

专家论坛

面向神经功能康复的脑机接口临床应用:前沿进展、挑战与展望

杨泽地¹ 黄逸民¹ 胡峰¹ 舒凯¹ 唐洲平²

¹ 华中科技大学同济医学院附属同济医院神经外科, 湖北武汉 430030; ² 华中科技大学同济医学院附属同济医院神经内科, 湖北武汉 430030



专家简介 唐洲平, 二级教授, 主任医师, 博士生导师。华中科技大学同济医学院附属同济医院党委书记、第二临床学院党委书记、国家重大公共卫生事件医学中心主任。主要从事脑出血与脑机接口交叉领域研究。现任中国卒中学会副会长、中国卒中学会脑出血微创治疗分会主任委员、中国医师协会神经修复学专委会副主任委员。在《Advanced science》、《Innovation》等国内外重要学术刊物发表论文一百余篇。近 5 年主持国家自然科学基金面上项目、国家科技重大专项课题及多项省部级重点研发项目。曾作为主要成员获湖北省科技进步一等奖、教育部科学研究优秀成果奖。创办并担任 ESCI 杂志《Brain hemorrhages》执行主编。承担脑机接口相关研究生培养与课程教学, 主编全国高等学校智能医学工程专业第一轮规划教材《脑科学与类脑计算》。

摘要 我国神经功能障碍患者基数庞大, 传统以病因治疗、常规康复为主的诊疗模式对重度神经通路损伤患者的疗效已进入平台期。脑机接口 (BCI) 技术作为直接实现大脑与外部设备信息交互的前沿技术, 打破了外周神经肌肉通路的限制, 推动神经外科诊疗模式从“对症治疗”向“智能功能重建与全程管理”深度转型。本文将临床实践与国内外最新循证证据结合, 系统梳理 BCI 技术在运动功能保护与修复、听觉功能保护与重建、语言解码与功能恢复、视觉功能重建四大核心领域的临床应用现状, 分析其临床转化的核心瓶颈, 并对未来发展方向进行展望, 为 BCI 技术在神经功能康复中的规范化临床应用提供参考。

关键词 脑机接口; 神经功能; 神经康复; 医工交叉; 临床转化

中图分类号 R496; R741 **文献标识码** A **DOI** 10.11768/nkjjwzzz20260301

Brain-computer interfaces for neurological function rehabilitation: clinical applications, challenges, and future outlook YANG Ze-di¹, HUANG Yi-min¹, HU Feng¹, SHU Kai¹, TANG Zhou-ping². ¹Department of Neurosurgery, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Wuhan 430030, China; ²Department of Neurology, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Wuhan 430030, China

Corresponding author: SHU Kai, E-mail: kshu@tjh.tjmu.edu.cn; TANG Zhou-ping, E-mail: ddjtzp@163.com

Abstract Given the enormous population of patients with neurological dysfunction in China, traditional diagnostic and therapeutic models centered on etiological treatment and conventional rehabilitation have reached a plateau in efficacy for those with severe neural pathway injuries. Brain-computer interface (BCI) technology, a cutting-edge approach that establishes a direct information pathway between the brain and external devices, bypasses the limitations of peripheral neuromuscular pathways and drives a profound paradigm shift in neurosurgical practice from "symptomatic treatment" to "intelligent functional reconstruction and whole-process management". Drawing on the clinical practice of our center and the latest evidence from both domestic and international sources, this article systematically reviews the current clinical applications of BCI technology in four core domains: motor function protection and restoration, auditory function protection and reconstruction, speech decoding and functional recovery, and visual function reconstruction. It further analyzes the key bottlenecks hindering clinical translation and provides an outlook on future development directions, aiming to offer a reference for the standardized clinical application of BCI technology in neurological function rehabilitation.

Key words Brain-computer interface; Neurological function; Neurorehabilitation; Medical-engineering integration; Clinical translation

我国现有脑卒中患者超 2600 万^[1],每年新增脊髓损伤、颅脑创伤、神经退行性疾病所致神经功能障碍患者超 300 万^[2~4],这类患者的功能恢复一直是神经外科与康复医学领域的核心难题。传统诊疗模式以手术解除病因、药物营养神经、常规康复训练为核心,多依赖于未完全中断的神经通路。对于重度偏瘫、高位截瘫、中枢性感官障碍及闭锁综合征等患者,传统手段难以突破功能恢复的平台期,多数患者遗留终身残疾,给家庭与社会带来沉重负担^[5]。

脑机接口 (brain-computer interface, BCI) 技术通过搭建大脑与外部设备的直接信息通路,绕过损伤的外周神经与肌肉系统,实现神经信号的解码与外部设备的调控,为神经功能障碍的诊疗提供了全新范式^[6]。作为国内最早开展 BCI 临床转化研究的医学中心之一,华中科技大学同济医学院附属同济医院 BCI 团队率先将 BCI 技术融入围手术期功能保护与术后全程康复。临床证据表明,该技术正在推动神经外科诊疗模式由传统“对症手术”向“智能功能重建”本质转变。本文围绕 BCI 在神经功能康复中的核心临床应用展开论述,为该技术的临床普及与规范化发展提供思路。同时分析其临床转化面临的技术、伦理与监管瓶颈,并对未来发展方向进行展望。

一、BCI 在神经功能康复中的核心临床应用

BCI 的核心临床价值体现于两大突破。一方面是围手术期的智能化功能保护,在病因治疗的同时,最大限度保留神经功能,减少医源性损伤;另一方面是损伤后的智能化功能重建,为传统治疗无效的重度神经功能障碍患者,提供功能替代与神经重塑的可行路径^[7,8]。目前其临床应用已全面覆盖运动、

听觉、语言、视觉等核心神经功能领域。

(一) 运动功能的保护与修复

运动功能障碍是神经外科疾病最常见的并发症,也是 BCI 临床转化最成熟、循证证据最充分的领域,其应用贯穿术前评估、术中保护、术后康复全流程,见图 1。

在围手术期功能保护方面,传统运动区颅脑手术依赖术中唤醒、直接电刺激定位功能区,存在患者配合度要求高、手术时间长、诱发癫痫等局限。在术中,将皮层 BCI 监测技术应用于脑运动区肿瘤、脑血管畸形手术中,通过实时采集运动皮层脑电信号,可以快速精准定位运动功能区边界。在实现病灶全切的同时,将术后永久性运动功能障碍发生率较传统术式降低,显著提升了肿瘤全切率、手术的安全性与功能保留率。

在损伤后功能修复与重建方面,BCI 实现了从“被动康复”到“主动神经重塑”的跨越。对于慢性期重度偏瘫患者,常规康复训练难以激活受损的运动神经环路。BCI 通过构建基于运动意图的感觉-运动闭环,使患者即使在缺乏实际运动输出的情况下,仍可驱动外部设备并获得反馈,从而强化残存神经通路的功能连接。唐洲平教授团队^[9]研究表明,这种以神经反馈为核心的训练模式能够显著改善上肢运动功能及日常生活能力,并促进经验依赖性的神经可塑性重塑。对于脊髓损伤后高位截瘫、肌萎缩侧索硬化 (amyotrophic lateral sclerosis, ALS) 所致闭锁综合征等外周神经通路完全中断的患者,侵入式 BCI 技术可直接解码大脑运动意图,驱动外骨骼机器人、机械假肢等设备^[10~14]。国内外多项临床试点已实现截瘫患者对机械臂、电脑光标的精准

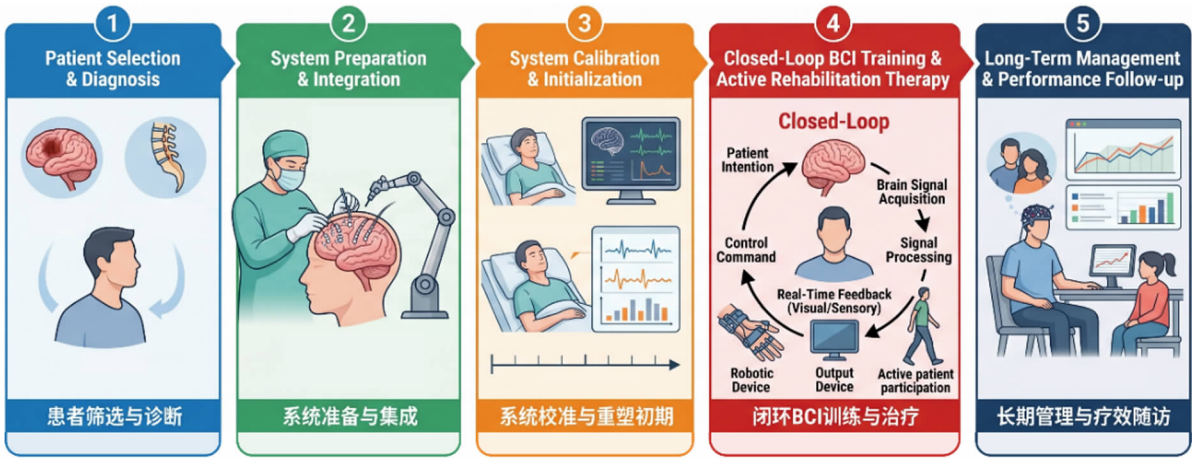


图 1 BCI 在神经康复临床应用的流程示意图

控制,完成进食、饮水、日常操作等动作,为重度运动障碍患者带来了生活自理的可能^[15,16]。2025 年舒凯教授团队完成华中地区首例侵入式 BCI 手术,通过采集硬膜外脑电信号精准解码大脑的运动意图,并配合气动康复手套进行物理辅助。术后 1 个月,高位截瘫患者即能借助气动康复手套完成抓握;术后 3 个月,患者实现徒手自主饮水进食,且下肢感觉功能较术前明显改善。该方案有力证实侵入式 BCI 在促进神经环路重建方面的巨大潜力。“脑电解码+柔性气动外骨骼”的闭环干预模式,不仅大幅提升了患者的生活自理能力,也为重度运动障碍的智能化康复提供了极具代表性的中国方案。随着技术的推进,侵入式 BCI 将进一步解码更精细的运动意图,驱动机械假肢完成更为复杂的日常操作^[17]。除了传统的硬膜外/硬膜下植入外,血管内 BCI 作为一种新兴的微创侵入式方案,正在重构运动功能重建的路径^[18]。该技术无需大开颅手术,而是通过类似神经介入的方式,将网状支架电极经颈静脉输送并固定于大脑运动皮层上方的上矢状窦内。临床研究表明,该技术能长期稳定采集高质量运动脑电信号,协助高位截瘫患者实现高精度的数字设备控制。

(二)听觉功能的保护与重建

听觉功能是人类社会交流的核心基础,传统人工耳蜗仅能解决耳蜗毛细胞损伤所致的感音神经性耳聋,对于听神经病、听觉中枢通路损伤、皮层性耳聋等患者,尚无有效的治疗手段。BCI 技术可以绕过损伤的外周听觉通路,直接靶向调控听觉皮层,为中枢性听觉障碍的诊疗提供了全新方案^[19,20]。

在围手术期听觉功能保护方面,听神经瘤等桥小脑角区肿瘤手术中,传统神经电生理监测仅能反映外周听觉通路的完整性,无法实时评估听觉皮层的功能状态,术后听力丧失仍是常见并发症。将听觉 BCI 技术应用于听神经瘤手术中,通过实时解码听觉皮层对声刺激的响应信号,动态监测听觉通路的完整性,及时调整手术操作策略,可以使术后患者有效听力保留率较传统术式得到显著提升,改善患者的术后生活质量。贾旺教授团队^[21]基于柔性有机电子材料的术中神经电生理监测系统,可在显微手术中持续监测神经电位,以高信噪比、低侵入性精准定位靶神经,有效保护神经功能并改善肿瘤手术预后。

在听觉功能重建方面,武汉大学中南医院神经外科开展了将非侵入式 BCI 神经调控应用于难治性耳鸣的临床治疗,通过靶向调控听觉皮层异常放电,

可使患者的耳鸣症状得到持续缓解。针对中枢性耳聋患者,侵入式听觉 BCI 可将声音信号转化为精准的电刺激信号,直接激活听觉皮层,国内已启动相关临床试点,初步实现了患者对简单词语、环境声的识别,为完全性中枢性耳聋患者恢复听觉带来了希望。

(三)语言解码与功能恢复

语言功能是人类特有的高级神经功能,脑卒中后失语症、颅脑创伤后语言障碍、ALS 所致闭锁综合征等,均会使患者丧失语言交流能力。传统康复手段对重度失语症患者的有效率不足,且功能恢复程度有限。BCI 技术通过直接解码大脑语言意图,打破了语言功能障碍的诊疗瓶颈^[22,23]。

在围手术期语言功能保护方面,语言区脑肿瘤手术中,传统术中唤醒麻醉存在患者耐受度差、语言定位耗时长等问题。我们团队术中 BCI 技术应用于语言区肿瘤手术,实时采集皮层脑电信号,快速定位核心语言功能区,在实现肿瘤全切的同时,有效降低术后永久性失语的发生率,缩短手术时间,提升了手术的精准度。在语言功能恢复与重建方面,针对脑卒中后慢性期失语症患者,基于非侵入式 BCI 的语言神经反馈训练,可精准激活受损的语言相关脑区,促进神经环路重塑^[24]。本中心临床数据显示,BCI 联合常规语言康复训练疗效优于单纯常规康复。由于中文具有高度复杂的声调系统与字形耦合特征,其神经解码难度远超英语等拼音语言。本中心联合华中科技大学伍冬睿教授团队首创非侵入式中文语音解码新范式。该研究成功构建了首个中文脑磁图语音数据集,取得了 46.21% 的高准确率,实现了我国在中文语音解码领域“从 0 到 1”的关键突破^[25,26]。随着多模态脑电/脑磁采集硬件的微型化及大模型解码算法的迭代,将从当前的单字、孤立词汇解码,跨越至对复杂、连续长句的实时高保真合成。未来,该成果有望整合至微创柔性设备中,协助重度失语症患者重获自然、流畅的语言能力。

(四)视觉功能重建

视觉是人类获取外界信息的核心途径,对于视网膜色素变性、视神经萎缩、颅脑创伤后皮质盲等所致的不可逆性视觉障碍,传统治疗手段尚无有效解决方案,BCI 技术是目前重度视觉障碍患者功能重建的重要可行路径^[27]。

在围手术期视觉功能保护方面,鞍区、枕叶肿瘤手术中,传统视觉诱发电位监测灵敏度有限,无法实时反映视觉皮层的功能状态,术后视力下降仍是常见并发症。将视觉 BCI 技术应用于鞍区肿瘤手术

中,通过实时解码视觉皮层对闪光刺激的响应信号,动态监测视觉通路完整性,及时调整手术操作,较传统术式可降低患者术后视力下降的发生率,最大限度保留了患者的残余视力。

在视觉功能重建方面,非侵入式视觉 BCI 已应用于弱视、卒中后皮质盲患者的康复训练,通过神经反馈机制激活视觉皮层残余功能,有效改善了患者的对比敏感度与残余视力。针对完全性失明患者,侵入式视觉 BCI 通过植入视皮层电极阵列,将图像信号转化为电刺激信号,使患者产生光幻觉^[28,29]。目前本团队已开展相关临床试验,完成了全球首例“复杂图形+多种颜色”的视觉重建功能化交互验证。该研究通过电刺激大脑视觉皮层,实现了视觉感知从简单光点到复杂图形再到色彩感知的跨越。团队实现突破的关键在于利用了空间拓扑与颜色处理的神经机制——通过精确刺激不同空间位置对应的拓扑皮层和颜色处理模块,使多个独立的光幻视点在大脑中被整合为连贯的、有特定形状和颜色的视觉感知,让视觉重建进入色彩“构图”时代。未来随着高密度电极阵列与深度学习解码算法的升级,有望实现高分辨率的视觉重建。

二、BCI 临床转化面临的核心挑战

尽管 BCI 技术在神经功能康复领域展现出明确的临床学术价值,但其广泛普及与真正落地仍面临多维度的核心瓶颈^[8,30]。这些挑战不仅涵盖材料学、计算科学等底层硬性技术指标,还深度涉及医学伦理、数据资产安全及国家合规监管规范等宏观保障体系。

(一)长期植入安全性与生物相容性瓶颈

侵入式 BCI 电极的长期安全性与生物相容性是制约其临床普及的首要因素^[31]。电极长期植入脑实质内易引发机体的慢性免疫排斥反应,导致电极周围的神经胶质细胞过度增殖,进而引发胶质瘢痕形成。胶质瘢痕不仅会显著增大电极-组织界面的物理阻抗,还会阻隔神经元信号的传导,最终导致采集到的神经放电信号信噪比逐月衰减,限制了其长期临床应用。此外,颅内复杂的电化学生物环境易引发电极腐蚀、绝缘层降解以及局部感染等并发症^[32,33]。这些因素会造成信号质量严重下降,并且存在长期诱发局部微小炎症或异常神经放电的潜在风险。为了规避传统针状电极阵列对脑实质的直接机械损伤,利用血管壁作为天然物理屏障的血管内 BCI 技术应运而生^[18]。该技术将电极置于血管腔内,既有效避免了胶质瘢痕包裹引起的信号衰减,又

极大地降低了中枢感染的发生率,为解决长期植入安全性瓶颈提供了全新的微创医工交叉思路。

(二)神经信号解码的精度与稳健性不足

当前 BCI 系统的神经信号解码精度与稳健性仍显不足,难以满足复杂功能的长期稳定解码需求。在非侵入式 BCI 中,头皮脑电信号存在信噪比极低、易受皮肤电阻及肌电伪迹干扰等局限,导致空间分辨率十分有限。而在侵入式 BCI 中,虽然空间分辨率较高,但神经信号极易受到脑内复杂的动态生化环境变动的影响。现有的解码算法在面对患者注意力分散、疲劳、基线漂移或经验依赖性神经可塑性变化时,其稳健性表现不佳,导致系统难以在复杂多变的动态临床场景下维持长周期、高精度的稳定控制。

(三)临床伦理与认知隐私权保护

BCI 技术直接打破了大脑与外界设备的传统交互物理边界,引发了深刻的临床伦理与认知隐私保护问题^[34,35]。在伦理层面,国内目前尚缺乏完善的 BCI 临床应用指南与伦理审查体系。其核心在于认知隐私权的保护:BCI 在高速解码神经意图时,可能在无意识间读取或泄露患者非自愿公开的潜在思维、情感或深层记忆数据^[36,37]。此外,当采用智能闭环大模型进行行为驱动,或机器人辅助康复设备产生非患者真实初衷的误动作时,患者的自主权边界以及医疗责任的划分归属将变得模糊,须面临长期神经安全与道德伦理的双重审视。

(四)数据安全与网络合规风险

神经脑电数据作为人类最高级别的生物特征信息,如同极其私密且独特的数字指纹^[38,39]。随着 BCI 设备逐步走向微型化、无线化与云端交互,神经数据的隐私保护面临着更复杂的网络安全隐患。由于目前针对大脑神经数据的数据安全技术标准尚未完全建立,神经数据在无线通信传输或云平台存储过程中,存在被恶意拦截、窃取甚至远程篡改的风险。一旦发生神经网络攻击,不仅会导致大范围核心个人隐私的严重泄露,更可能通过恶意篡改系统的解码参数或反馈刺激指令,对患者的颅内神经通路及生命安全造成实质性损害^[40,41]。

(五)国内外监管规范

目前,国内尚无统一的 BCI 临床应用指南,导致临床试验与医疗应用中的适应证选择、标准化操作流程以及临床疗效评价标准存在严重的不统一。在医疗器械注册审评中,高风险的侵入式电极或介入支架通常被归为Ⅲ类医疗器械进行管理,面临极其严格的临床安全性验证。然而,BCI 系统具备极高

的医工交叉特殊性,传统的硬性医疗器械评价指标难以完全涵盖软件算法动态迭代与大模型持续更新的特征,导致现行监管准入规范与技术落地速度之间存在错位。

三、小结与展望

BCI 技术的快速发展,正在重塑神经功能康复治疗边界,推动医学干预从“治”到“智”的跨越。目前,BCI 技术已在运动、听觉、语言、视觉四大核心领域展现出临床价值。其应用贯穿围手术期的功能保护,以及损伤后的功能重建与康复,为大量传统治疗无效的重度神经功能障碍患者带来了新的希望。未来,随着材料科学、神经科学与人工智能技术的深度融合,BCI 技术将围绕核心瓶颈实现全面突破^[18,42]。

(一)新型材料与电极研发

开发具备极高生物相容性、低免疫排异反应的超柔性纳米仿生电极材料(如柔性有机电子、水凝胶电极阵列等),从根本上攻克长期植入安全性下降与信号信噪比衰减问题,延长器械在颅内有效服务寿命。

(二)脑机融合大模型的深度落地与算法进化

传统的浅层机器学习及经典卷积神经网络算法,本质上依赖于“神经信号-特定动作/字符”的硬编码映射,面临“千人千模”与高噪环境下容错率低的临床转化限制。未来需加速推进脑机融合大模型在算法层面的深度应用。将高维、非线性的多模态神经信号(如头皮脑电图、颅内脑电图、脑磁图等)压缩提取为高维变量,并直接应用至预训练大模型的底层架构。依托大模型语义级上下文智能纠错与联想能力,即使在脑电信号因疲劳或伪迹产生基线漂移时,仍能维持稳定的高精度控制。此外,大模型通过学习深度,能够有效克服临床应用中棘手的跨被试变异性痛点,实现跨用户泛化。从而推动神经康复由当前的“孤立词汇/单步动作识别”向“复杂、连续长句的实时高保真语言合成”,再到“多自由度精细运动意图的闭环自适应控制”颠覆性跨越。

(三)行业标准与伦理合规体系的确立

多学科联合制定统一的全国性或国际性 BCI 临床应用行业指南,细化明确的适应证筛选标准、标准化手术操作流程以及可量化的神经功能疗效评价体系。同时,构筑坚实的法律与伦理红线,深化对认知隐私权保护、行为自主权责任归属以及神经数据网络安全防御等衍生风险的治理,推动 BCI 技术在安全合规的前提下健康发展。

(四)国产化规模量产与医保准入突破

加速自主知识产权关键核心硬件(如高密度柔性芯片、微创血管支架电极等)的国产化、小型化与低成本化研发,打破国外技术垄断,大幅降低全套诊疗设备造价;同时,积极推动临床急需、疗效确切的智能化 BCI 康复项目纳入国家医保范畴,解决设备成本高、临床可及性差的现实痛点。

从受损神经网络的被动修复,到智能闭环系统的主动干预,BCI 技术正在成为神经外科发展史上的重要里程碑。未来,随着医工交叉的持续深耕,这项技术必将全面跨越临床转化的藩篱,为千万个神经功能障碍患者点亮重归正常生活的新曙光。

参 考 文 献

- 1 国家卫生健康委加强脑卒中防治工作减少百万新发残疾工程专家委员会,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 Qin H, Diao Y, Hao M, et al. Analysis and comparison of the trends in burden of spinal cord injury in China and worldwide from 1990 to 2021: an analysis of the global burden of disease study 2021 [J]. Front Public Health, 2024, 12: 1517871.
- 3 Zhang C, Yang X, Wan D, et al. Burden of neurological disorders in China and its provinces, 1990-2021: Findings from the global burden of disease study 2021 [J]. Med, 2025, 6(8): 100692.
- 4 Feng JF, Huang XJ, Yang XF, et al. Traumatic brain injury in China: an update on epidemiology, care pathways, and clinical research [J]. Lancet Neurol, 2026, 25(4): 396-405.
- 5 葛伟,仲颖,洪文军,等. BCI 在中枢神经系统疾病康复中的应用 [J]. 康复学报, 2025, 35(4): 393-398.
- 6 Luo W, Al-qaness MAA, Li Y, et al. EEG-based brain-computer Interface: fundamentals, methods, applications, and challenges [J]. IEEE Internet Things J, 2025: 1.
- 7 Powell J, Zhou A. Brain-computer interface commercialization [J]. J Neuroeng Rehabil, 2026, 23(1): 45.
- 8 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.
- 9 Chen D, Shi J, Tao B, et al. A novel transfer learning - based hybrid EEG - fNIRS brain - computer interface for intracerebral hemorrhage rehabilitation [J]. Adv Sci, 2025, 12(43): e05426.
- 10 Wen D, Fan Y, Hsu SH, et al. Combining brain-computer interface and virtual reality for rehabilitation in neurological diseases: a narrative review [J]. Ann Phys Rehabil Med, 2021, 64(1): 101404.
- 11 Li D, Li R, Song Y, et al. Effects of brain-computer interface based training on post-stroke upper-limb rehabilitation: a meta-analysis [J]. J Neuroeng Rehabil, 2025, 22(1): 44.
- 12 Ma ZZ, Wu JJ, Cao Z, et al. Motor imagery-based brain-computer interface rehabilitation programs enhance upper extremity performance and cortical activation in stroke patients [J]. J Neuroeng Rehabil, 2024, 21(1): 91.

13 Sokhadze E. Neurofeedback and brain-computer interface-based methods for post-stroke rehabilitation [J]. Biofeedback, 2025, 50 (4) : 581-592.

14 Wang A, Tian X, Jiang D, et al. Rehabilitation with brain-computer interface and upper limb motor function in ischemic stroke: a randomized controlled trial [J]. Med, 2024, 5 (6) : 559-569. e4.

15 Lorach H, Galvez A, Spagnolo V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface [J]. Nature, 2023, 618 (7963) : 126-133.

16 Capogrosso M, Milekovic T, Borton D, et al. A brain-spine interface alleviating gait deficits after spinal cord injury in primates [J]. Nature, 2016, 539 (7628) : 284-288.

17 Baniqued PDE, Stanyer EC, Awais M, et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review [J]. J Neuroeng Rehabil, 2021, 18 (1) : 15.

18 Sun Y, Chen D, Ye Q, et al. Applications of endovascular brain-computer interface in patients with alzheimer's disease [J]. Research, 2025, 8 : 1049.

19 Gao S, Wang Y, Gao X, et al. Visual and auditory brain-computer interfaces [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2014, 61 (5) : 1436-1447.

20 Shang L, Liu J, Lv S, et al. From physical replacement to biological symbiosis: evolutionary paradigms and future prospects of auditory reconstruction brain-computer interfaces [J]. Micromachines, 2026, 17 (3) : 343.

21 Zhou W, Jiang Y, Xu Q, et al. Soft and stretchable organic bioelectronics for continuous intraoperative neurophysiological monitoring during microsurgery [J]. Nat Biomed Eng, 2023, 7 (10) : 1270-1281.

22 Jude JJ, Haro S, Levi-Aharoni H, et al. Decoding intended speech with an intracortical brain-computer interface in a person with long-standing anarthria and locked-in syndrome [J]. Cell Rep, 2026, 45 (4) : 117162.

23 Luo S, Rabbani Q, Crone NE. Brain-computer interface: applications to speech decoding and synthesis to augment communication. [J]. Neurotherapeutics, 2022, 19 (1) : 263-273.

24 Qian Y, Liu C, Yu P, et al. Real-time decoding of full-spectrum Chinese using brain-computer interface [J]. Sci Adv, 2025, 11 (45) : eadz9968.

25 Jia Z, Wang H, Shen Y, et al. Magnetoencephalography (MEG) based non-invasive Chinese speech decoding. [J]. J Neural Eng, 2025, 22 (6) .

26 Wang H, Jia Z, Shen Y, et al. SACM: SEEG-audio contrastive matching for Chinese speech decoding. [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2026, PP.

27 Yang CD, Guo A, Lin KY. Brain-computer interfaces for vision recovery in precortical vision loss. [J]. Eye Brain, 2026, 18 : 561691.

28 Sun Y, Liang L, Sun J, et al. A binocular vision SSVEP brain-computer interface paradigm for dual-frequency modulation. [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2023, 70 (4) : 1172-1181.

29 Norton JJS, Dirisio GF, Carp JS, et al. Brain-computer interface-based assessment of color vision. [J]. J Neural Eng, 2021, 18 (6) .

30 Mridha MF, Das SC, Kabir MM, et al. Brain-computer interface: advancement and challenges [J]. Sensors, 2021, 21 (17) : 5746.

31 Liu XY, Wang WL, Liu M, et al. Recent applications of EEG-based brain-computer-interface in the medical field [J]. Mil Med Res, 2025, 12 (1) : 14.

32 Doering M, Kieninger J, Urban GA, et al. Electrochemical microelectrode degradation monitoring: in situ investigation of platinum corrosion at neutral pH [J]. J Neural Eng, 2022, 19 (1) .

33 Campbell A, Wu C. Chronically implanted intracranial electrodes: tissue reaction and electrical changes [J]. Micromachines, 2018, 9 (9) : 430.

34 Huang K, Yang H, Zhu S, et al. Ethical risks and considerations of brain-controlled and neuromodulation technologies [J]. Cogn Neurodyn, 2026, 20 (1) : 74.

35 Cao Y, Yang H, Xue Y, et al. Ethical risks and considerations of the integration of brain-computer interfaces with artificial intelligence [J]. Cogn Neurodyn, 2026, 20 (1) : 46.

36 Angulo Medina AS, Aguilar Bonilla MI, Rodríguez Giraldo ID, et al. Electroencephalography-based brain-computer interfaces in rehabilitation: a bibliometric analysis (2013-2023) [J]. Sensors, 2024, 24 (22) : 7125.

37 Liu XY, Wang WL, Liu M, et al. Recent applications of EEG-based brain-computer-interface in the medical field [J]. Mil Med Res, 2025, 12 (1) : 14.

38 Naufel S, Klein E. Brain-computer interface (BCI) researcher perspectives on neural data ownership and privacy [J]. J Neural Eng, 2020, 17 (1) : 016039.

39 Kögel J, Jox RJ, Friedrich O. What is it like to use a BCI? - insights from an interview study with brain-computer interface users [J]. BMC Med Ethics, 2020, 21 (1) : 2.

40 Ng JY. Exploring the intersection of brain-computer interfaces and traditional, complementary, and integrative medicine [J]. Integr Med Res, 2025, 14 (2) : 101142.

41 Huang S, Paul U, Gupta S, et al. U. S. public perceptions of the sensitivity of brain data [J]. J Law Biosci, 2024, 11 (1) : lsad032.

42 Chen D, Zhao Z, Shi J, et al. Harnessing the sensing and stimulation function of deep brain-machine interfaces: a new dawn for overcoming substance use disorders [J]. Transl Psychiatry, 2024, 14 (1) : 440.

(2026-04-30 收稿)