

基于fNIRS探究指部感觉刺激对脑卒中患者大脑皮层激活的影响

马 缘^{1,2}, 洪永锋^{2*}

¹安徽城市管理职业学院智慧康养学院, 安徽 合肥

²安徽医科大学第二附属医院康复医学科, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年7月21日; 录用日期: 2026年8月14日; 发布日期: 2026年8月24日

摘 要

目的: 本研究旨在评估常规康复联合机械指部感觉刺激技术(Mechanical Digitorum Sensory Stimulator, MDSS)对脑卒中偏瘫患者上肢运动功能及大脑皮层激活的影响, 运用功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)解析相关脑区血氧代谢特征。方法: 纳入40例符合标准的脑卒中偏瘫患者, 随机分为试验组(常规康复 + MDSS)与对照组(仅常规康复), 均干预2周。采用Fugl-Meyer上肢运动功能评分(Fugl-Meyer Assessment-Upper Extremities, FMA-UE)、改良Barthel指数(MBI)评估疗效, 通过fNIRS监测cPFC (健侧前额运动皮层)、iM1 (病灶侧初级运动皮层)等关键脑区血氧动力学变化。结果: 干预后, 两组FMA-UE、MBI评分均较干预前显著提升($P < 0.05$), 且试验组评分显著高于对照组($P < 0.05$)。fNIRS检测显示, 干预前, 两组iM1、cPFC及iPFC (病灶侧前额叶皮层)的血氧浓度无统计学差异(均 $P > 0.05$); 治疗后, 试验组上述脑区血氧浓度均显著升高($P < 0.05$), 对照组iM1、cPFC血氧浓度显著升高($P < 0.05$), iPFC血氧浓度较治疗前有增加但无统计学意义($P > 0.05$); 组间比较显示, 试验组3个脑区治疗后血氧浓度均显著优于对照组($P < 0.05$)。结论: MDSS联合常规康复可能改善脑卒中患者FMA-UE评分所衡量的部分上肢功能及MBI评分, 并影响相关脑区血氧动力学活动。由于本研究存在干预时间短、刺激部位单一等局限性, MDSS的长期疗效及作用机制仍需进一步研究。

关键词

脑卒中, 机械指部感觉刺激, 功能性近红外光谱技术, 大脑皮层激活, 日常生活活动能力

Exploring the Effect of Digital Sensory Stimulation on Cerebral Cortical Activation in Stroke Patients Based on fNIRS

Yuan Ma^{1,2}, Yongfeng Hong^{2*}

*通讯作者。

文章引用: 马缘, 洪永锋. 基于 fNIRS 探究指部感觉刺激对脑卒中患者大脑皮层激活的影响[J]. 临床医学进展, 2026, 16(8): 2163-2172. DOI: 10.12677/acm.2026.1683006

¹Department of Rehabilitation and Basic Medical Sciences, Anhui Vocational College of City Management, Hefei Anhui

²Department of Rehabilitation Medicine, The Second Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

Received: July 21, 2026; accepted: August 14, 2026; published: August 24, 2026

Abstract

Objective: This study aimed to evaluate the effect of conventional rehabilitation combined with Mechanical Digitum Sensory Stimulator (MDSS) on upper limb motor function and cerebral cortex activation in stroke patients with hemiplegia, and to analyze the blood oxygen metabolism characteristics of relevant brain regions by functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). **Methods:** A total of 40 eligible stroke patients with hemiplegia were enrolled and randomly divided into the experimental group (conventional rehabilitation + MDSS) and the control group (conventional rehabilitation alone), with intervention for 2 weeks. The Fugl-Meyer Assessment-Upper Extremities (FMA-UE) and Modified Barthel Index (MBI) were used for efficacy evaluation. Meanwhile, fNIRS was applied to monitor the hemodynamic changes in key brain regions, including contralesional Prefrontal Motor Cortex (cPFC), ipsilesional Primary Motor Cortex (iM1) and ipsilesional Prefrontal Cortex (iPFC). **Results:** After intervention, the FMA-UE and MBI scores of both groups were significantly increased compared with those before intervention ($P < 0.05$), and the scores of the experimental group were significantly higher than those of the control group (all $P < 0.05$). fNIRS detection showed that there were no statistical differences in blood oxygen concentration in iM1, cPFC and iPFC between the two groups before intervention ($P > 0.05$); after treatment, the blood oxygen concentration in the above brain regions of the experimental group all increased significantly ($P < 0.05$), while in the control group, the blood oxygen concentration in iM1 and cPFC increased significantly ($P < 0.05$), and the blood oxygen concentration in iPFC increased compared with that before treatment but had no statistical significance ($P > 0.05$); inter-group comparison showed that the post-treatment blood oxygen concentration in the three brain regions of the experimental group was significantly superior to that of the control group ($P < 0.05$). **Conclusion:** MDSS combined with conventional rehabilitation may improve some aspects of upper limb function as measured by the FMA-UE score and the MBI score, and affect hemodynamic activity in relevant brain regions in stroke patients. However, given the limitations of this study, including the short intervention duration and the single stimulation site, the long-term efficacy and underlying mechanisms of MDSS require further investigation.

Keywords

Stroke, Mechanical Digitum Sensory Stimulation (MDSS), Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS), Cerebral Cortical Activation, Activities of Daily Living (ADL)

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

脑卒中作为全球范围内导致残疾的主要疾病之一, 其引发的单侧肢体偏瘫会严重影响患者的日常生活自理能力, 其中上肢功能障碍不仅降低生活质量[1][2], 还会引发长期制动, 进而增加偏瘫侧肢体骨质

疏松、关节挛缩等继发问题的风险[3]。临床常用的强制性运动疗法、Bobath 疗法等传统康复手段, 虽能部分改善上肢运动功能, 但存在患者依从性参差不齐、疗效个体差异较大等问题[4] [5]。

神经发育治疗体系在国内外神经康复领域应用广泛, 其中 Rood 技术通过多种感觉输入调控运动功能, 为临床提供了重要思路[6] [7]。本课题组研发的机械指部感觉刺激技术(MDSS), 创新性地通过对指甲床施加精准可控的机械压力进行干预。与 Rood 技术利用感觉输入促进运动控制的理念相似, MDSS 亦通过外周感觉刺激调控中枢神经活动, 属于一种新型的精准感觉刺激干预手段[8]。

功能性磁共振成像(fMRI)和正电子发射断层扫描(PET)等技术在脑卒中康复研究中应用广泛, 但存在设备笨重、环境要求高、易受运动伪影干扰等问题, 难以在动态康复干预中实时捕捉脑活动变化[9]。相比之下, 功能性近红外光谱技术(fNIRS)凭借无创性、抗运动干扰能力强、便携性好、成本较低等优势, 可通过检测氧合血红蛋白(HbO)与脱氧血红蛋白(HbR)的浓度变化, 有效反映皮层的神经活动状态[10], 为脑卒中康复疗效的客观评估提供了有力工具[11]。然而, fNIRS 亦存在固有局限性, 包括探测深度有限、空间分辨率低于 fMRI、无法直接测量深部脑区的活动。综合考虑研究目的与干预特点, 本研究选用 fNIRS 技术, 系统观察 MDSS 干预下脑卒中患者大脑皮层关键区域的激活模式, 为其临床应用提供神经生理学依据。

2. 资料与方法

2.1. 一般资料

采用 G*Power 软件(v3.1.9.2)估算样本量[12]。以 FMA-UE 为主要结局指标, 计算得出最小样本需求为 36 例。选取 2024 年 5 月至 2025 年 5 月就诊的 43 例脑卒中患者, 其中 3 例因配合度欠佳剔除脱落, 最终 40 例完成研究纳入统计分析。

2.1.1. 诊断标准

所有患者均符合《中国脑卒中康复治疗指南(2011 完全版)》中脑卒中相关诊断标准[13], 且经头颅 CT 或 MRI 检查证实为脑出血或脑梗死。

2.1.2. 纳入标准

(1) 年龄 40~80 岁; (2) 病程 < 1 年, 既往无脑卒中病史; (3) 无脊髓损伤、外周神经疾病等神经系统病史; (4) 认知水平正常(MMSE 分 ≥ 21 分)[14], 能够理解并执行任务指令; (5) 单侧偏瘫, 健侧肢体无运动和感觉障碍; (6) 爱丁堡利手性问卷[15]证实右利手; (7) 患者及其家属同意参与试验并签署知情同意书; (8) 经头颅 CT 或 MRI 明确卒中类型及病灶位置。

2.1.3. 排除标准

(1) 并发周围神经病变或其他中枢神经病变; (2) 有肿瘤、结核、新发骨折等可能影响康复效果或存在安全风险的患者; (3) 不愿意签署知情同意书者。

2.1.4. 剔除与脱落标准

(1) 患者干预依从性差(完成率 < 80%); (2) 干预过程中出现突发癫痫、感染等严重并发症; (3) 病情加重, 无法继续参与。

患者按随机数字表法分为对照组和试验组, 每组各 20 例。对两组进行不同方式的干预, 两组患者入组前均采集其基础信息, 包括偏瘫侧肢体比较、年龄、性别、病程、高血压病史、糖尿病病史、简易精神检查 Mini-mental State Examination (MMSE), 两组基线资料比较差异无统计学意义($P > 0.05$), 具有可比性。见表 1。

Table 1. Comparison of general data of two groups of patients
表 1. 两组患者一般资料比较

指标	试验组(n = 20)	对照组(n = 20)	统计值	P 值
偏瘫侧(左/右)	8/12	14/6	$\chi^2 = 3.636$	0.057
年龄(岁)	55.75 ± 11.83	61.85 ± 10.29	t = -1.675	0.102
性别(男/女)	15/5	13/7	$\chi^2 = 0.317$	0.573
病程(天)	35.5 (18.50~82.00)	26.5 (12.25~67.75)	Z = -1.124	0.261
高血压史(有, %)	14 (70%)	11 (55%)	$\chi^2 = 0.784$	0.376
糖尿病史(有, %)	8 (40%)	6 (30%)	$\chi^2 = 0.286$	0.592
MMSE	24.05 ± 1.54	24.60 ± 1.73	t = -1.025	0.311

注：两组偏瘫侧存在基线不均衡，为随机误差所致；实际 fNIRS 数据处理时已对左侧半球卒中患者执行镜像翻转。

2.2. 研究方法

两组患者均接受常规康复训练，试验组在此基础上增加 MDSS 干预，干预周期均为 2 周，每周 6 d，每天 1 次。

2.2.1. 常规康复训练

(1) 物理治疗：① 中频电刺激；② 热疗法(蜡疗 45℃~52℃)；③ 关节活动度训练；④ 肌力训练。
(2) 作业治疗：感觉统合训练和精细功能训练。以上训练，每日固定顺序进行，总时长 120 min。两组由同一组治疗师(>3 年经验)执行确保强度、时长、频次一致。

2.2.2. MDSS 干预

(1) 刺激部位：因为小指在 S1 区投射较大、便于 fNIRS 定位且与尺神经支配抓握功能相关，预实验耐受性好，故将刺激部位确定为患侧小指甲床根部。

(2) 强度标定(pVAS 法)：干预前 1 天，由康复治疗师采用疼痛视觉模拟评分(pVAS)确定每位患者的刺激压力阈值。将 MDSS 探头置于患侧小指甲床根部，以缓慢递增方式施加压力(递增速率约 0.5 N/s)，嘱患者报告疼痛程度，直至患者主观疼痛评分达到 3~4 分(轻度疼痛)，记录该压力值作为标准强度(单位：牛顿，N)。该强度在后续干预中统一使用。每日干预前复测，若患者疼痛评分变化或出现明显不适，适当调整压力以维持 3~4 分。

(3) 干预体位：受试者采取自然坐姿，患侧上肢维持以下关节角度：肩关节外展 0°伴前屈 15°~30°、肘关节屈曲 70°~90°，腕关节中立位，手部放松。

(4) 干预流程：刺激采用 Block 模式执行，每个 Block 包含 10 s MDSS 任务态(TS，施加预设压力刺激于患侧小指甲床根部)与 15 s 静息态(RS，停止刺激)。任务态时，治疗师采用 MDSS 对患侧小指甲床根部施加预设压力值的机械刺激，持续 10 s；静息态时停止刺激，患者保持肢体放松。每组患者需要完成 5 个 Block 循环，全程约 125 s。

治疗师全程监控患者面部表情及主观感受，每完成 2 个 Block 询问一次是否存在疼痛或不适。若患者报告疼痛(pVAS ≥ 2 分)或出现躲避反射、皱眉等防御反应，则立即暂停，降低压力值(每次降低 1N)后重新开始当前 Block；若连续两次降低后仍不耐受，则终止当日干预。

2.3. 评定方法

为确保客观性，两组均由两名资深治疗师(从业年限 > 3 年)独立完成，双方均不接触分组信息。FMA-

UE 与 MBI 评分经一致性校验后, 以平均值作为最终结果。

2.3.1. 上肢运动功能评定

采用 Fugl-Meyer 上肢运动功能评分[16], 该量表涵盖反射、肩/肘/腕关节运动及手部功能等 9 个评测项目, 总分共 66 分, 其分值变化与上肢运动功能恢复程度成正比, 评分越高提示上肢运动功能越好。

2.3.2. 日常生活活动能力评定

采用改良 Barthel 指数(MBI), 从大小便控制、个人卫生、进食、洗澡等 9 个维度评估患者日常生活能力, 量表总分 100 分[17], 评分与患者独立生活能力成正比, 越高表示日常生活自理能力越强。

2.3.3. fNIRS 检测与数据处理

本研究采用多通道 fNIRS 成像设备 NirSmart (NirScan-6000A, 丹阳汇创医疗器械有限公司, 中国)采集脑功能活动的信号。设备发射的近红外光有三种不同的波长(730 nm、808 nm 和 850 nm), 采样频率为 10 Hz, 可检测脑组织氧合血红蛋白(HbO)和脱氧血红蛋白(HbR)的相对浓度变化。fNIRS 采集头帽基于 10/20 国际标准导联系统设计, ROI 划分依据 Brodmann 大脑皮层功能定位及既往卒中运动康复相关 fNIRS 研究进行确定[18]。实验采用 32 通道 fNIRS 系统(16 个发射探头, 16 个接收探头), 根据国际 10/20 系统将探头阵列定位于与目标脑区对应的头皮区域[19]。根据解剖位置及根据左右半球功能分区, 将检测区域划分为 10 个 ROI, 包括双侧 PFC, 14 个通道、双侧 Pre-SMA (前运动皮层及辅助运动区), 4 个通道、双侧 M1, 4 个通道、双侧 S1 (初级躯体感觉皮层), 6 个通道以及双侧 SMG (缘上回), 4 个通道。

所有测试均在安徽医科大学第二附属医院康复中心内安静房间进行。在正式实验开始前, MDSS 组参与者接受机械指感刺激(MDSS)预实验, 治疗师教会受试者熟练配合指令完成相应任务。检测前 1 天, 要求受试者避免咖啡因摄入并保证充足睡眠。fNIRS 数据采集在安静、温度 22℃~25℃环境下进行。受试者佩戴 fNIRS 采集头帽。正式检测前, 受试者闭眼静息 5 min 后采集 3 min 静息态数据。随后执行与 MDSS 干预相同的 Block 范式(5 个循环, TS: 10 s, RS: 15 s), 记录任务态脑活动变化。见图 1。



Figure 1. Implementation of mechanical digitorum sensory stimulator (MDSS)

图 1. 实施指部感觉刺激(MDSS)示意图

原始 fNIRS 数据采用 NirSpark 软件进行预处理, 设定信号标准差阈值 6、峰阈值 0.5, 通过样条插值法去除运动伪影; 生理噪声(如心跳、呼吸)经 0.01~0.1 Hz 带通滤波去除, 再利用 Homer2 软件中的修正 Beer-Lambert 定律, 将光密度信号转换为 HbO 浓度值。为统一分析标准, 左侧半球脑卒中患者将其数据进行镜像翻转, 统一以右侧半球为病灶侧进行后续分析[20]。

2.4. 统计学方法

采用 SPSS 26.0 与 NirSpark 软件协同分析。连续变量经 Shapiro-Wilk 正态性检验: 正态分布者以 $\bar{x} \pm s$ 描述, 组内干预前后比较采用配对 t 检验, 组间比较采用独立样本 t 检验; 非正态分布者以 M (P₂₅, P₇₅)表示, 组内比较用 Wilcoxon 符号秩检验, 组间比较用 Mann-Whitney U 检验。分类变量以频数(构成比)表示[21]。考虑到偏瘫侧是影响皮层激活模式的核心混杂因素, 两组偏瘫侧分布虽无统计学差异(P = 0.057), 但仍将其作为协变量纳入后续 fNIRS HbO 浓度及行为学指标的协方差分析(ANCOVA)中, 以校正组间不平衡可能带来的偏倚。假设检验显著性阈值 $\alpha = 0.05$ 。

3. 结果

3.1. FMA-UE 评估结果

干预前, 两组 FMA-UE 评分比较无显著性差异(P > 0.05)。干预后, 两组 FMA-UE 评分均显著改善(P < 0.05), 且试验组优于对照组, 差异具有统计学意义(P < 0.05)。见表 2。

Table 2. Changes of FMA-UE scores before and after intervention in two groups
表 2. 两组 FMA-UE 评分基线及干预后变化($\bar{x} \pm s$)

组别	例数(n)	治疗前	治疗后	t 值	P 值
试验组	20	39.5 ± 3.804	47.4 ± 4.946	-12.418	<0.001
对照组	20	41.1 ± 3.878	42.9 ± 4.506	-2.932	0.009
t 值		-1.675	2.252		
P 值		0.102	0.030		

3.2. 改良 Barthel 指数(MBI)结果

干预前, 两组 MBI 评分无统计学差异(P > 0.05)。干预后, 两组 MBI 评分均较基线显著提升(P < 0.01); 且试验组 MBI 评分优于对照组, 差异具有统计学意义(P < 0.05)。见表 3。

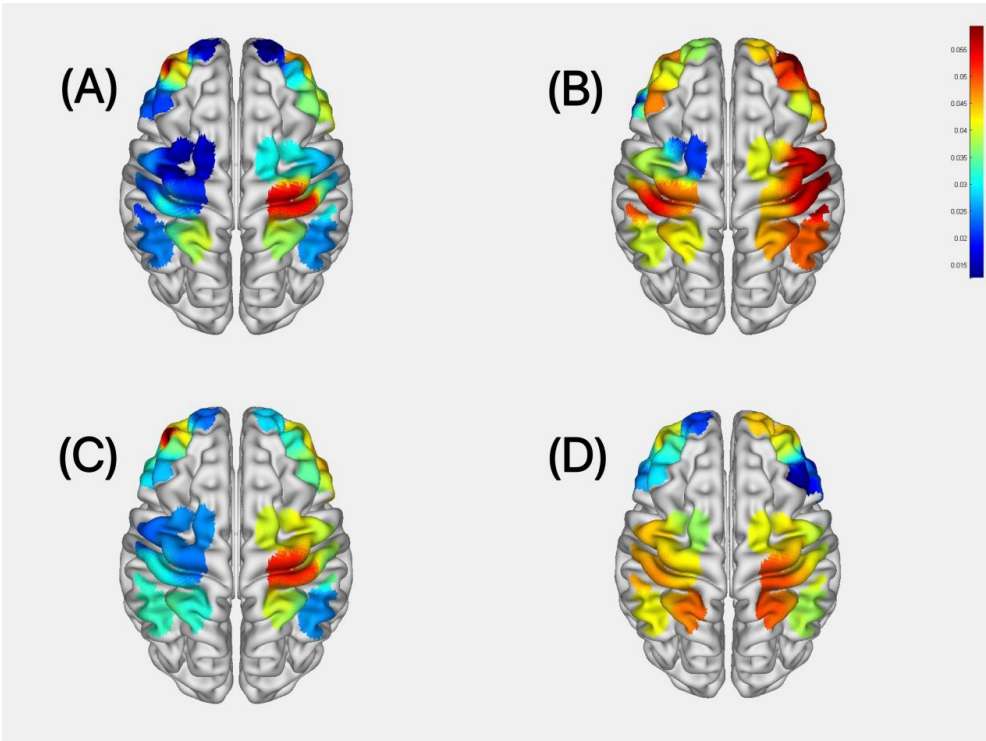
Table 3. Changes of MBI scores before and after intervention in two groups
表 3. 两组改良 Barthel 指数干预前后变化($\bar{x} \pm s$)

组别	例数(n)	治疗前	治疗后	t 值	P 值
试验组	20	53.75 ± 7.048	62.25 ± 7.34	-8.794	<0.001
对照组	20	54.25 ± 5.684	58.05 ± 4.673	-4.914	<0.001
t 值		-0.247	1.536		
P 值		0.806	0.040		

3.3. fNIRS

fNIRS 检测的氧合血红蛋白相对浓度(Δ HbO, 单位: mmol/L)结果显示, 干预前, 两组 iM1、cPFC、

iPFC 脑区 ΔHbO 比较均无显著性差异(均 $P > 0.05$)。治疗后, 试验组 cPFC、iM1、iPFC 脑区 ΔHbO 较治疗前均明显增加(均 $P < 0.05$); 对照组 iM1、cPFC 脑区 ΔHbO 较治疗前显著增加(iM1: $P = 0.041$; cPFC: $P = 0.044$), iPFC 脑区 ΔHbO 较治疗前有增加但无统计学意义($P > 0.05$); 组间对比显示, 试验组 cPFC、iM1、iPFC 脑区治疗后 ΔHbO 显著优于对照组(均 $P < 0.05$)。见图 2、表 4。



注释: (A) 试验组干预前 HbO 浓度; (B) 试验组干预后 HbO 浓度; (C) 对照组干预前 HbO 浓度; (D) 对照组干预后 HbO 浓度。颜色越深红表示 HbO 浓度越高(神经激活增强), 颜色越深蓝表示 HbO 浓度越低(神经激活减弱)。

Figure 2. Brain activation of two groups pre- and post-treatment (top view)

图 2. 两组治疗前后脑激活程度示意图(俯视图)

Table 4. Comparison of relative concentration of oxyhemoglobin (ΔHbO) between the two groups before and after treatment (unit: mmol/L, $\bar{x} \pm s$)

表 4. 两组治疗前后氧合血红蛋白相对浓度(ΔHbO)比较(单位: mmol/L, $\bar{x} \pm s$)

脑区	组别	例数(n)	治疗前	治疗后	t 值	P 值
iM1	试验组	20	0.053 ± 0.029	0.058 ± 0.044	2.937	0.008
	对照组	20	0.031 ± 0.033	0.040 ± 0.045	2.193	0.041
	t 值		-1.345	-2.136		
	P 值		0.187	0.039		
cPFC	试验组	20	0.038 ± 0.029	0.057 ± 0.02	2.872	0.01
	对照组	20	0.032 ± 0.030	0.037 ± 0.019	2.152	0.044
	t 值		-0.591	-2.396		
	P 值		0.558	0.022		
iPFC	试验组	20	0.039 ± 0.038	0.049 ± 0.035	3.108	0.006

续表

对照组	20	0.030 ± 0.036	0.037 ± 0.051	1.139	0.269
t 值		-0.668	-2.099		
P 值		0.508	0.043		

注: ΔHbO 为任务态相对于静息态基线的氧合血红蛋白浓度变化值, 单位为 mmol/L。数值为正表示任务态激活导致 HbO 浓度升高。

4. 讨论

MDSS 联合常规康复较单纯常规康复可进一步改善脑卒中患者 FMA-UE 评分所衡量的部分上肢功能, 同时 fNIRS 结果显示试验组 iM1、cPFC 及 iPFC 脑区 HbO 浓度均明显升高, 提示 MDSS 可能增强感觉运动相关脑区活动。需要指出的是, HbO 浓度变化主要反映任务态局部脑血氧动力学改变, 是神经活动增强的间接指标, 不能直接等同于神经可塑性改变或功能连接增强。

ROI 选择基于卒中后运动恢复过程中感觉 - 运动网络重组理论。M1 (Brodmann 4 区)是执行自主运动控制的重要皮层区域, 其功能恢复与上肢运动能力改善密切相关; S1 (Brodmann 3、1、2 区)负责外周感觉信息接收和整合, 是感觉反馈调节运动的重要环节。Pre-SMA 参与运动计划、动作准备及运动策略调整, 在运动学习过程中发挥重要作用; PFC 则参与注意控制、目标导向行为以及感觉信息与运动输出之间的高级整合。此外, SMG 参与身体表征、感觉整合及动作认知过程。因此, 上述 ROI 的选择能够较全面地反映 MDSS 诱导的感觉输入对感觉 - 运动网络及高级运动调控网络的潜在影响。

在研究中, iPFC 区域出现显著 HbO 变化, 提示 MDSS 可能不仅影响初级感觉运动区域, 还可能通过前额叶调控网络参与运动恢复过程, 而对照组该区域虽有升高趋势但未达到统计学意义。iPFC 参与认知调控、运动计划以及感觉信息与运动输出的整合过程。根据神经可塑性理论, 卒中后残余皮层可通过重复、特异性的感觉输入发生功能重组。本研究推测, MDSS 通过给予患侧手指精准机械感觉刺激, 可能增强感觉反馈输入及高级运动调控过程, 促进 iPFC 参与运动恢复相关网络调节。然而, 该机制仍需结合功能连接分析、TMS 等神经生理技术进一步验证。

从临床干预效果看, 试验组 FMA-UE 评分显著优于对照组, 提示 MDSS 可能具有常规康复之外的辅助作用。与镜像疗法主要依赖视觉反馈调节运动表征、振动及触觉刺激增强外周感觉输入、电刺激促进神经肌肉兴奋不同, MDSS 通过机械压力对特定指部感觉区域进行精准刺激, 具有刺激参数可调、操作简便、无需患者主动运动等特点。因此, MDSS 更适合作为感觉输入调节型辅助康复技术, 与传统运动训练形成互补, 而非替代现有康复模式。

需要注意的是, 对照组接受常规康复后同样出现 FMA-UE、MBI 评分及部分脑区 HbO 升高, 这可能与自然恢复过程、重复运动训练以及常规康复诱导的皮层激活有关。因此, MDSS 组相较于对照组的额外改善, 更可能体现感觉刺激在常规康复基础上的增益效应, 而非完全由 MDSS 单独产生。

本研究存在以下局限性: 一是样本量较小(每组 20 例)、单中心、干预周期短, 无法评估 MDSS 的远期疗效; 二是 fNIRS 空间分辨率及探测深度有限, 本研究主要分析 HbO 变化, 未来应结合 HbR、功能连接及多模态神经影像技术进一步阐明 MDSS 促进脑卒中康复的神经机制; 三是仅刺激患侧小指甲床根部 [18], 结论不能直接推广至所有手指; 四是未检测功能连接或神经可塑性指标, 因果机制尚属推测。未来需扩大样本量、延长随访周期, 并结合多模态神经影像技术进一步验证 MDSS 的疗效与机制。

5. 结论

本研究通过 fNIRS 技术初步观察到, MDSS 联合常规康复可能改善脑卒中患者 FMA-UE 评分所衡量

的部分上肢功能和MBI评分,并伴随感觉运动相关脑区任务态血氧动力学变化,iPFC激活可能参与MDSS干预相关的神经调节过程。该联合方案操作相对简便、安全性良好,患者接受度较高。由于本研究样本量及干预周期有限,相关疗效和机制仍需进一步验证。

声 明

本研究经安徽医科大学第二附属医院伦理委员会批准(批准号: YX2022-089)。

基金项目

本研究由安徽省高等学校省级自然科学基金计划项目、项目名称《基于功能性近红外光谱技术(fNIRS)对机械指部感觉刺激(MDSS)时健康成人的脑网络的调控作用》、项目编号: 2024AH050032 资助。

参考文献

- [1] Li, Y., Lian, Y., Chen, X., Zhang, H., Xu, G., Duan, H., *et al.* (2024) Effect of Task-Oriented Training Assisted by Force Feedback Hand Rehabilitation Robot on Finger Grasping Function in Stroke Patients with Hemiplegia: A Randomised Controlled Trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **21**, Article No. 77. <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01372-3>
- [2] 田婧, 刘珏, 何志杰, 等. 基于功能性近红外光谱技术的脑卒中后上肢运动功能障碍患者单侧上肢训练和双侧上肢训练脑网络功能连接对比研究[J]. 中国康复理论与实践, 2022, 28(5): 497-501.
- [3] Pang, M.Y.C. and Eng, J.J. (2005) Muscle Strength Is a Determinant of Bone Mineral Content in the Hemiparetic Upper Extremity: Implications for Stroke Rehabilitation. *Bone*, **37**, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2005.03.009>
- [4] 文翠凤, 娅茹, 黄昊, 等. 镜像疗法对脑卒中后I型复杂区域性疼痛综合征患者上肢功能及大脑皮质活动效果的随机对照试验[J]. 中国康复理论与实践, 2024, 30(10): 1203-1214.
- [5] 梁天佳, 龙耀斌, 陆丽燕, 等. 绳带辅助本体感觉神经肌肉促进技术训练联合绳带辅助脑机接口训练对脑卒中偏瘫上肢康复效果的随机对照试验[J]. 中国康复理论与实践, 2024, 30(8): 972-978.
- [6] 燕铁斌. 神经康复治疗技术发展的新趋势[J]. 康复学报, 2017, 27(1): 2-5.
- [7] Chaturvedi, P. and Kalani, A. (2022) Motor Rehabilitation of Aphasic Stroke Patient: The Possibility of Rood's Approach. *Neural Regeneration Research*, **18**, 551-551. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.346467>
- [8] Zhang, S., Yu, Y., Xu, P., Shen, X., Fang, C., Wu, X., *et al.* (2023) Mechanical Digit Sensory Stimulation: A Randomized Control Trial on Neurological and Motor Recovery in Acute Stroke. *Frontiers in Neuroscience*, **17**, Article ID: 1134904. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1134904>
- [9] Struckmann, W., Bodén, R., Gingnell, M., Fällmar, D. and Persson, J. (2022) Modulation of Dorsolateral Prefrontal Cortex Functional Connectivity after Intermittent Theta-Burst Stimulation in Depression: Combining Findings from fNIRS and fMRI. *NeuroImage: Clinical*, **34**, Article 103028. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2022.103028>
- [10] Zhao, Y., Han, P., Zhang, X. and Bi, X. (2024) Applications of Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) Neuroimaging during Rehabilitation Following Stroke: A Review. *Medical Science Monitor*, **30**, e944145. <https://doi.org/10.12659/msm.943785>
- [11] 吴毅. 功能性近红外光谱技术在脑卒中患者康复中的临床应用[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(11): 1281-1283.
- [12] Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. and Buchner, A. (2007) G*Power 3: A Flexible Statistical Power Analysis Program for the Social, Behavioral, and Biomedical Sciences. *Behavior Research Methods*, **39**, 175-191. <https://doi.org/10.3758/bf03193146>
- [13] 张通. 中国脑卒中康复治疗指南(2011 完全版) [J]. 中国康复理论与实践, 2012, 18(4): 301-318.
- [14] Khaw, J., Subramaniam, P., Abd Aziz, N.A., Ali Raymond, A., Wan Zaidi, W.A. and Ghazali, S.E. (2021) Current Update on the Clinical Utility of MMSE and Moca for Stroke Patients in Asia: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**, Article 8962. <https://doi.org/10.3390/ijerph18178962>
- [15] Oldfield, R.C. (1971) The Assessment and Analysis of Handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, **9**, 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- [16] Zhuang, J., Ding, L., Shu, B., Chen, D. and Jia, J. (2021) Associated Mirror Therapy Enhances Motor Recovery of the Upper Extremity and Daily Function after Stroke: A Randomized Control Study. *Neural Plasticity*, **2021**, Article ID: 7266263. <https://doi.org/10.1155/2021/7266263>

- [17] 闵瑜, 吴媛媛, 燕铁斌. 改良 Barthel 指数(简体中文版)量表评定脑卒中患者日常生活活动能力的效度和信度研究[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2008, 30(3): 185-188.
- [18] 李浩正, 范晨雨, 谢鸿宇, 等. 脑卒中后完全性失语症患者功能连接模式的功能性近红外光谱成像研究[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(10): 1233-1239.
- [19] Yao, K., Li, Q., Huang, W., Xie, D., Ma, Y., Zou, L., *et al.* (2025) Mechanical Finger Sensory Stimulation Effects on Brain Function in Post-Stroke Patients: A Resting-State fMRI Study. *Brain Research*, **1864**, Article 149822. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2025.149822>
- [20] Mihara, M., Fujimoto, H., Hattori, N., Otomune, H., Kajiyama, Y., Konaka, K., *et al.* (2021) Effect of Neurofeedback Facilitation on Poststroke Gait and Balance Recovery: A Randomized Controlled Trial. *Neurology*, **96**, e2587-e2599. <https://doi.org/10.1212/wnl.00000000000011989>
- [21] 唐晓晓, 洪永锋, 毛晶, 等. 早期不同康复策略对脑卒中患者偏瘫侧上肢功能恢复的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(6): 779-783.