

# 非侵入性技术治疗卒中后肩痛的研究进展

卢 玥, 王 红\*

沈阳市第一人民医院神经智能康复中心, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月14日

## 摘 要

卒中后肩痛(post-stroke shoulder pain, PSSP)作为脑卒中后的常见并发症, 阻碍康复治疗计划的正常实施, 并导致卒中后抑郁和生活质量下降。本文旨在系统综述近年来新兴于PSSP治疗的非侵入性技术的最新研究进展和临床疗效证据, 并对比分析各技术优势和适用场景。并在此基础上, 结合患者临床分期与病理特征, 提出了一套完整的个体化临床决策指导路径, 为临床实践中精准应用这些新技术提供了可操作性的临床决策体系。同时, 本综述强调, 仍需开展更多严谨的临床试验以验证上述技术的有效性, 并探索其在个体化康复方案中的最优整合策略, 从而为临床决策路径的完善提供更坚实的科学依据。

## 关键词

卒中后肩痛, 临床决策, 非侵入性技术

# Research Progress on Non-Invasive Technologies for Post-Stroke Shoulder Pain

Yue Lu, Hong Wang\*

Neuro-Intelligent Rehabilitation Center, The First People's Hospital of Shenyang, Shenyang Liaoning

Received: April 13, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 14, 2026

## Abstract

Post-stroke shoulder pain (PSSP), a common complication following a stroke, impedes the normal implementation of rehabilitation treatment plans and leads to post-stroke depression and a decline in the quality of life. This article aims to systematically review recent advances in non-invasive technologies for post-stroke shoulder pain (PSSP) and their clinical efficacy, and to conduct a detailed comparative analysis of each technology's advantages and optimal indications. Based on these

\*通讯作者。

findings and integrating patients' clinical stages and core pathological characteristics, we propose a comprehensive individualized clinical decision-making pathway, thereby providing an operational framework for the precise application of these emerging technologies in future clinical practice. Furthermore, this review emphasizes that more rigorous clinical trials are still needed to verify the effectiveness of the aforementioned technologies and to explore the optimal integration strategies for them in individualized rehabilitation programs, thereby providing a more solid scientific basis for the improvement of clinical decision-making pathways.

## Keywords

Post-Stroke Shoulder Pain, Clinical Decision-Making, Non-Invasive Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

脑卒中是全球致残和死亡的重要原因之一, 随着急性期治疗水平提高, 存活患者不断增加, 随之而来的各种后遗症亦更为常见[1] [2]。其中, 卒中后肩痛(post-stroke shoulder pain, PSSP)的发生率高达30%~65% [3]-[5]。其发病机制可能涉及中枢敏化、周围神经损伤、肩关节力学改变及痉挛导致的肌肉失衡等[6] [7]。PSSP 不仅影响患侧上肢运动功能和患者日常生活, 还会降低睡眠质量和生活质量, 影响康复训练[4] [8] [9]。近年来, 随着康复理念更新和技术发展, 非侵入性手段在 PSSP 治疗中取得了显著进展。新兴技术在安全性、依从性和功能促进方面弥补了传统治疗的不足, 拓展了临床干预选择。本文旨在系统梳理近年来用于 PSSP 的主要非侵入性技术, 概述其临床疗效、适应范围与应用特点, 为制定个体化的治疗策略和优化康复效果提供参考。

## 2. PSSP 的治疗背景

临床上 PSSP 的治疗需根据病因选择相应方法[7] [10]。神经源性疼痛常采用药物、电刺激、神经阻滞或肉毒素注射; 机械性疼痛则可结合肌内效贴、矫形器及吊带等手段, 针灸亦可通过改善局部血流发挥镇痛作用[11]-[14]。由于患者的发病时机、表现及严重程度存在差异, 往往需多学科联合、多种治疗方式协同干预[4] [15] [16]。近年来, 重复经颅磁刺激、机器人辅助、虚拟/增强现实及可穿戴传感器等新技术逐步应用于卒中康复, 在提升训练参与度、改善功能及降低治疗负担方面展现优势, 并为任务导向训练提供了更安全、可控的环境, 这是传统方法难以实现的[17]。这些进展为探索更高效、个体化的 PSSP 治疗策略奠定了基础。

## 3. 非侵入性技术在 PSSP 治疗中的应用进展

### 3.1. 重复经颅磁刺激(Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, rTMS)

重复经颅磁刺激作为一种无痛、无创、能提高大脑皮层兴奋性的技术, 在临床上常用作辅助治疗方式, 以增强 PSSP 的治疗效果[18]-[20](见表 1)。rTMS 对脑卒中后疼痛具有良好的治疗效果, 其镇痛的机制包括改变皮质兴奋性和突触可塑性, 调节相关神经递质的释放, 以及影响参与疼痛处理和调节的大脑区域的结构和功能连接[21]-[23]。研究表明, rTMS 改善脑卒中恢复期患者的肩痛、肩关节被动关节活动度并提高患侧的上肢运动功能[19]。然而也有研究显示 rTMS 对患者疼痛缓解和日常生活活动能力的

提高没有任何帮助[24]。两种截然相反的证据表明 rTMS 在 PSSP 的治疗效果上存在较大的个体差异, 可能与患者的卒中类型、病程长短、脑损伤程度以及个人的功能恢复潜力密切相关[25]。

双峰平衡 - 恢复模型作为解释脑卒中后功能恢复的机制, 提出了“结构储备”这一概念。结构储备充足的轻中度患者应提高受损侧半球的兴奋性以促进功能恢复。而结构储备较少的重度患者则依赖对侧半球的代偿功能[26]-[28]。临床上, rTMS 的治疗方案可根据对皮层兴奋性的影响被归类为促进型或抑制型, 通过经颅磁刺激获得的运动诱发电位(MEP)状态这一生物标志物, 可以识别患者残留的皮质脊髓束的功能, 并根据双峰平衡恢复模型指导治疗方案的选择[29] [30]。然而, 目前针对 PSSP 的 rTMS 精准康复治疗仍是空白, 因此, 未来应当进一步探索如何根据患者的个体差异, 如大脑半球病灶位置及损伤严重程度, 制定针对性的 rTMS 的治疗方案, 以实现更为精准的康复干预[31]。

**Table 1.** The basic characteristics of the study on repetitive transcranial magnetic stimulation for PSSP treatment  
**表 1.** 重复经颅磁刺激治疗 PSSP 研究的基本特征

序号	第一作者及年份	国家	研究对象	样本量 (实验组/对照组)	干预方法及时间 (实验组/对照组)	结局指标	主要发现
1	Manuel Torres-Parada, 2020	西班牙	脑卒中后肩痛患者	119 例(其中严重肌损伤组 46 例, 中度肌损伤组 29 例, 低度肌损伤组 44 例); 无对照组	观察性随访 1 年(出院后 3、6、12 个月进行评估)	PSSP 发病时间、持续时间、疼痛对治疗的反应、感觉障碍、言语障碍、痉挛、神经病理性疼痛	严重肌损伤组发病早、病程长、感觉/言语障碍及痉挛发生率高; 低肌损伤组发病晚、病程短、并发症少; 中度组特征介于两者之间。
2	陶林花, 2023	中国	脑卒中恢复期偏瘫性肩痛患者	治疗组 20 例; 对照组 20 例	<b>实验组:</b> 10.0 Hz 高频重复经颅磁刺激(rTMS) + 消炎镇痛药物 + 常规康复治疗。rTMS 参数: 频率 10 Hz, 强度 80% 静息运动阈值, 刺激 10 s 间歇 50 s, 总 20 min, 每日 1 次, 每周 5 次, 共 4 周(20 次); <b>对照组:</b> 假 rTMS (线圈垂直于颅骨) + 消炎镇痛药物 + 常规康复治疗(同实验组)	数字疼痛评分法(NPRS)、被动肩关节活动度、Fugl-Meyer 上肢运动功能评分、改良 Barthel 指数	10.0 Hz 高频 rTMS 可显著缓解脑卒中恢复期偏瘫性肩痛, 改善患侧被动肩关节活动度和上肢运动功能; 但在提高日常生活活动能力(MBI)方面, 与对照组差异无统计学意义(P > 0.05)。
3	郭玲, 2024	中国	脑卒中后肩痛患者 (PSSP)	实验组 30 例; 对照组 30 例	<b>实验组:</b> 体外冲击波(ESWT)+ 重复经颅磁刺激(rTMS)+ 常规康复治疗。ESWT: 强度 1~1.5 Bar, 频率 4~10 Hz, 每痛点 200~300 次, 总 2000 脉冲, 每周 3 次, 共 4 周; rTMS: 1.5 Hz, 80% 静息运动阈值, 1000 脉冲/日, 每日 1 次, 每周 5 次, 共 4 周; <b>对照组:</b> 体外冲击波(ESWT) + 常规康复治疗(同实验组), 不给予 rTMS (参数同上)	主要结局指标: 视觉模拟评分(VAS)、Fugl-Meyer 上肢运动功能评分(FMA-UE)、临床总有效率	rTMS 联合 ESWT 可改善脑卒中后肩痛程度和上肢运动功能。

续表

4	Yagmur Aydin, 2024	土耳其	脑卒中后肩痛患者(亚急性或慢性, NRS > 4, 无全层肩袖撕裂, 上肢 MAS < 3 级)	实验组 7 例; 对照组 11 例 (实验组脱落 4 例, 对照组无脱落)	<b>实验组:</b> 5 Hz 高频神经导航重复经颅磁刺激(rTMS), 作用于患侧 M1 区, 1000 脉冲/次, 每日 1 次, 每周 5 次, 共 3 周(15 次)。 <b>对照组:</b> 假 rTMS (线圈反向放置, 1% 静息运动阈值强度以产生咔哒声但不刺激大脑)	主要结局: 数字疼痛评分(NRS)	与假刺激相比, 5 Hz rTMS 未显示对疼痛(NRS)有显著有益效果, 高频神经导航 rTMS 对脑卒中后肩痛无显著疗效。
5	Jingchun Liu, 2015	中国	慢性皮质下卒中患者(病程 > 6 个月, 整体运动功能恢复良好, Fugl-Meyer > 90/100)	实验组: 20 例患者; 对照组: 16 例健康对照	所有受试者接受多模态 MRI 检查(静息态 fMRI 和 DTI), 采集时间点为卒中后 11~64 个月(平均 29.8 个月); 对照组为健康志愿者, 无任何干预。	双侧初级运动皮层(M1-M1)静息态功能连接(rsFC); 患侧皮质脊髓束(CST)的各向异性分数(FA); M1-M1 解剖连接(经胼胝体纤维)的 FA	M1-M1 解剖连接损伤继发于 CST 损伤, 而增强的 M1-M1 功能连接可能代偿 CST 损伤, 促进运动功能恢复。
6	Jun Soo Noh, 2019	韩国	亚急性脑卒中患者(首次单侧卒中, 轻中度偏瘫, 患手可独立活动手指, MEP 可引出)	实验组 11 例; 对照组 11 例	<b>实验组:</b> 1 Hz 低频 rTMS (对侧 M1 区, 强度 120% 静息运动阈值, 20 分钟/次) + 同时观看动作观察视频 (5 种手部动作, 共 20 分钟), 连续 10 个工作日。 <b>对照组:</b> 相同参数的 1 Hz rTMS, 不观看视频。两组均接受常规物理及作业治疗(每日 2 次, 每次 1 小时, 每周 5 天)	主要结局: Fugl-Meyer 上肢评分(FMA)、手动功能测试(MFT)、握力	治疗后两组 FMA 及 MFT 总分均显著改善。联合 rTMS 与动作观察可安全改善卒中后上肢远端功能, 但未显示优于单纯 rTMS。

### 3.2. 体外冲击波疗法(Extracorporeal Shockwave Therapy, ESWT)

体外冲击波疗法主要用于各种肌肉骨骼疾病的康复。其工作原理是通过向疼痛区域释放高能量的声波脉冲, 促进局部血液循环, 刺激组织修复, 从而实现血管生成、抗炎和镇痛的效果, 作为一种非侵入性治疗手段, 广泛应用于解除患者的疼痛[32] [33]。对于脑卒中后遗症期的患者, ESWT 常与神经阻滞剂治疗、针灸治疗、运动疗法和关节松动术联用, 通过降低屈肌张力, 改善运动功能和损伤, 从而减轻疼痛并提高功能独立性[34]-[38] (见表 2)。临床上导致 PSSP 的原因主要是肩关节周围肌肉软组织损伤、粘连, 肩关节正常结构改变, 以及脑卒中后患肢肌张力增高, 因此针对这两点开展 ESWT 治疗, 推荐的治疗参数分别为治疗强度 2.0~3.5 bar, 频率 4~11 Hz, 治疗脉冲数 2000~3000 次以及治疗强度 1.8~3.0 bar, 频率 8~13 Hz, 治疗脉冲数 2000~3000 次[39] [40]。

现如今 ESWT 在解决慢性疼痛方面的效果已在临床得到广泛认可, 但是在随机对照试验中通常无法对 ESWT 和对照组的受试者和医生实施盲法, 由此引入的实施偏倚和测量偏倚会影响研究结论的内部效度[41] [42]。因此, 未来需要更多设计严谨、采用客观评估指标的大样本研究, 以进一步确立其在 PSSP 康复方案中的地位与最佳治疗参数。与此同时, 将智能定位、智能聚焦、肌腱微结构特征识别与反馈技术等融入冲击波治疗设备中, 实现对病变部位更精准的识别和有效的治疗, 是未来 EWST 发展的潜在方向[39]。

**Table 2.** The basic characteristics of the study on extracorporeal shockwave therapy for PSSP treatment  
**表 2.** 体外冲击波疗法治疗 PSSP 研究的基本特征

序号	第一作者及年份	国家	研究对象	样本量 (实验组/对照组)	干预方法及时间 (实验组/对照组)	结局指标	主要发现
1	范登煌, 2024	中国	关节镜下肩袖修复术后继发肩关节僵硬患者(术后 2~5 个月, 活动受限)	实验组: 48 例; 常规康复组 49 例)	<b>实验组:</b> 常规康复治疗+ 体外冲击波治疗(发散式, 压力 2.2~2.6 Bar, 频率 8~11 Hz, 每 5~7 天 1 次, 总次数 ≥ 8 次, 每次总冲击 3000 次); <b>对照组:</b> 仅接受上述常规康复治疗(同实验组)	Costant-Murley 肩关节功能评分、视觉模拟评分(VAS)、被动关节活动范围(PROM: 前屈、外展、内旋、外旋)	常规康复联合体外冲击波可显著改善肩袖修复术后关节僵硬患者的肩关节功能, 减轻疼痛。
2	Shila Haghigat, 2023	伊朗	脑卒中后偏瘫肩痛(HSP)患者, 病程 ≥ 3 个月, VAS ≥ 4 分	实验组 20 例; 对照组 20 例	<b>实验组:</b> 聚焦 ESWT (3 次, 每周 1 次, 每点 1000 脉冲, 能量密度 0.2~0.3 mJ/mm <sup>2</sup> , 4 Hz) + 径向 ESWT (5 次, 每周 2 次, 每点 1500 脉冲, 能量密度 0.3~1.8 mJ/mm <sup>2</sup> , 15 Hz) + 常规物理治疗; <b>对照组:</b> 假 ESWT (零能量) + 常规物理治疗(同实验组)	视觉模拟评分(VAS)、被动关节活动度、Fugl-Meyer 上肢运动功能评分(FMA-UE)、肩痛与残疾指数(SPADI)	两组疼痛评分在 4 周和 8 周时均较基线显著下降, 但 ESWT 组下降更显著。聚焦 ESWT 联合径向 ESWT 可有效缓解脑卒中后偏瘫肩痛。
3	Jessica P. S. Lima, 2023	巴西	慢性脑卒中后右侧偏瘫患者(出血性, 病程 2 个月, 73 岁男性, 下肢运动功能障碍)	1 例(单病例研究, 无平行对照组)	<b>实验组:</b> 依次进行①经颅直流电刺激(tDCS): 阳极置于患侧 M1, 阴极置于对侧小脑, 2 mA, 20 分钟; ② 基于运动想象的脑机接口(MI-BCI) + 虚拟现实(VR) + 电动踏板(MP)训练: 20 分钟/次, 每周 5 次, 共 3 周。 <b>对照组:</b> 无(自身前后对照)	主要结局: Fugl-Meyer 下肢运动功能、MiniBESTest 平衡测试、10 米步行测试(步速、步频)、Semmes Weinstein 单丝感觉测试、EEG 事件相关去同步化(ERD)	功能指标(步频改善 39.99%, 平衡评分改善 50%)和感觉参数有改善趋势, 但未达统计学显著性(P > 0.05)。EEG 显示 Mu、低 beta、高 beta 节律的显著 ERD 调节, 且骑行速度与脑节律存在相关性。

### 3.3. 机器人技术(Robotics)

机器人技术在脑卒中患者运动功能康复中的临床应用已有近 20 年的时间[17] [43]。机器人既包括可穿戴的外骨骼, 也可以是用作肢体末端的运动设备, 通过使用有趣的游戏以及视觉、听觉和触觉刺激来提高患者的参与度, 实现个性化治疗, 并且能够收集患者的运动学数据来辅助治疗师指导, 其“任务导向性”特点能够显著提高患者的主动参与度, 是机器人技术优于传统治疗的关键[44]-[47]。目前, 机器人辅助康复的研究多集中于患者上下肢运动功能的恢复上, 并且已有许多患者从中受益[46] [48] (见表 3)而随着卒中后康复和 PSSP 的重视程度不断提升, 机器人技术在 PSSP 治疗中的潜力也逐渐受到关注[49]。Kim 等人使用了新开发的机器人对仰卧位患者进行关节活动和伸展运动, 治疗后发现机器人辅助肩部康复治疗能够有效减少偏瘫性肩部疼痛和后续更严重的肩关节残疾[50]。在机器人辅助物理治疗的情况下, 治疗不仅能够解决疼痛问题, 患者的痉挛、肌肉力量和主动活动范围也有明显改善[49]。

目前, 由于机器人设备的设置差异, 机器人辅助治疗对 PSSP 的改善效果和患者的功能结局存在较大变异。因此, 亟需开展更多研究, 以开发更为有效的治疗模式, 同时制定更详细的操作标准。通过优化机器人设备的参数设置, 并针对不同患者的个体化需求进行调整, 能够提升治疗的精准性和疗效[51]。这类研究将有助于推动机器人技术在 PSSP 康复中的广泛应用, 并确保其在临床实践中的一致性和可靠性。对于欠发达地区和医疗资源较差区域, 机器人技术的引用和维护成本可能是限制其广泛应用的重要现实因素。

**Table 3.** The basic characteristics of the research on robot technology for the treatment of PSSP  
**表 3.** 机器人技术治疗 PSSP 研究的基本特征

序号	第一作者及年份	国家	研究对象	样本量 (实验组/对照组)	干预方法及时间 (实验组/对照组)	结局指标	主要发现
1	Kang Xia, 2025	中国	脑卒中后上肢功能障碍患者(亚急性/慢性期); 概念验证纳入 1 例出血性脑卒中术后患者	实验组: 1 例; 对照组: 无(模型训练用 4 名健康志愿者数据, 但非对照干预)	实验组: 患者主导模式(基于 CNN-Transformer 的意图识别 + 预定义轨迹, 实时控制); 对照组: 机器人主导模式(预定义轨迹被动训练)或治疗师主导模式(主从镜像控制)。时间: 单次动作约 1.6 秒响应	15 个动作的分类准确率	所提出的 CNN-Transformer 模型平均分类准确率 99.7%, 实现了实时细微运动意图识别, 验证了脑卒中患者主动康复的可行性
2	Marco Germanotta, 2023	意大利	亚急性期脑卒中患者(发病 2 周~6 个月, FMA-UE 0~58 分)	实验组: 9 人; 对照组: 10 人	实验组: 上肢机器人辅助训练(Motore, Amadeo, Diego, Pablo 四款设备), 每日 45 分钟, 每周 5 次, 共 30 次; 对照组: 一对一传统康复治疗(任务导向、感觉运动训练、抗痉挛等), 同样剂量和时间	运动效率(任务持续时间)和平滑度(LDLJ、SPARC)	机器人组与传统组在运动效率和平滑度上均有显著改善(组内比较), 但两组间无显著差异(交互效应 $P > 0.05$ ), 提示机器人治疗与传统治疗等效
3	Sibo Yang, 2023	新加坡	健康成年人(无上肢运动障碍)	实验组: 5 人; 对照组: 无	实验组: 穿戴多模态传感器(IMU + EMG + MMG), 采集上肢到达与放置动作的 onset 运动数据(50~200 ms 时间窗), 输入 RNN/LSTM/GRU 等模型预测末端目标位置; 对照组: 无	预测准确率(误差半径 $\leq 2$ cm 时)	仅使用 IMU 传感器即可达到 80%~83% 的预测准确率, 与融合 EMG + MMG 的效果相当; RNN 类模型显著优于传统机器学习模型
4	Ruthber Rodriguez Serrezuela, 2020	古巴	缺血性脑卒中后偏瘫肩痛患者(肩关节 MAS $\leq 2$ 级, 含弛缓期和痉挛期)	实验组: 8 人; 对照组: 8 人	实验组: 自由度上肢外骨骼机器人, 抗重力运动(肩肘屈伸、内外旋、外展), 每日 1 小时, 每周 5 次, 共 3 个月; 对照组: 红外热疗 15 分钟 + 淋巴按摩 + 手法治疗(Kabat 方法, 被动/主动辅助/抗阻), 相同剂量和时间	疼痛消失所需治疗次数	机器人组疼痛消失平均需 22.5 次治疗, 常规组需 63.7 次( $P < 0.0012$ );
5	Min-Su Kim, 2019	韩国	亚急性期脑卒中后偏瘫肩痛患者(VAS $\geq 3$ 分, 无严重认知障碍)	实验组: 18 人; 对照组: 18 人	实验组: 常规物理治疗(每日 2 次) + 机器人辅助肩部康复(外展方向关节松动与拉伸, 仰卧位), 每日 30 分钟, 每周 5 次, 共 4 周; 对照组: 常规物理治疗(每日 2 次, 不含机器人治疗), 同样剂量和时间	VAS 疼痛评分	机器人组 VAS 从 6.6 降至 4.1, 常规组从 6.8 降至 6.5 (组间 $P = 0.002$ )

### 3.4. 虚拟和增强现实(Virtual Reality and Augmented Reality)

接受传统康复训练的患者表示, 训练过程中感到无聊和无法调动积极性是无法坚持运动计划的主要原因之一。通过虚拟和增强现实等技术在脑卒中康复中引入游戏(Exer-Gaming)可以提高患者的参与度和

训练计划的完成率从而带来更好的临床结果[17] [52] [53] (见表 4)。张秋等人利用虚拟情景模拟训练帮助脑卒中患者进行助动训练, 用以缓解 PSSP。结果表明, 治疗 3 周后 VR 干预组患者的肩痛程度、肩关节活动度及 Wolf 评定结果均好于常规治疗组[54]。李飞飞等人的研究也表明沉浸式 VR 结合早期康复治疗能有效减轻患者的疼痛, 提高肩关节活动度, 改善患者功能活动, 并促进冈上肌肌腱的修复[55]。除常见的院内治疗外, Funao 等人报告了一例脑出血患者在出院后使用沉浸式 VR 缓解其偏瘫性肩痛的案例, 为脑卒中患者出院后指导居家康复解决 PSSP 问题提供了新的思路[56]。

增强现实(AR)技术使得用户能够与计算机生成的虚拟元素和真实世界中的物体进行交互。与完全沉浸式的虚拟现实(VR)不同, AR 通过头戴式显示器、智能手机、平板电脑和 AR 眼镜等设备, 将虚拟信息叠加在真实场景上, 为用户提供增强的感知体验[52]。AR 的另一个优势是能够让使用者在适当的环境中安全地进行职业和技能训练, 从而消除在现实场景下可能面临的实际风险[17] [57]。目前 AR 技术已被用于肩袖损伤修复术后患者肩关节活动度和上肢功能的治疗[58] [59]。目前, AR 在 PSSP 领域的直接研究证据尚少, 但其独特优势使其在解决 PSSP 相关的运动控制、本体感觉和功能性活动方面具有巨大潜力。在未来, AR 技术有望在临床实践中为 PSSP 的解决提供新的治疗方案。

**Table 4.** The basic characteristics of the research on virtual and augmented reality therapy for PSSP

**表 4.** 虚拟和增强现实治疗 PSSP 研究的基本特征

序号	第一作者及年份	国家	研究对象	样本量 (实验组/对照组)	干预方法及时间 (实验组/对照组)	结局指标	主要发现
1	李飞飞, 2024	中国	肩袖损伤术后患者(中小型全层撕裂, 首次肩袖修补术)	实验组: 21 人; 对照组: 21 人	实验组: 常规早期康复训练(肩胛带稳定、被动/主动辅助活动等)+ 沉浸式 VR 训练(整理桌面、锯木头、精灵捕捉游戏), 每次 20 分钟 VR, 每日 1 次, 每周 5 次, 共 4 周; 对照组: 常规早期康复训练(剂量相同)。两组术后 0~2 周均先接受常规被动康复训练	UCLA 肩关节评分、冈上肌肌腱横截面积(CSA)	VR 结合早期康复训练在减轻疼痛(VAS)、改善关节活动度、提高 UCLA 评分及促进冈上肌 CSA 恢复(方面均显著优于单纯早期康复训练(P < 0.05), 且 CSA 与 UCLA 评分呈正相关
2	Hiroki Funao, 2021	日本	65 岁女性, 高血压性脑出血后左侧偏瘫伴偏瘫肩痛, Brunnstrom 上肢 I 级, MAS 肘关节 2 级	自身前后对照	实验组: 常规居家康复(肌肉拉伸、被动关节活动度训练、ADL 训练等)+ 沉浸式 VR 放松程序, 每次 30 分钟, 共 5 次(3 周内); 对照组: 无 VR 的常规康复阶段	疼痛 NRS 评分(0~10)	VR 辅助康复后, 训练中疼痛从 10 分降至 4~8 分, 训练后从 4 分降至 0~1 分; 疼痛改善率 60% (≥33%为有效), 且观察到患侧肌张力下降、关节活动度增加
3	Ga Yang Shim, 2023	韩国	肩袖修复术后患者(≥50 岁)	实验组: 55 人; 对照组: 53 人	实验组: AR 数字化居家康复(UNICARE Home+ 系统, 含实时动作捕捉与反馈), 共 12 周(前 6 周手册练习 + 后 6 周 AR 练习); 对照组: 手册指导居家常规康复, 共 12 周。两组运动类型和时长相同	术后 12 周 SST 评分变化	AR 康复组 SST 评分改善显著优于常规康复组, 且在 DASH、SPADI、EQ5D5L 等患者自评结局上也有显著组 × 时间交互效应, 患者满意度高, 无不良事件

### 3.5. 脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)

脑机接口(BCI)控制的功能性电刺激(FES)是近年来新兴的康复技术, 该技术主要通过 BCI 监测患者大脑发出的运动意图并将其转化为控制信号, 然后驱动 FES 设备对患者进行相应的电刺激, 从而帮助患者实现预期的运动。相对于传统的康复技术或单纯的 FES 治疗, BCI 通过“中枢-外周闭环干预”, 可以更为有效地促进中枢神经损伤患者的肢体功能恢复[60] [61]。目前已有研究表明 BCI 可在传统康复训练的基础上进一步改善缺血性脑卒中患者的上肢运动功能[62]-[65] (见表 5)。Jang 等人应用 BCI-FES 治疗脑卒中患者肩关节半脱位的过程中发现, 除了改善疼痛外, BCI-FES 干预组的患者在肩关节屈曲和外展角度的改善也明显优于对照组[66]。然而, 目前临床上开展的研究主要是针对半脱位和上肢功能, 直接以 PSSP 疼痛为主要结局的研究少, 并且针对 BCI 治疗 PSSP 尚未形成统一的标准或治疗指南, 是亟待探索的前沿领域。未来应该开展更多样本量更大的针对 BCI 的临床研究以提高结论的可靠性。同时通过系统性地评估 BCI 技术在 PSSP 治疗中的有效性和可行性, 为其在康复治疗中的应用提供科学依据。与机器人技术类似, BCI 技术信号解码精度高、训练周期长、设备成本高昂等因素, 同样限制其在临床的广泛开展。

**Table 5.** The basic characteristics of the research on brain-computer interface for PSSP

**表 5.** 脑机接口治疗 PSSP 研究的基本特征

序号	第一作者及年份	国家	研究对象	样本量 (实验组/对照组)	干预方法及时间 (实验组/对照组)	结局指标	主要发现
1	Jessica P. S. Lima, 2023	巴西	慢性脑卒中后右侧偏瘫患者(出血性, 病程 2 个月, 73 岁男性, 下肢运动功能障碍)	1 例(单病例研究, 无平行对照组)	实验组: ① 经颅直流电刺激(tDCS): 阳极置于患侧 M1, 阴极置于对侧小脑, 2 mA, 20 分钟; ② 基于运动想象的脑机接口(MI-BCI) + 虚拟现实(VR) + 电动踏板(MP)训练: 20 分钟/次, 每周 5 次, 共 3 周; 对照组: 无(自身前后对照)	Fugl-Meyer 下肢运动功能、MiniBESTest 平衡测试、10 米步行测试(步速、步频)、Semmes Weinstein 单侧感觉测试、EEG 事件相关去同步化(ERD)	功能指标(步频改善 39.99%, 平衡评分改善 50%)和感觉参数有改善趋势, 但未达统计学显著性。
2	Iris Brunner, 2024	丹麦	亚急性脑卒中后严重上肢麻痹患者 (ARAT < 13 分, 发病 ≤ 60 天)	实验组: BCI 组 15 例; 对照组 20 例	实验组: BCI 训练(运动想象+ 视觉反馈 + 功能性电刺激), 每次约 60 分钟, 3~4 次/周, 共 12 次(3~4 周); 对照组: 常规物理和作业治疗(镜像疗法、被动运动、电刺激、感觉刺激等), 同等时间	(ARAT) 3 个月时	两组 ARAT 均有改善, 但组间差异无统计学意义。BCI 训练未优于常规治疗, 皮质脊髓束完整性是恢复的关键。
3	刘璇, 2025	中国	脑卒中后上肢功能障碍患者(病程 < 6 个月, Brunnstrom ≤ IV 期, 上肢 MAS < III 级)	联合组 15 例; BCI 组 5 例; 机器人组 15 例	联合组: 基于运动表象的 BCI 训练(20 分钟/次) + 上肢康复机器人训练(20 分钟/次) + 常规康复(120 分钟/次); BCI 组: BCI 训练(20 分钟/次) + 常规康复(120 分钟/次); 机器人组: 上肢康复机器人训练(20 分钟/次) + 常规康复(120 分钟/次); 以上均为每日 1 次, 每周 5 天, 共 4 周。	Fugl-Meyer 上肢评分(FMA-UE)、上肢动作研究量表(ARAT)、改良 Barthel 指数(MBI)、脑电图 $\delta$ - $\alpha$ 比(DAR)	三组治疗后 FMA-UE、ARAT、MBI 均显著改善, DAR 显著降低。BCI 联合上肢康复机器人能更好改善脑卒中患者上肢功能和日常生活活动能力。

续表

4	Anxin Wang, 2024	中国	缺血性卒中后上肢功能障碍患者 (NIHSS-5a/5b 评分 1~3 分, 发病 ≤1 个月)	实验组 150 例; 对照组 146 例	实验组: 基于运动表象的脑机接口(BCI)康复训练(结合虚拟现实和功能性电刺激), 每次 30 分钟, 每周 5 天, 共 1 个月 + 常规康复训练(1 个月后两组均继续常规康复 1 个月); 对照组: 仅常规康复训练(每次 30 分钟, 每周 ≥5 天, 共 1 个月) + 后续常规康复 1 个月	1 个月时 Fugl-Meyer 上肢评分变化值	BCI 组 1 个月 FMA-UE 改善 13.17 分, 对照组 9.83 分, 组间差异 3.35 分。BCI 康复训练可在常规康复基础上进一步改善缺血性卒中患者上肢运动功能。
5	Brunner, 2024	丹麦	中风后严重上肢麻痹患者 (ARAT < 13, 亚急性期)	实验组 19 例; 对照组 21 例	实验组: 脑机接口训练结合运动想象和功能性电刺激, 每次 60 分钟, 含 160 次想象动作, 每周 3~4 次, 共 12 次(3~4 周); 对照组: 常规上肢康复(包括镜像疗法、被动运动、电刺激和感觉刺激), 治疗时长与实验组平衡。	3 个月时的 ARAT 评分	两组在 ARAT 改善上无显著差异; 皮质脊髓束完整性 (MEP 状态) 是上肢功能改善的显著预测因子, 比干预类型更重要。
6	Yun Young Jang, 2016	韩国	脑卒中后偏瘫侧肩部半脱位患者(发病 ≤6 个月, MMSE ≥ 24)	实验组 10 例; 对照组 10 例	实验组: BCI 控制的功能性电刺激(BCI-FES) + 常规作业治疗。每次 20 分钟, 每周 5 次, 共 6 周(30 次)。 对照组: 单纯 FES (参数同上) + 常规作业治疗(同实验组)	肩关节垂直半脱位距离(VD)、水平半脱位距离(HD)、视觉模拟疼痛评分(VAS)、手动功能测试(MFT)	BCI-FES 训练可更有效改善脑卒中患者肩部半脱位和上肢运动功能。

#### 4. 讨论

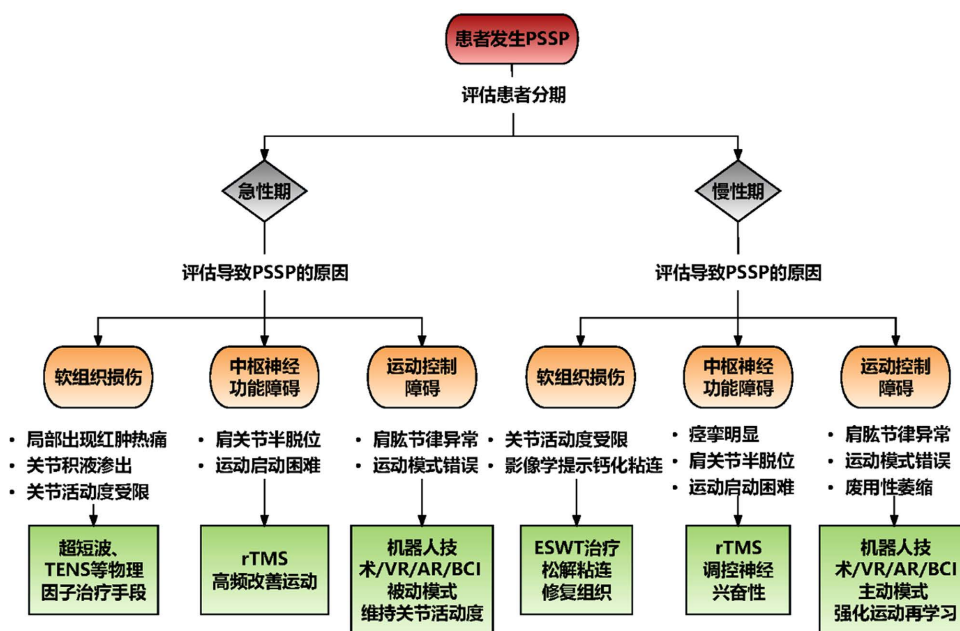
随着上述技术在 PSSP 治疗领域的应用日益广泛, 其临床效果备受关注。然而, 这些非侵入性技术虽常被并列提及, 其作用机制与治疗靶点却存在根本差异。清晰地理解这些差异, 是实现精准化临床选择的前提。其中, rTMS 通过磁场直接干预中枢神经系统, 调节运动皮质的兴奋性, 旨在从源头改善神经功能、缓解痉挛或中枢性疼痛; ESWT 通过机械应力作用于肩关节局部软组织, 旨在松懈粘连、诱导新生血管、促进组织修复; 而机器人技术、VR、AR 和 BCI, 三者虽然形式不同, 但共同点在于通过提供丰富的感觉反馈和高强度的重复训练, 促进运动再学习和卒中后运动功能重建。具体而言, 机器人技术侧重于提供精准的力学辅助和个性化训练, VR 和 AR 通过视觉、听觉反馈增强患者的参与度和运动意图; BCI 则注重将运动意图直接转化为外部运动指令, 实现闭环反馈, 激活受损的运动通路。这三类技术的治疗作用是正交且互补的, 而它们的差异决定了其在 PSSP 的不同阶段、不同病理状态下具有各自的适应症与优势。为了更直观地呈现以上三类技术在临床应用中的异同, 为后续的临床路径选择提供依据, 我们将其主要特征归纳对比如表 6。

在临床实践中, 面对病情复杂的 PSSP 患者, 如何基于其病理状态和疾病阶段做出合理的技术选择, 仍是尚未形成共识的关键问题。基于此, 本综述将结合现有证据, 尝试提出一套基于临床分期的个体化治疗路径, 以期为临床决策提供参考(图 1)。需要强调的是, PSSP 的康复并非单一技术能够完全覆盖, 而应根据患者不同阶段的病理特征, 将几类治疗技术有机衔接。具体而言, 在准备阶段, 先应用 rTMS 提

高运动皮层兴奋性, 或采用 ESWT 松解局部软组织粘连, 随后进入训练阶段, 利用机器人、VR/AR 或 BCI 进行高强度、闭环的运动再学习, 此时患者对感觉反馈和运动引导的响应更为敏感, 训练效果得以最大化。这种序贯整合模式能够充分利用现有技术的正交互补特性, 更好实现对于 PSSP 患者的个性化治疗。基于上述机制, 本文提出以下两个具有可操作性的序贯整合模式下的治疗方案, 供未来研究验证(表 7)。

**Table 6.** Comparison of non-invasive techniques for treating PSSP  
**表 6.** 非侵入性技术治疗 PSSP 的对比

	经颅磁刺激 (rTMS)	体外冲击波 (ESWT)	机器人技术	虚拟/增强现实 (VR/AR)	脑机接口 (BCI)
临床应用阶段	脑卒中急/慢性期	脑卒中慢性期	脑卒中急/慢性期	脑卒中慢性期, 有一定依从性	脑卒中慢性期, 存在运动意图但无法产生有效运动
解决临床问题	中枢神经皮层兴奋性失衡、痉挛、中枢性疼痛	肌腱/筋膜粘连、钙化灶、局部缺血	纠正异常运动模式、实现运动功能重建	运动知觉、视觉-运动整合、空间感知	运动意图识别、神经可塑性、闭环反馈
局限性	设备昂贵, 操作复杂, 体内金属异物禁用, 同时有诱发癫痫风险	对于失神经支配、神经卡压等机械性损伤的肌肉疼痛效果不佳, 急性期禁用	设备昂贵, 操作复杂, 缺乏本体感觉的真实反馈	部分患者出现头晕, 对认知功能有一定要求, 缺乏真实的触觉和力学反馈	设备昂贵, 操作复杂, 校准时间长, 治疗时信息传输率低, 患者易疲劳
证据等级	较高	较高	中等(多集中在运动学指标, 对肩痛特异性证据需积累)	中等(提升依从性证据明确, 镇痛证据需积累)	较低(多为小样本探索性研究)



**Figure 1.** Individualized clinical decision-making of PSSP

**图 1.** PSSP 的个体化临床决策

**Table 7.** The PSSP treatment plan under the sequential integration model**表 7.** 序贯整合模式下的 PSSP 治疗方案

序贯治疗方案	理论基础	具体流程	预期效果
rTMS 联合机器人辅助训练	rTMS 降低运动皮层兴奋阈值, 为机器人训练创造神经易化窗口	① rTMS (10 Hz, 患侧 M1 区) ② 15~30 分钟内行机器人辅助肩关节训练; 每周 5 次, 共 4 周	改善主动关节活动度, 降低被动活动疼痛
ESWT 联合 VR 任务导向训练	ESWT 松解软组织粘连, 为 VR 训练提供力学窗口	① ESWT (聚焦式, 0.10~0.18 mJ/mm <sup>2</sup> , 每周 1 次, 共 3~4 次); ② 15~30 分钟 VR 任务导向训练每周 5 次, 共 4 周	持续改善慢性期活动度, 降低复发率

在未来, 针对 PSSP 的研究应优先采用大样本、多中心的随机对照试验设计。在实验设计阶段, 区别于常规试验方案应加入序贯整合组, 干预时序需重点关注 rTMS 或 ESWT 后的“窗口期”, 可设置治疗后 15、30、60 分钟三个时间点开始训练, 以确定最佳的神经易化或力学松解后介入时机。结局指标应兼顾主要终点(疼痛评分、关节活动度、Fugl-Meyer 上肢评分)与次要终点(日常生活能力、依从性), 并纳入机制探索性指标如运动诱发电位、超声弹性成像及任务态近红外光谱。并根据患者的不同病理特征(如痉挛、粘连或运动启动困难等)进行亚组分析, 以明确各整合方案的优势亚群。随访期建议为治疗后 1、3、6 个月, 同时开展成本-效果分析, 为临床推广提供经济学依据。通过严谨的试验设计, 可为序贯整合模式的临床价值提供高质量循证支持。

## 5. 结论

本综述系统梳理了 rTMS、ESWT、机器人技术、VR/AR 及 BCI 五种非侵入性技术在 PSSP 治疗中的最新研究进展与临床疗效证据。通过深入对比分析, 明确了其各自的适用边界。并在此基础上, 结合患者临床分期与核心病理特征, 提出了一套完整的个体化临床决策指导路径, 涵盖技术选择策略与序贯整合治疗方案。尽管当前研究仍存在样本量不足、参数标准缺乏等局限, 未来仍需进一步多中心、长期的研究, 以探索这些技术在临床实际环境中的应用效果。本综述率先为临床实践中精准应用这些非侵入性技术提供了理论依据与实践参考, 也为未来多模态康复方案的循证构建奠定了方向。

## 参考文献

- [1] Hilkens, N.A., Casolla, B., Leung, T.W. and de Leeuw, F. (2024) Stroke. *The Lancet*, **403**, 2820-2836. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(24\)00642-1](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(24)00642-1)
- [2] Neil, H.P. (2023) Stroke Rehabilitation. *Critical Care Nursing Clinics of North America*, **35**, 95-99. <https://doi.org/10.1016/j.cnc.2022.11.002>
- [3] Adey-Wakeling, Z., Arima, H., Crotty, M., Leyden, J., Kleinig, T., Anderson, C.S., et al. (2015) Incidence and Associations of Hemiplegic Shoulder Pain Poststroke: Prospective Population-Based Study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **96**, 241-247.e1. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.09.007>
- [4] de Sire, A., Moggio, L., Demeco, A., Fortunato, F., Spanò, R., Aiello, V., et al. (2022) Efficacy of Rehabilitative Techniques in Reducing Hemiplegic Shoulder Pain in Stroke: Systematic Review and Meta-Analysis. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, **65**, Article 101602. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2021.101602>
- [5] 周爱珍, 邱峰, 过琳, 等. 脑卒中后肩痛的中西医治疗研究概述[J]. 中国民间疗法, 2024, 32(11): 117-121.
- [6] 黄毓洁, 林有维, 许若瑶, 等. 偏瘫后肩痛的发病机制与临床康复评估的应用进展[J]. 按摩与康复医学, 2022, 13(22): 59-65.
- [7] Klit, H., Finnerup, N.B. and Jensen, T.S. (2009) Central Post-Stroke Pain: Clinical Characteristics, Pathophysiology, and Management. *The Lancet Neurology*, **8**, 857-868. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(09\)70176-0](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(09)70176-0)
- [8] Kumar, P. (2019) Hemiplegic Shoulder Pain in People with Stroke: Present and the Future. *Pain Management*, **9**, 107-

110. <https://doi.org/10.2217/pmt-2018-0075>
- [9] Khatooni, M., Dehghankar, L., Samiei Siboni, F., Bahrami, M., Shafaei, M., Panahi, R., *et al.* (2025) Association of Post-Stroke Hemiplegic Shoulder Pain with Sleep Quality, Mood, and Quality of Life. *Health and Quality of Life Outcomes*, **23**, Article No. 32. <https://doi.org/10.1186/s12955-025-02367-x>
- [10] Kumar, P., Christodoulou, A. and Loizou, M. (2024) Assessment Approaches for Hemiplegic Shoulder Pain in People Living with Stroke—A Scoping Review. *Disability and Rehabilitation*, **47**, 1677-1687. <https://doi.org/10.1080/09638288.2024.2385736>
- [11] Ward, A.B. (2007) Hemiplegic Shoulder Pain. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, **78**, 789-789. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2006.108803>
- [12] Huang, Y.C., Leong, C.P., Wang, L., *et al.* (2016) Effect of Kinesiology Taping on Hemiplegic Shoulder Pain and Functional Outcomes in Subacute Stroke Patients: A Randomized Controlled Study. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, **52**, 774-781.
- [13] 王鹏, 万妮娜, 张衍辉. 针刺运动疗法治疗中风后偏瘫肩痛的临床观察[J]. 中国医学创新, 2022, 19(34): 83-88.
- [14] Shi, J., Chen, F., Liu, Y., Bian, M., Sun, X., Rong, R., *et al.* (2025) Acupuncture versus Rehabilitation for Post-Stroke Shoulder-Hand Syndrome: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Frontiers in Neurology*, **16**, Article ID: 1488767. <https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1488767>
- [15] 岳雅蓉, 项文平, 薛慧, 等. 偏瘫性肩痛的治疗研究进展[J]. 神经病学与神经康复学杂志, 2022, 18(3): 131-143.
- [16] Torres-Parada, M., Vivas, J., Balboa-Barreiro, V. and Marey-López, J. (2020) Post-Stroke Shoulder Pain Subtypes Classifying Criteria: Towards a More Specific Assessment and Improved Physical Therapeutic Care. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, **24**, 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2019.02.010>
- [17] Malik, A.N., Tariq, H., Afridi, A., *et al.* (2022) Technological Advancements in Stroke Rehabilitation. *Journal of the Pakistan Medical Association*, **72**, 1672-1674.
- [18] Choi, G. and Chang, M.C. (2018) Effects of High-Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Reducing Hemiplegic Shoulder Pain in Patients with Chronic Stroke: A Randomized Controlled Trial. *International Journal of Neuroscience*, **128**, 110-116. <https://doi.org/10.1080/00207454.2017.1367682>
- [19] 陶林花, 任志彬, 傅晓倩, 等. 高频重复经颅磁刺激对脑卒中恢复期偏瘫性肩痛的影响[J]. 中国现代医生, 2023, 61(35): 37-41.
- [20] Liu, K., Yin, M. and Cai, Z. (2022) Research and Application Advances in Rehabilitation Assessment of Stroke. *Journal of Zhejiang University-Science B*, **23**, 625-641. <https://doi.org/10.1631/jzus.b2100999>
- [21] Pan, L., Zhu, H., Zhang, X. and Wang, X. (2023) The Mechanism and Effect of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Post-Stroke Pain. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, **15**, Article ID: 1091402. <https://doi.org/10.3389/fnmol.2022.1091402>
- [22] 熊凤仙, 和智娟, 岳秀丽, 等. 重复经颅磁刺激联合治疗在脑卒中患者偏瘫肩痛中的应用进展[J]. 中国医学创新, 2024, 21(23): 169-172.
- [23] 郭玲, 陈玉霞. 经颅磁刺激联合体外冲击波疗法对脑卒中后肩痛疗效的临床研究[J]. 甘肃医药, 2024, 43(3): 218-220.
- [24] Aydın, Y., Aşkın, A., Aghazada, N. and Şengül, İ. (2024) High Frequency Neuronavigated Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in Post-Stroke Shoulder Pain: A Double-Blinded, Randomized Controlled Study. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **33**, Article 107562. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2024.107562>
- [25] Ma, Z., Pan, H., Bi, R., Li, Z., Lu, W. and Wan, P. (2025) Systematic Review of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Post-Stroke Hemiplegic Shoulder Pain. *Neurological Sciences*, **46**, 2007-2017. <https://doi.org/10.1007/s10072-024-07961-3>
- [26] Di Pino, G., Pellegrino, G., Assenza, G., Capone, F., Ferreri, F., Formica, D., *et al.* (2014) Modulation of Brain Plasticity in Stroke: A Novel Model for Neurorehabilitation. *Nature Reviews Neurology*, **10**, 597-608. <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2014.162>
- [27] Yan, W., Lin, Y., Chen, Y., Wang, Y., Wang, J. and Zhang, M. (2025) Enhancing Neuroplasticity for Post-Stroke Motor Recovery: Mechanisms, Models, and Neurotechnology. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **33**, 1156-1168. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2025.3551753>
- [28] Liu, J., Qin, W., Zhang, J., Zhang, X. and Yu, C. (2015) Enhanced Interhemispheric Functional Connectivity Compensates for Anatomical Connection Damages in Subcortical Stroke. *Stroke*, **46**, 1045-1051. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.114.007044>
- [29] Safdar, A., Smith, M., Byblow, W.D. and Stinear, C.M. (2023) Applications of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation to Improve Upper Limb Motor Performance after Stroke: A Systematic Review. *Neurorehabilitation and Neural*

- Repair*, **37**, 837-849. <https://doi.org/10.1177/15459683231209722>
- [30] Noh, J.S., Lim, J.H., Choi, T.W., Jang, S.G. and Pyun, S. (2019) Effects and Safety of Combined rTMS and Action Observation for Recovery of Function in the Upper Extremities in Stroke Patients: A Randomized Controlled Trial. *Restorative Neurology and Neuroscience*, **37**, 219-230. <https://doi.org/10.3233/rnn-180883>
- [31] Qu, J., Zhou, H., Wang, Q., *et al.* (2025) Efficacy of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Post-Stroke Shoulder Pain: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Topics in Stroke Rehabilitation*, **33**, 391-405.
- [32] 范登煌, 鲍王筱, 毛琳, 等. 体外冲击波疗法对肩袖修复术后关节僵硬的疗效研究[J]. 中国康复, 2024, 39(8): 475-478.
- [33] Haghghat, S., Khosravi, M., Saadatnia, M. and Hashemijaazi, M. (2023) Effect of Extracorporeal Shockwave Therapy on Pain Management of Patients with Post-Stroke Hemiplegic Shoulder Pain: A Prospective Randomized Controlled Trial. *Advanced Biomedical Research*, **12**, Article No. 216. [https://doi.org/10.4103/abr.abr\\_279\\_21](https://doi.org/10.4103/abr.abr_279_21)
- [34] Martínez, I.M., Sempere-Rubio, N., Navarro, O. and Faubel, R. (2021) Effectiveness of Shock Wave Therapy as a Treatment for Spasticity: A Systematic Review. *Brain Sciences*, **11**, Article 15. <https://doi.org/10.3390/brainsci11010015>
- [35] Otero-Luis, I., Cavero-Redondo, I., Álvarez-Bueno, C., Martínez-Rodrigo, A., Pascual-Morena, C., Moreno-Herráiz, N., *et al.* (2024) Effectiveness of Extracorporeal Shock Wave Therapy in Treatment of Spasticity of Different Aetiologies: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Medicine*, **13**, Article 1323. <https://doi.org/10.3390/jcm13051323>
- [36] 赵金凤, 王凌毅. 体外冲击波穴位促通治疗偏瘫肩痛的研究进展[J]. 现代养生, 2024, 24(16): 1201-1203.
- [37] Yang, F., Li, X., Wang, J., Gao, Q., Pan, M., Duan, Z., *et al.* (2024) Efficacy of Different Analgesic Strategies Combined with Conventional Physiotherapy Program for Treating Chronic Shoulder Pain: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **19**, Article No. 544. <https://doi.org/10.1186/s13018-024-05037-8>
- [38] Kim, Y.W., Shin, J.C., Yoon, J., Kim, Y. and Lee, S.C. (2013) Usefulness of Radial Extracorporeal Shock Wave Therapy for the Spasticity of the Subscapularis in Patients with Stroke: A Pilot Study. *Chinese Medical Journal*, **126**, 4638-4643. <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0366-6999.20131129>
- [39] 中国研究型医院学会冲击波医学专业委员会. 聚焦式体外冲击波治疗肌腱末端病专家共识(2025) [J]. 中华创伤骨科杂志, 2025, 27(5): 369-378.
- [40] 程志祥, 樊肖冲, 冯智英, 等. 体外冲击波疗法临床应用中国疼痛学专家共识(2023 版) [J]. 中华疼痛学杂志, 2023, 19(2): 220-235.
- [41] Qiao, H., Xin, L. and Wu, S. (2020) Analgesic Effect of Extracorporeal Shock-Wave Therapy for Frozen Shoulder: A Randomized Controlled Trial Protocol. *Medicine*, **99**, e21399. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000021399>
- [42] Zhang, T. and Zhang, C. (2023) Extracorporeal Shock Wave Therapy for Shoulder Pain after Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Clinical Rehabilitation*, **37**, 774-790. <https://doi.org/10.1177/02692155231152134>
- [43] Xia, K., Chang, X., Liu, C., Yan, Y., Sun, H., Wang, Y., *et al.* (2025) Exploratory Development of Human-Machine Interaction Strategies for Post-Stroke Upper-Limb Rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **22**, Article No. 144. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01680-2>
- [44] O'Dell, M.W. (2023) Stroke Rehabilitation and Motor Recovery. *Continuum*, **29**, 605-627. <https://doi.org/10.1212/con.0000000000001218>
- [45] Lo, K., Stephenson, M. and Lockwood, C. (2017) Effectiveness of Robotic Assisted Rehabilitation for Mobility and Functional Ability in Adult Stroke Patients: A Systematic Review. *JBIG Database of Systematic Reviews and Implementation Reports*, **15**, 3049-3091. <https://doi.org/10.11124/jbisrir-2017-003456>
- [46] Gnasso, R., Palermi, S., Picone, A., Tarantino, D., Fusco, G., Messina, M.M., *et al.* (2023) Robotic-Assisted Rehabilitation for Post-Stroke Shoulder Pain: A Systematic Review. *Sensors*, **23**, Article 8239. <https://doi.org/10.3390/s23198239>
- [47] Germanotta, M., Cortellini, L., Insalaco, S. and Aprile, I. (2023) Effects of Upper Limb Robot-Assisted Rehabilitation Compared with Conventional Therapy in Patients with Stroke: Preliminary Results on a Daily Task Assessed Using Motion Analysis. *Sensors*, **23**, Article 3089. <https://doi.org/10.3390/s23063089>
- [48] Yang, S., Garg, N.P., Gao, R., Yuan, M., Noronha, B., Ang, W.T., *et al.* (2023) Learning-Based Motion-Intention Prediction for End-Point Control of Upper-Limb-Assistive Robots. *Sensors*, **23**, Article 2998. <https://doi.org/10.3390/s23062998>
- [49] Serrezuela, R.R., Quezada, M.T., Zayas, M.H., Pedrón, A.M., Hermosilla, D.M. and Zamora, R.S. (2020) Robotic Therapy for the Hemiplegic Shoulder Pain: A Pilot Study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **17**, Article No. 54. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00674-6>
- [50] Kim, M., Kim, S.H., Noh, S., Bang, H.J. and Lee, K. (2019) Robotic-Assisted Shoulder Rehabilitation Therapy

- Effectively Improved Poststroke Hemiplegic Shoulder Pain: A Randomized Controlled Trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **100**, 1015-1022. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2019.02.003>
- [51] 张立新, 白定群, 白玉龙, 等. 下肢康复机器人临床应用专家共识[J]. 康复学报, 2023, 33(5): 383-396.
- [52] Langan, J., Subryan, H., Nwogu, I. and Cavuoto, L. (2018) Reported Use of Technology in Stroke Rehabilitation by Physical and Occupational Therapists. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, **13**, 641-647. <https://doi.org/10.1080/17483107.2017.1362043>
- [53] Khokale, R., S. Mathew, G., Ahmed, S., Maheen, S., Fawad, M., Bandaru, P., *et al.* (2023) Virtual and Augmented Reality in Post-Stroke Rehabilitation: A Narrative Review. *Cureus*, **15**, e37559. <https://doi.org/10.7759/cureus.37559>
- [54] 张秋, 王玉龙, 方锐, 等. 虚拟情景模拟训练对脑卒中患者肩痛康复创新方法研究[J]. 中国医学创新, 2019, 16(3): 52-55.
- [55] 李飞飞, 蔡晨晨, 吴巧云, 等. 沉浸式虚拟现实技术结合早期康复训练对肩袖损伤术后患者的临床疗效评价[J]. 温州医科大学学报, 2024, 54(5): 371-377.
- [56] Funao, H., Tsujikawa, M., Momosaki, R. and Shimaoka, M. (2021) Virtual Reality Applied to Home-Visit Rehabilitation for Hemiplegic Shoulder Pain in a Stroke Patient: A Case Report. *Journal of Rural Medicine*, **16**, 174-178. <https://doi.org/10.2185/jrm.2021-003>
- [57] Gorman, C. and Gustafsson, L. (2022) The Use of Augmented Reality for Rehabilitation after Stroke: A Narrative Review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, **17**, 409-417. <https://doi.org/10.1080/17483107.2020.1791264>
- [58] Shim, G.Y., Kim, E.H., Baek, Y.J., Chang, W.K., Kim, B.R., Oh, J.H., *et al.* (2023) A Randomized Controlled Trial of Postoperative Rehabilitation Using Digital Healthcare System after Rotator Cuff Repair. *npj Digital Medicine*, **6**, Article No. 95. <https://doi.org/10.1038/s41746-023-00842-7>
- [59] Chang, W.K., Lee, J.I., Hwang, J.H. and Lim, J. (2022) Post-operative Rehabilitation Using a Digital Healthcare System in Patients Who Had Undergone Rotator Cuff Repair: Protocol for a Single-Center Randomized Controlled Trial. *Trials*, **23**, Article No. 667. <https://doi.org/10.1186/s13063-022-06648-4>
- [60] 秦汉, 李学平, 田千慧, 等. 脑机接口控制的功能性电刺激在中枢神经损伤康复中的应用进展[J]. 神经损伤与功能重建, 2024, 19(10): 584-588.
- [61] Lima, J.P.S., Silva, L.A., Delisle-Rodriguez, D., Cardoso, V.F., Nakamura-Palacios, E.M. and Bastos-Filho, T.F. (2023) Unraveling Transformative Effects after tDCS and BCI Intervention in Chronic Post-Stroke Patient Rehabilitation—An Alternative Treatment Design Study. *Sensors*, **23**, Article 9302. <https://doi.org/10.3390/s23239302>
- [62] Wang, A., Tian, X., Jiang, D., Yang, C., Xu, Q., Zhang, Y., *et al.* (2024) Rehabilitation with Brain-Computer Interface and Upper Limb Motor Function in Ischemic Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Med*, **5**, 559-569.e4. <https://doi.org/10.1016/j.medj.2024.02.014>
- [63] Cervera, M.A., Soekadar, S.R., Ushiba, J., Millán, J.D.R., Liu, M., Birbaumer, N., *et al.* (2018) Brain-Computer Interfaces for Post-Stroke Motor Rehabilitation: A Meta-Analysis. *Annals of Clinical and Translational Neurology*, **5**, 651-663. <https://doi.org/10.1002/acn3.544>
- [64] Brunner, I., Lundquist, C.B., Pedersen, A.R., Spaich, E.G., Dosen, S. and Savic, A. (2024) Brain Computer Interface Training with Motor Imagery and Functional Electrical Stimulation for Patients with Severe Upper Limb Paresis after Stroke: A Randomized Controlled Pilot Trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **21**, Article No. 10. <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01304-1>
- [65] 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.
- [66] Jang, Y.Y., Kim, T.H. and Lee, B.H. (2016) Effects of Brain-Computer Interface-Controlled Functional Electrical Stimulation Training on Shoulder Subluxation for Patients with Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Occupational Therapy International*, **23**, 175-185. <https://doi.org/10.1002/oti.1422>