challenges in clinical rehabilitation practice for neurological diseases, such as the absence of uniform technical standards, incomplete operational protocols, and ambiguous indications and contraindications, which restrict their clinical translation and application. This study aims to formulate a unified expert consensus on non-invasive BCI, to guide clinicians and researchers in standardizing its therapeutic protocols and defining its scope of application. This expert consensus mainly describes the consensus development methodology, the clinical rehabilitation applications of non-invasive BCI, and recommendations for clinical practice and key quality management points, including indications and contraindications, clinical implementation procedures and quality control, safety monitoring and adverse event management, as well as ethics, privacy, and data security. The consensus focuses on standardizing the specific application modalities, reference stimulation parameters, assessment indicators, recommendations, implementation details, evidence support, and clinical operational considerations for non-invasive BCI in the rehabilitation of post-stroke motor dysfunction, disorders of consciousness, speech and language disorders, cognitive impairment, and other neurological diseases, with the goal of promoting the application and development of non-invasive BCI in clinical rehabilitation practice in China.

KEY WORDS neurorehabilitation; motor dysfunction; disorders of consciousness; speech and language disorder; cognitive impairment; non-invasive brain-computer interface; evidence-based medicine; expert consensus

DOI:10.3724/SP.J.1329.XXXX.XX001