·综 述·

脑机接口与虚拟现实融合技术调控脑卒中康复的神经机制与应用

李 婧[1],樊竞远[2],梁馨文[3],潘玮敏[4,5*]

1 西安高新医院,陕西 西安 710075;
2 西电集团医院,陕西 西安 710077;
3 空军军医大学唐都医院,陕西 西安 710038;
4 西安体育学院运动与健康科学学院,陕西 西安 710068;
5 体育智能装备关键技术陕西省高校工程研究中心,陕西 西安 710068
* 通信作者:潘玮敏,E-mail:panweimin@163.com

收稿日期:2025-12-17;接受日期:2026-03-13
基金项目:陕西省创新能力支撑计划(2026GH-YBXM-110)
DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.09009

摘要 脑卒中是中国成人致残的首要原因,患者常遗留肢体运动功能障碍、认知功能减退等永久性神经功能缺损,严重影响生活质量。脑机接口与虚拟现实(BCI-VR)融合技术在脑卒中后功能康复中展现出显著疗效与巨大潜力。本文综述BCI-VR技术在脑卒中康复中的研究进展,阐述其核心机制:通过诱导神经可塑性与脑网络重组,并结合多模态神经反馈调控运动相关神经网络,从而促进脑功能重建与功能恢复;归纳其在上、下肢运动功能障碍及认知功能障碍康复中的临床应用;同时客观分析其在神经调控机制、干预策略及临床应用模式等方面的局限。未来需着力提升信号采集与处理能力,开发个体化解码算法,建立多模态反馈最优配置方案,并开展大样本、多中心随机对照试验,以构建更完善的BCI-VR融合康复体系,为脑卒中精准化、个性化康复提供理论依据与实践参考。

关键词 脑卒中;脑机接口;虚拟现实;运动功能;认知功能;神经可塑性

研究表明,中国脑卒中患者数量位居全球首位,已成为居民死亡与致残的主要病因之一,严重危害国民健康[1]。康复治疗作为降低脑卒中致残率的重要手段,也是脑卒中组织化管理模式中不可或缺的关键环节[2]。脑机接口(brain-computer interface,BCI)技术通过实时解码脑电等神经信号,将其转化为外部设备的控制指令,或将外部刺激转化为大脑可感知的反馈信号[3],从而实现脑与外部环境之间的双向信息交互,促进神经可塑性与神经功能重组,进而改善脑功能[4]。近年来,BCI在神经康复领域的临床应用前景与研究价值已得到广泛关注[5-6]。然而,传统BCI技术在患者参与度、沉浸感和运动意图激活等方面仍存在一定局限。

虚拟现实(virtual reality,VR)技术通过计算机模拟构建三维虚拟场景,可提供沉浸式数字化训练环境[7],具有多感官交互性等关键特征,能够有效增强患者的参与感与感知反馈。将VR引入BCI系统,有望通过多感官沉浸式反馈提升脑卒中患者的运动想象能力,增强其康复训练的主动参与度,从而促进大脑可塑性调节,强化神经调控效果,进一步促进功能恢复。因此,本文旨在系统梳理脑机接口与虚拟现实(BCI-VR)融合技术在脑卒中康复领域的研究进展,揭示其应用潜力,为脑卒中患者康复提供新思路与新视角。

引用格式:李婧,樊竞远,梁馨文,等. 脑机接口与虚拟现实融合技术调控脑卒中康复的神经机制与应用[J]. 康复学报,2026,36(9):675-682.
LI J,FAN J Y,LIANG X W,et al. Neural mechanisms and applications of the integration of brain-computer interface and virtual reality in stroke rehabilitation [J]. Rehabil Med,2026,36(9):675-682.
DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.09009

©《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　BCI-VR融合技术概述

BCI技术通过建立人脑与外部设备之间的直接联系，实现大脑活动和外部控制之间的双向通信[8]。该系统主要包括信号采集、特征分析、信号翻译和设备输出4个环节[9]。根据神经信号提取范式的不同，BCI可分为运动想象范式、事件相关电位（主要指P300）范式以及稳态视觉诱发电位范式。在脑卒中康复领域，运动想象范式因能有效激活运动通路并促进皮质重塑，直接作用于运动功能的重建过程，已成为最广泛应用的BCI干预策略之一[10]。运动想象范式是指个体在实际不执行动作的情况下，仅通过意图或对某一肢体运动的想象，激活大脑运动相关区域，从而产生特定的事件相关去同步或再同步变化[11]。该范式可使重度运动障碍患者在不依赖实际运动的前提下激活运动皮质区，有助于诱导神经可塑性恢复。现有研究表明，BCI技术可通过调节神经可塑性促进患者运动功能的重建，展现出广阔的临床应用前景[12-13]。然而，BCI技术在训练过程中普遍存在任务难度较高且枯燥性较强的问题，因其反馈形式相对单一且沉浸性不足，可能难以持续激发患者参与积极性[14-15]。

VR技术作为BCI系统的一种反馈呈现方式，能够利用计算机生成三维虚拟场景，通过视觉、听觉乃至触觉等多模态刺激，为患者提供沉浸式多感官交互体验[16-17]，这不仅可以增强神经可塑性，还能实现高频次、任务导向的功能性训练，提升运动想象的准确性和脑电信号的可识别性[18]，从而提升康复效果[19]；此外，VR技术还能够依据患者的具体需求和康复目标，实现个性化场景设置，进而提高康复干预的精准性和患者的参与度[20]。

BCI-VR技术融合了BCI和VR的双重优势，能够在实时采集并解码患者脑电信号的同时，为其提供一个沉浸式虚拟刺激环境，构建以任务驱动为核心的交互反馈机制，从而形成完整的闭环神经调控体系。见图1。在康复应用中，BCI-VR技术将传统被动式训练转变为以患者主动意图为主导的神经康复训练模式，提升了干预的针对性与个体化水平；同时，该技术能够依据患者功能恢复进程动态调整训练难度，实现精准干预与持续强化。近年来，BCI-VR技术已在康复医学领域得到广泛应用，初步研究显示出显著的康复成效[21]，具有良好的临床应用前景。

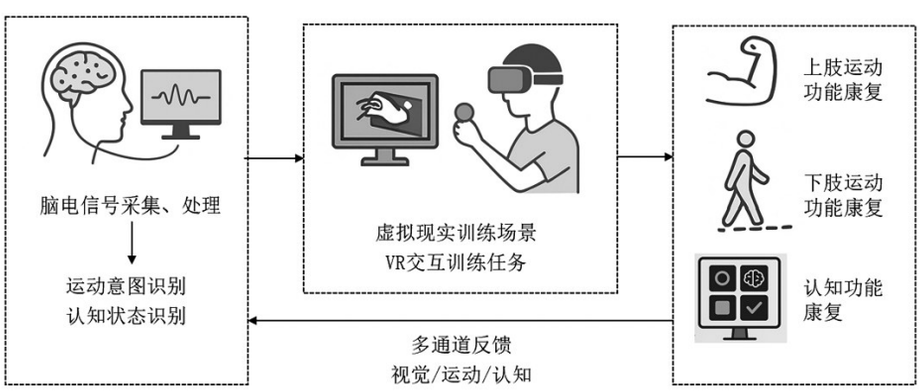


图1　BCI-VR融合技术康复流程示意图

Figure 1　Schematic diagram of the rehabilitation process of BCI-VR integration technology

2　BCI-VR融合技术调控脑卒中康复的神经机制

2.1　神经可塑性与脑网络重组

脑卒中后，大脑的结构和连接均发生显著改变[22-23]。以缺血性脑卒中为例，其缺血核心区及周围的半暗带区域会出现神经元变性等一系列继发性病理过程，这些级联反应不仅会造成局部脑组织坏死，还可能引发梗死灶周围区域及其远程连接脑区的神经功能障碍与网络失调[24]。多项研究已证实，脑卒中后神经可塑性与大脑重组在患者功能恢复过程中发挥关键作用[24-26]。神经可塑性涵盖从分子水平到皮层结构重组的多个层面[27]，通过形成新的神经连接，实现同侧或对侧脑区对受损区域的功能代偿[25]；未受损脑组织则通过神经元结构和功能的重新调整，有效弥补受损区域导致的功能丧失。

鉴于神经可塑性在功能重组与代偿恢复中的核心作用，研究者提出可借助BCI等技术主动诱导神经重塑，以促进脑功能重建。脑卒中患者大脑的

正常运动神经通路中断,导致运动功能受限。BCI技术可在不依赖肌肉输出的前提下激活运动相关皮层活动,从而诱导运动通路的重建与功能恢复[28]。VR技术能够构建沉浸式虚拟环境,增强训练的趣味性和沉浸感,使患者能够观察到患肢运动并获得诸如游戏通关等任务完成的体验,进而激发康复主动性,有助于降低运动想象难度,提高训练参与度与专注度。

BCI与VR结合后,可通过VR所营造的环境诱发躯体运动的错觉与具身感[29],进一步强化运动皮层区域的激活,调动特定神经网络,诱发预期的神经可塑性改变。在BCI-VR训练过程中,患者通过运动想象及动作观察可激活感觉运动皮层和镜像神经元系统[30-31],伴随α及β频段的事件相关去同步[32-33]。这些改变增强了顶叶、前运动皮层与初级运动皮层之间的功能连接[34],能够促进感觉运动整合并提高病灶侧运动皮层的激活水平。BCI通过识别患者的脑电信号并实时转化为运动反馈,使运动意图与视觉反馈在时间上形成同步,符合Hebbian可塑性机制[35],有助于强化残存运动通路及功能连接。此外,BCI-VR形成的多感官闭环交互可进一步调节多个运动相关网络之间的功能连接,包括感觉运动网络、前额叶-顶叶注意网络及小脑-丘脑-皮层环路,从而促进跨脑区神经同步化及脑网络重组[36]。BERMUDEZ等[37]发现,运动执行与运动想象的联合执行能够产生显著的神经同步化,而神经同步化模式的重塑作为脑卒中后神经可塑性的重要体现,是功能恢复的重要生理基础之一[38]。此外,该研究还指出,相较于精确的单一控制,BCI-VR技术中的游戏化功能性控制具有更高的准确率,提示其在提升患者交互体验和学习效率方面具备潜在优势。VOURVOPOULOS等[39]基于功能磁共振成像的研究结果也发现,BCI-VR干预后,脑卒中患者在运动想象相关脑区的激活强度与范围显著增加,并伴随病灶侧初级运动皮层及辅助运动区的重新募集,表明训练诱导了运动相关神经网络的功能性重组。

2.2　多模态神经反馈

神经反馈是一种基于实时神经信号的闭环干预策略,能够帮助运动功能受限的脑卒中患者通过自我调节运动相关脑区的活动,促进神经可塑性与功能重建[40]。BCI技术可实时采集并解码运动相关脑区的神经活动,提供了可靠的神经信号解码与反馈通道。然而,传统反馈方式多依赖单一感觉通道,难以形成稳定有效的神经反馈通路。相较于传统单一模态反馈,BCI-VR技术可同步提供视觉、听觉、触觉等多模态实时反馈刺激,并结合运动反馈与运动观察策略,进一步提升反馈的可感知性与参与度,形成闭环神经反馈机制,从而提高训练效果,促进运动相关脑区的激活与重组,增强对其功能网络的激活与重构[41]。研究证实,相较于单纯的视-听刺激,引入触觉反馈所形成的视-听-触多模态刺激可更大程度地提高运动相关脑区的激活程度,从而为脑卒中患者运动功能障碍的恢复提供更为有利的神经生理基础[42]。

3　BCI-VR融合技术在脑卒中康复领域的应用

3.1　上肢运动功能障碍康复

上肢运动功能障碍是脑卒中后最常见且最持久的功能障碍之一,严重影响患者的日常生活活动能力和生活质量,上肢功能重建始终是脑卒中康复的重点。近年来,BCI-VR技术的研究也多集中于上肢运动功能障碍的康复。有研究对4例慢性期脑卒中患者实施了8次BCI-VR上肢功能训练,结果显示所有患者上肢运动功能、整体功能恢复水平与生活质量均有所提高,且在上肢运动功能障碍最严重的患者中出现了静息态运动诱发电位[43]。同年,该团队结合影像学方法,进一步分析了BCI-VR技术诱导的脑功能改变,结果显示单例慢性期脑卒中患者上肢运动功能提高,同时大脑激活水平增加[39]。功能磁共振成像显示脑卒中后受损运动皮层的输入和输出减少,导致运动功能障碍。BCI-VR技术通过促进初级运动皮层及辅助运动区的代偿性参与[39],增强残存神经网络的激活与功能连接,促进皮层可塑性重组,从而改善运动功能。在运动功能损伤较严重的个体中,与运动控制相关的残存或代偿性脑区常表现出更高的可塑性潜力[43],对神经调控干预具有更强的响应性,因此更容易诱导功能重组并取得更显著的康复效果。

XIE等[44]的研究表明,运动想象范式BCI训练能够增加健康个体运动区神经活动强度和能量水平,提示其可能对受损运动神经网络的重塑具有一定刺激作用,且在VR场景下参与者能够调动更多的运动皮层神经元活动,不仅表现出更高的运动想象识别率,而且其主动参与度和运动神经控制能力

也更优，这进一步表明BCI-VR技术可有效调控相关运动功能脑区及其功能性神经网络的激活、整合与重构。邵谢宁等[42]将BCI-VR技术与触觉手套相结合，构建了包含视觉、听觉及触觉的多模态反馈训练情境，结果显示该模式能够更加充分地调动大脑运动功能区的神经活动，提示运动与感觉传导通路的双向促进较单一环境在脑卒中康复中更具优势，BCI-VR技术与其他感觉刺激协同应用，可进一步增强康复效果。

3.2 下肢运动功能障碍康复

下肢运动功能障碍显著影响脑卒中患者的行走能力与平衡控制，进而制约其日常生活独立性和社会参与度。步态对称性与稳定性是评估患者行走能力与平衡控制水平的关键运动学指标。LUU等[45]的研究证实，BCI-VR技术可通过视觉运动学扰动显著调节健康个体的步态对称性，并诱发步态控制的适应性变化。步态对称性受中枢神经系统对感觉与运动一致性的调控，而VR视觉刺激的加入可诱发皮层可塑性发生改变，诱导中枢对步态对称性的再学习，为脑卒中患者步态的恢复提供了新的干预路径。研究发现，BCI-VR技术可增加大脑相关运动区域之间的协作，从而改善脑卒中患者的步态稳定性、下肢运动功能和平衡能力[46]。WAN等[47]进一步通过随机对照试验验证BCI-VR技术可改善脑卒中患者的平衡功能与步行稳定性，并显著诱发足部对应皮层区域的事件相关去同步化[48]，通过激活相关运动脑区促进神经可塑性，为脑卒中后下肢运动功能恢复提供有效支持。

3.3 认知功能障碍康复

认知是人类获取和应用知识的基本过程，涵盖注意力、记忆、情感等多个方面[49]。认知功能的评估和干预是脑卒中后康复管理的重要组成部分，对患者的全面恢复具有重要意义。其中，注意力和执行功能作为认知的核心领域，是保障运动功能恢复和全面生活重建的基础之一。BCI-VR下肢训练在改善脑卒中患者下肢运动功能的同时，也可改善其认知能力，包括一般认知功能及注意力等[46-47]。此外，该研究中BCI-VR组在进行下肢训练时，还需同步完成VR环境中的上肢任务（如转向操作和目标触发等）。这类运动-认知双任务训练可增强患者的注意力集中与分配能力，进而通过促进大脑运动控制网络与认知网络的协同激活，进一步改善平衡控制和步行稳定能力。目前BCI-VR技术在脑卒中认知康复中的研究仍处于探索阶段，相关研究证据主要来源于少量以运动功能为主要结局指标的探索研究，认知功能的改善多为次要发现，尚缺乏以认知功能为主要结局指标的系统性研究。

BCI-VR融合技术调控运动与认知功能的代表性研究见表1。

4 关键问题与发展方向

尽管近年来BCI-VR技术在脑卒中康复领域展现出良好的应用前景，但是其神经调控机制、干预策略及临床应用模式仍有待进一步完善。首先，现有BCI-VR技术多采用单一模态反馈，多模态神经反馈对功能障碍恢复的具体作用机制及最优配置方案尚不明确。未来可基于多模态反馈框架，结合脑电图、肌电、眼动及运动学参数，并借助功能磁共振成像、功能近红外等神经影像学技术，系统探索不同反馈模式对感觉运动网络、镜像神经元系统及脑功能重塑的影响，从而建立多模态反馈的最优配置方案。其次，受限于现有技术条件，当前多数研究主要关注四肢运动功能及认知功能的改善，但其内在作用机制，尤其是与认知及执行功能相关的神经机制仍有待阐明。未来可将注意力、工作记忆及执行控制等认知训练任务嵌入VR康复场景，结合前额叶及顶叶相关脑区的神经活动分析，深入探讨运动-认知协同的神经机制。同时建议采用多维行为学评估、脑网络连接分析及纵向随访设计，系统评估BCI-VR技术对脑卒中患者高级认知功能恢复的长期影响。最后，临床应用中脑卒中患者的脑电信号往往较弱，易受肌电干扰、环境噪声等外部因素影响，导致信噪比下降，从而影响系统的解码能力。此外，个体间的脑电图特征与运动想象能力存在差异，现有解码模型难以实现通用，导致BCI-VR技术在实际应用中的准确率可能偏低[50]。因此，亟需开发具有自适应能力和个体化特征的解码算法，依据患者实时脑电反馈动态调整任务难度与虚拟场景，以实现精准康复干预[51]。未来可重点发展融合深度学习与迁移学习的自适应解码算法，通过在线增量学习、个体化参数更新等手段，实现对不同患者脑电特征的动态适配。同时可结合实时神经反馈机制，根据患者当前脑状态、任务表现及疲劳程度，动态调整训练难度、反馈强度与虚拟场景复杂度，从而实现面向不同脑卒中亚型、病程阶段及功能水平患者的精准化康复干预[52-53]。

表1　BCI-VR融合技术调控运动与认知功能的代表性研究

Table 1　Representative studies of BCI-VR integration technology for regulating motor and cognitive functions

研究者	研究对象	样本量	研究设计	干预方法	干预周期	主要结果
VOURVOPOULOS等2019[39]	慢性期脑卒中患者	1	病例报告	运动想象BCI+VR上肢功能训练	10次,共3周	① 上肢运动功能提高;② 干预后静息态α节律功率增加
邵谢宁等2024[42]	健康受试者	10	对照队列研究	视-听觉刺激组:运动想象BCI+VR手功能训练(融合视-听觉); 视-听-触觉刺激组:运动想象BCI+VR手功能训练(融合视-听-触觉)	2试次/轮次,共2轮次	① 视-听-触觉刺激组大脑功能运动区γ频段激活更显著;② 2组脑电节律功率谱密度存在差异
VOURVOPOULOS等2019[43]	慢性期脑卒中患者	4	单个队列研究	BCI+VR上肢功能训练	1.5 h/次,共8次	① 上肢运动功能提高;② 整体功能与生活质量提高;③ 仅上肢运动功能最差者的静息运动诱发电位有所恢复
XIE等2022[44]	健康受试者	9	随机对照试验	静态组:运动想象BCI+静态场景; 动态组:运动想象BCI+动态场景; VR组:运动想象BCI+VR场景	20 min/次,共14 d	① VR组运动想象神经激活广度和深度高于静态组和动态组;② VR组运动想象识别率高于静态组和动态组
LUU等2016[45]	健康受试者	4	单个队列研究	BCI+VR步行训练	50 min/次,共8次	① 视觉运动学扰动下步态适应性提高;② 视觉运动学扰动前后步态对称性存在差异
WAN等2025[46]	亚急性期-早期慢性期脑卒中患者	9	单个队列研究	运动想象BCI+VR踏板训练	30 min/d,5 d/周,共4周	① 下肢运动功能提高;② 认知功能提高;③ 注意力水平提高;④ 平衡功能与信息处理能力呈正相关
WAN等2025[47]	亚急性期-早期慢性期脑卒中患者	30	随机对照试验	对照组:常规踏板训练;BCI-VR组:运动想象BCI+VR踏板训练	20 min/d,5 d/周,共4周	① BCI-VR组平衡功能改善优于对照组;② BCI-VR组步行稳定性改善优于对照组;③ BCI-VR组注意力改善优于对照组;④ 平衡功能与信息处理能力呈正相关

此外,目前BCI-VR技术相关研究仍以小样本、单中心试点为主,随访周期较短,缺乏长期疗效及机制验证的高质量证据。未来需进一步建立标准化干预流程与统一评价体系,开展多中心、大样本随机对照试验,并结合长期随访与多模态神经影像评估,系统验证BCI-VR技术在运动功能恢复、认知改善及神经可塑性重建中的临床价值与作用机制,从而推动其向临床规范化与可转化应用发展。

5　小　结

随着脑卒中发病率的上升,临床对高效、精准的神经康复方案的需求日益迫切,BCI-VR技术融合了二者的优势,与脑卒中患者的康复需求高度契合,既能通过强化神经可塑性与神经反馈加速功能重塑、提升康复效果,又能提高患者的训练依从性,为神经康复领域提供了极具临床转化潜力的创新技术路径。

尽管BCI-VR技术在脑卒中患者上、下肢运动功能及认知功能障碍康复方面已显示出初步成效和应用潜力，但是在信号稳定性、个体化设置和临床规范化等方面仍存在不足。未来应围绕多模态神经反馈的作用机制、运动-认知协同训练的最优模式以及个体化干预策略开展系统研究，进一步推动该技术在临床场景中的广泛应用。

参考文献

[1] TU W J, WANG L D, Special Writing Group of China Stroke Surveillance Report. China stroke surveillance report 2021 [J]. Mil Med Res, 2023, 10(1): 33.

[2] 张通，赵军，白玉龙，等. 中国脑血管病临床管理指南(节选版)：卒中康复管理[J]. 中国卒中杂志，2019，14(8)：823-831.
ZHANG T, ZHAO J, BAI Y L, et al. Chinese stroke association guidelines for clinical management of cerebrovascular disorders (excerpts): management of stroke rehabilitation [J]. Chin J Stroke, 2019, 14(8): 823-831.

[3] ZHANG H Y, JIAO L, YANG S X, et al. Brain-computer interfaces: the innovative key to unlocking neurological conditions [J]. Int J Surg, 2024, 110(9): 5745-5762.

[4] WOLPAW J R, BIRBAUMER N, MCFARLAND D J, et al. Brain-computer interfaces for communication and control [J]. Clin Neurophysiol, 2002, 113(6): 767-791.

[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.
YANG B H. Application of motor imagery brain-computer interface in rehabilitation of neurological diseases [J]. Rehabil Med, 2023, 33(6): 477-485.

[6] PICHIORRI F, MORONE G, PETTI M, et al. Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery [J]. Ann Neurol, 2015, 77(5): 851-865.

[7] 崔明阳. 虚拟现实技术赋能数字媒体艺术设计高质量发展路径研究[J]. 鞋类工艺与设计，2025，5(7)：71-73.
CUI M Y. Research on the development path of digital media art design [J]. Shoes Technol Des, 2025, 5(7): 71-73.

[8] CECOTTI H, GRASER A. Convolutional neural networks for P300 detection with application to brain-computer interfaces [J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2011, 33(3): 433-445.

[9] 燕桢，张立新. 脑机接口在康复治疗中的应用[J]. 中国康复医学杂志，2020，35(2)：228-232.
YAN Z, ZHANG L X. Application of brain-computer interface in rehabilitation therapy [J]. Chin J Rehabil Med, 2020, 35(2): 228-232.

[10] 陆蓉蓉，高天昊，胡义茜，等. 基于运动想象的脑机接口系统联合不同末端效应器对慢性期脑卒中患者上肢运动功能改善的初步研究[J]. 中国康复医学杂志，2024，39(8)：1104-1110.
LU R R, GAO T H, HU Y Q, et al. Improving upper limb motor function in chronic stroke patients using a brain-computer interface system based on motor imagery combined with different end effectors: a preliminary study [J]. Chin J Rehabil Med, 2024, 39(8): 1104-1110.

[11] NICOLAS-ALONSO L F, CORRALEJO R, GOMEZ-PILAR J, et al. Adaptive stacked generalization for multiclass motor imagery-based brain computer interfaces [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2015, 23(4): 702-712.

[12] YANG W W, ZHANG X Y, LI Z J, et al. The effect of brain-computer interface training on rehabilitation of upper limb dysfunction after stroke: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Front Neurosci, 2021, 15: 766879.

[13] XIE Y L, YANG Y X, JIANG H, et al. Brain-machine interface-based training for improving upper extremity function after stroke: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Front Neurosci, 2022, 16: 949575.

[14] HOLZ E M, BOTREL L, KAUFMANN T, et al. Long-term independent brain-computer interface home use improves quality of life of a patient in the locked-in state: a case study [J]. Arch Phys Med Rehabil, 2015, 96(3 Suppl): S16-S26.

[15] VOURVOPOULOS A, BERMÚDEZ I BADIA S. Motor priming in virtual reality can augment motor-imagery training efficacy in restorative brain-computer interaction: a within-subject analysis [J]. J NeuroEngineering Rehabil, 2016, 13(1): 69.

[16] LEEB R, FRIEDMAN D, MÜLLER-PUTZ G R, et al. Self-paced (asynchronous) BCI control of a wheelchair in virtual environments: a case study with a tetraplegic [J]. Comput Intell Neurosci, 2007, 2007: 79642.

[17] REN S X, WANG W Q, HOU Z G, et al. Enhanced motor imagery based brain-computer interface via FES and VR for lower limbs [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2020, 28(8): 1846-1855.

[18] LI F L, PENG W J, JIANG Y L, et al. The dynamic brain networks of motor imagery: time-varying causality analysis of scalp EEG [J]. Int J Neural Syst, 2019, 29(1): 1850016.

[19] LAVER K E, GEORGE S, THOMAS S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation [J]. Cochrane Database Syst Rev, 2025, 6(6): CD008349.

[20] PARDINI S, GABRIELLI S, GIOS L, et al. Customized virtual reality naturalistic scenarios promoting engagement and relaxation in patients with cognitive impairment: a proof-of-concept mixed-methods study [J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 20516.

[21] WEN D, FAN Y L, HSU S H, 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.

[22] LEE J H, KYEONG S, KANG H, et al. Structural and functional connectivity correlates with motor impairment in chronic supratentorial stroke: a multimodal magnetic resonance imaging study [J]. Neuroreport, 2019, 30(7): 526-531.

[23] GRIFFIS J C, METCALF N V, CORBETTA M, et al. Structural disconnections explain brain network dysfunction after stroke [J]. Cell Rep, 2019, 28(10): 2527-2540.

[24] ZEILER S R. Should we care about early post-stroke rehabilitation? Not yet, but soon [J]. Curr Neurol Neurosci Rep, 2019, 19(3): 13.

[25] CIRILLO C, BRIHMAT N, CASTEL-LACANAL E, et al. Post-stroke remodeling processes in animal models and humans [J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2020, 40(1): 3-22.

[26] JOHANSSON B B. Current trends in stroke rehabilitation. A review with focus on brain plasticity [J]. Acta Neurol Scand, 2011, 123(3): 147-159.

[27] NITHIANANTHARAJAH J, HANNAN A J. Enriched environments, experience-dependent plasticity and disorders of the nervous system [J]. Nat Rev Neurosci, 2006, 7(9): 697-709.

[28] DALY J J, WOLPAW J R. Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation [J]. Lancet Neurol, 2008, 7(11): 1032-1043.

[29] SLATER M. Implicit learning through embodiment in immersive virtual reality [M]. Singapore: Springer, 2017: 19-33.

[30] MUTHUKUMARASWAMY S D, SINGH K D. Modulation of the human mirror neuron system during cognitive activity [J]. Psychophysiology, 2008, 45(6): 896-905.

[31] RIZZOLATTI G, CRAIGHERO L. The mirror-neuron system [J]. Annu Rev Neurosci, 2004, 27: 169-192.

[32] NEUPER C, SCHERER R, WRIESSNEGGER S, et al. Motor imagery and action observation: modulation of sensorimotor brain rhythms during mental control of a brain-computer interface [J]. Clin Neurophysiol, 2009, 120(2): 239-247.

[33] PFURTSCHELLER G, ARANIBAR A. Event-related cortical desynchronization detected by power measurements of scalp EEG [J]. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1977, 42(6): 817-826.

[34] GARRISON K A, WINSTEIN C J, AZIZ-ZADEH L. The mirror neuron system: a neural substrate for methods in stroke rehabilitation [J]. Neurorehabil Neural Repair, 2010, 24(5): 404-412.

[35] KRUEGER J, KRAUTH R, REICHERT C, et al. Hebbian plasticity induced by temporally coincident BCI enhances post-stroke motor recovery [J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 18700.

[36] YUAN K, CHEN C, WANG X, et al. BCI training effects on chronic stroke correlate with functional reorganization in motor-related regions: a concurrent EEG and fMRI study [J]. Brain Sci, 2021, 11(1): 56.

[37] BERMUDEZ I BADIA S, GARCIA MORGADE A, SAMAHA H, et al. Using a hybrid brain computer interface and virtual reality system to monitor and promote cortical reorganization through motor activity and motor imagery training [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2013, 21(2): 174-181.

[38] OLAFSON E R, JAMISON K W, SWEENEY E M, et al. Functional connectome reorganization relates to post-stroke motor recovery and structural and functional disconnection [J]. Neuroimage, 2021, 245: 118642.

[39] VOURVOPOULOS A, JORGE C, ABREU R, et al. Efficacy and brain imaging correlates of an immersive motor imagery BCI-driven VR system for upper limb motor rehabilitation: a clinical case report [J]. Front Hum Neurosci, 2019, 13: 244.

[40] SANDERS Z B, FLEMING M K, SMEJKA T, et al. Self-modulation of motor cortex activity after stroke: a randomized controlled trial [J]. Brain, 2022, 145(10): 3391-3404.

[41] NUNES J D, VOURVOPOULOS A, BLANCO-MORA D A, et al. Brain activation by a VR-based motor imagery and observation task: an fMRI study [J]. PLoS One, 2023, 18(9): e0291528.

[42] 邵谢宁, 张艺滢, 张栋, 等. 融合多感官刺激的虚拟现实:脑机接口手功能增强康复系统[J]. 生物医学工程学杂志, 2024, 41(4): 656-663.
SHAO X N, ZHANG Y Y, ZHANG D, et al. Virtual reality-brain computer interface hand function enhancement rehabilitation system incorporating multi-sensory stimulation [J]. J Biomed Eng, 2024, 41(4): 656-663.

[43] VOURVOPOULOS A, PARDO O M, LEFEBVRE S, et al. Effects of a brain-computer interface with virtual reality (VR) neurofeedback: a pilot study in chronic stroke patients [J]. Front Hum Neurosci, 2019, 13: 210.

[44] XIE P, WANG Z H, LI Z Y, et al. Research on rehabilitation training strategies using multimodal virtual scene stimulation [J]. Front Aging Neurosci, 2022, 14: 892178.

[45] LUU T P, HE Y T, BROWN S, et al. Gait adaptation to visual kinematic perturbations using a real-time closed-loop brain-computer interface to a virtual reality avatar [J]. J Neural Eng, 2016, 13(3): 036006.

[46] WAN C L, ZHANG W T, NIE Y, et al. Impact of motor imagery-based brain-computer interface combined with virtual reality on enhancing attention, executive function, and lower-limb function in stroke: a pilot study [J]. PM&R, 2025, 17(7): 811-821.

[47] WAN C L, ZHANG Q Y, QIU Y, et al. Effects of dual-task mode brain-computer interface based on motor imagery and virtual reality on balance and attention in patients with stroke: a randomized controlled pilot trial [J]. J NeuroEngineering Rehabil, 2025, 22(1): 187.

[48] CARDOSO V F, DELISLE-RODRIGUEZ D, ROMERO-LAISECA M A, et al. Effect of a brain-computer interface based on pedaling motor imagery on cortical excitability and connectivity [J]. Sensors (Basel), 2021, 21(6): 2020.

[49] 万象隆, 傅岸峰, 要逸铎, 等. 基于BCI与VR的认知诊疗应用[J]. 工程科学学报, 2025, 47(4): 824-836.
WAN X L, FU A F, YAO Y D, et al. Applications of BCI and VR in cognitive diagnosis and treatment [J]. Chin J Eng, 2025, 47(4): 824-836.

[50] ANG K K, GUAN C T, CHUA K S, et al. A large clinical study on the ability of stroke patients to use an EEG-based motor imagery brain-computer interface [J]. Clin EEG Neurosci, 2011, 42(4): 253-258.

[51] 周晓宇, 许敏鹏, 肖晓琳, 等. 脑-机接口中脑电解码算法研究综述[J]. 生物医学工程学杂志, 2019, 36(5): 856-861.
ZHOU X Y, XU M P, XIAO X L, et al. A review of researches on electroencephalogram decoding algorithms in brain-computer

interface [J]. J Biomed Eng, 2019, 36(5): 856-861.
[52] WANG K, LIU Y W, TIAN F F, et al. Adaptive neurofeedback training using a virtual reality game enhances motor imagery performance in brain-computer interfaces [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2025, 33: 2956-2966.
[53] ROSE SIN YI L, SU J J, HAMMODA A O, et al. Effects of virtual reality-based cognitive interventions on cognitive function and activity of daily living among stroke patients: systematic review and meta-analysis [J]. J Clin Nurs, 2024, 33(3): 1169-1184.

Neural Mechanisms and Applications of the Integration of Brain-Computer Interface and Virtual Reality in Stroke Rehabilitation

LI Jing[1], FAN Jingyuan[2], LIANG Xinwen[3], PAN Weimin[4,5*]
[1] *Xi'an Gaoxin Hospital, Xi'an, Shaanxi 710075, China;*
[2] *Xidian Group Hospital, Xi'an, Shaanxi 710077, China;*
[3] *Tangdu Hospital of Air Force Medical University, Xi'an, Shaanxi 710038, China;*
[4] *College of Sports and Health Sciences, Xi'an Physical Education University, Xi'an, Shaanxi 710068, China;*
[5] *Engineering Research Center of Innovative Technology of Intelligent Sports Equipment, Universities of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710068, China*
*Correspondence: PAN Weimin, E-mail: panweimin@163.com

ABSTRACT Stroke is the leading cause of disability among adults in China, and patients often suffer from permanent neurological deficits, including limb motor dysfunction and cognitive impairment, which severely affect their quality of life. The integration of brain-computer interface and virtual reality (BCI-VR) technology has demonstrated significant therapeutic efficacy and great potential in functional rehabilitation after stroke. This review summarizes the research progress of BCI-VR technology in stroke rehabilitation and elucidates its core mechanisms: it induces neuroplasticity and brain network reorganization, and modulates motor-related neural networks through multimodal neurofeedback, thereby promoting brain functional reconstruction and functional recovery. This review also summarizes clinical applications of BCI-VR in the rehabilitation of upper-limb and lower-limb motor dysfunction as well as cognitive impairment, while objectively analyzing current limitations of this technology in neuromodulation mechanisms, intervention strategies, and clinical application models. Future efforts should be made to enhance signal acquisition and processing capabilities, develop individualized decoding algorithms, establish optimal configurations for multimodal feedback, and conduct large-sample, multicenter randomized controlled trials, in order to build a more comprehensive BCI-VR integrated rehabilitation system and provide theoretical foundations and practical guidance for precise and personalized stroke rehabilitation.
KEY WORDS stroke; brain-computer interface; virtual reality; motor function; cognitive function; neuroplasticity
DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.09009

(上接第674页)

ompared with the model group, LXA4 content was higher in the EA group (P<0.05). No significant difference in PWL was found among all groups before modeling (P>0.05). At 2 weeks after modeling, PWL in all modeled subgroups was lower than that in the normal control group (P<0.05), indicating successful DNP modeling. At 6 weeks after modeling (at completion of intervention), compared with the normal control group, PWL was lower in the model group (P<0.05); compared with the model group, PWL was higher in the ATL and EA groups (P<0.05); compared with the ATL group, PWL was lower in the ATL+BOC-2 group (P<0.05); compared with the EA group, PWL was lower in the EA+BOC-2 group (P<0.05). Transmission electron microscopy revealed moderate to severe pathological structural damage in the sciatic nerve of the model group; all treatment groups showed markedly attenuated lesions compared with the model group, with the EA group exhibiting the most prominent improvement. Compared with the normal control group, the model group showed lower protein realtive expression levels of Nrf2, HO-1 and NQO1, and higher p-Akt protein realtive expression levels in the spinal dorsal horn (P<0.05); compared with the model group, the ATL and EA groups showed higher Nrf2, HO-1 and NQO1 protein realtive expression levels, and lower p-Akt protein realtive expression levels (P<0.05); compared with the ATL group, the ATL+BOC-2 group showed lower Nrf2, HO-1 and NQO1 protein realtive expression levels, and higher p-Akt protein realtive expression levels (P<0.05); compared with the EA group, the EA+BOC-2 group showed lower Nrf2, HO-1 and NQO1 protein realtive expression levels, and higher p-Akt protein realtive expression levels (P<0.05). **Conclusion** Electroacupuncture may exert its analgesic effect by promoting LXA4 expression and upregulating its receptor, thereby inhibiting Akt phosphorylation in the spinal dorsal horn, upregulating the Nrf2-mediated antioxidative stress pathway, and attenuating peripheral nerve injury in DNP rats.
KEY WORDS diabetic neuropathic pain; Nrf2 antioxidant pathway; oxidative stress; electroacupuncture; lipoxin; spinal dorsal horn; sciatic nerve
DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.09008