

# 手掌局部振动对脑卒中后患者皮质活动的影响：一项fNIRS研究

盛嘉艺, 赵金枝, 沈显山\*

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4月7日; 录用日期: 2026年4月28日; 发布日期: 2026年5月7日

## 摘要

目的: 运用功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS), 比较手掌局部振动(focal palm vibration, FPV)对健康受试者与脑卒中患者皮质活动响应的差异。方法: 纳入14例健康受试者与22例脑卒中患者进行fNIRS检测, 采样频率为11Hz。探头阵列按国际10/20标准布置, 覆盖双侧前额叶皮质(prefrontal cortex, PFC)、前运动及辅助运动皮质(pre-motor and supplementary motor cortex, P-SMA)、初级运动皮质(primary motor cortex, M1)、初级躯体感觉皮质(primary somatosensory cortex, S1)及缘上回皮质(supramarginal gyrus, SMG)。采用Block范式, 包括5个循环, 每循环30秒FPV刺激任务与30秒静息。原始fNIRS数据经NirSpark软件预处理, 包括伪影去除、光密度转换及滤波等, 计算出平均氧合血红蛋白(HbO<sub>2</sub>)浓度。经时间锁定、平均化处理, 最终获得每个受试者在任务态和静息态下的各大脑皮质感兴趣区(region of interest, ROI)的平均HbO<sub>2</sub>浓度。在组内, 分别采用t检验比较分析任务态与静息态下各皮质ROI的HbO<sub>2</sub>值差异, 并对所得p值进行假发现率(false discovery rate, FDR)校正, 同时计算偏侧指数(laterality index, LI)。结果: 在健康受试者中, 与静息状态相比, 任务期间仅LS1的HbO<sub>2</sub>浓度升高( $p < 0.05$ ), 其余皮质感兴趣区未见变化。在脑卒中患者中, 任务态下双侧M1、S1、P-SMA、PFC和LSMG的HbO<sub>2</sub>浓度均高于静息态( $p < 0.05$ ), 而RSMG未观察到变化。偏侧指数分析结果显示: 健康受试者表现出显著的左侧运动皮质优势(LI = 0.319), 而脑卒中患者组则表现为双侧激活模式(LI = -0.0589)。结论: FPV作为一种无创性干预措施, 可能通过促进皮质重组, 从而改善神经生理功能。该疗法作为上肢康复治疗的重要辅助手段, 具有一定的临床应用潜力。

## 关键词

手掌局部振动, 功能性近红外光谱技术, 脑卒中, 偏侧指数

# Effects of Focal Palm Vibration on Cortical Activity in Post-Stroke Patients: An fNIRS Study

\*通讯作者。

文章引用: 盛嘉艺, 赵金枝, 沈显山. 手掌局部振动对脑卒中后患者皮质活动的影响: 一项 fNIRS 研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(5): 273-282. DOI: 10.12677/acm.2026.1651816

**Jiayi Sheng, Jinzhi Zhao, Xianshan Shen\***

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

Received: April 7, 2026; accepted: April 28, 2026; published: May 7, 2026

**Abstract**

**Objective:** This paper aims to use functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) to compare the cortical activity response to focal palm vibration (FPV) in healthy subjects and stroke patients. **Methods:** Fourteen healthy participants and 22 post-stroke patients underwent fNIRS assessment at a sampling frequency of 11 Hz. The probe array was arranged according to the international 10/20 system and covered the bilateral prefrontal cortex (PFC), pre-motor and supplementary motor cortex (P-SMA), primary motor cortex (M1), primary somatosensory cortex (S1), and supramarginal gyrus (SMG). A block-design paradigm was adopted, consisting of five cycles, each including 30 seconds of FPV stimulation followed by 30 seconds of rest. Raw fNIRS data were preprocessed using NirSpark software, including motion artifact removal, optical density conversion, and filtering, and mean oxyhemoglobin (HbO<sub>2</sub>) concentrations were calculated. After time-locking and averaging, the mean HbO<sub>2</sub> concentration for each region of interest (ROI) was obtained during both task and resting states. Within-group analysis was performed using t-tests to compare the HbO<sub>2</sub> concentration differences between task and rest states, with FDR (false discovery rate) correction applied to the p-values. Additionally, the laterality index (LI) was calculated. **Results:** In healthy participants, compared with the resting state, HbO<sub>2</sub> concentration increased only in the left primary somatosensory cortex (LS1) during the task period ( $p < 0.05$ ), while no significant changes were observed in the other cortical ROIs. In post-stroke patients, HbO<sub>2</sub> concentrations in the bilateral M1, S1, P-SMA, PFC, and left SMG were significantly higher during the task state than during rest ( $p < 0.05$ ), whereas no significant change was found in the right SMG. Laterality index analysis showed that healthy participants exhibited a marked left-hemispheric motor cortical dominance (LI = 0.319), whereas the stroke group demonstrated a bilateral activation pattern (LI = -0.0589). **Conclusion:** FPV, as a non-invasive intervention, may promote cortical reorganization and improve neurophysiological function. As an important adjunct in upper limb rehabilitation, this therapy holds potential for clinical application.

**Keywords**

**Focal Palm Vibration, Functional Near-Infrared Spectroscopy, Stroke, Laterality Index**

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**

脑卒中是一种急性脑血管疾病，因其发病率高、致残率和死亡率均显著上升，已成为全球重要的公共卫生挑战。全球范围内，卒中依然是导致死亡和残疾的主要原因之一，且对幸存者造成长期的功能损伤与残疾，显著影响其日常生活能力和生活质量[1]。现代康复医学的核心目标是通过多种物理治疗、作业治疗、言语治疗等手段，最大化患者的功能恢复。恢复过程的生物学基础是神经可塑性(Neuroplasticity)，

即大脑在遭遇损伤或学习等外界变化时,通过结构和功能上的自我重组来适应环境的能力[2]。脑卒中后,大脑会通过多种机制进行重组,例如,损伤半球内未受损区域的功能代偿、对侧半球的辅助参与以及神经网络连接的重建[3]。因此,有效的康复训练本质上是通过引导和促进有益的神经可塑性过程来实现的。

然而,传统的康复评估通常依赖于临床量表(如 Fugl-Meyer 评估量表、改良 Ashworth 量表等)。尽管这些方法在实践中广泛应用,但其主观性较强,且难以揭示功能改善背后的神经机制。即使患者在量表评分上表现出相似的改善,其大脑的重组模式也可能存在显著差异。近年来,脑成像技术已被用于研究脑卒中后运动恢复过程中的脑活动变化和功能重组。功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)是一种基于近红外光谱原理的脑功能成像方法。与传统脑功能成像技术(如功能性核磁共振成像, fMRI)相比, fNIRS 具有无创、便捷、可实时监测等优势,因此在临床神经康复研究中具有广阔的应用前景[4]。该技术通过检测脑部区域血氧浓度变化,反映大脑皮层氧合血红蛋白(HbO<sub>2</sub>)和去氧血红蛋白(HbR)的动态变化,从而间接反映神经活动。fNIRS 能够提供对大脑皮层活动的较高时间分辨率和空间分辨率,有助于深入探讨手掌局部振动(FPV)对大脑皮层活动的影响。多项研究表明, fNIRS 可揭示偏瘫患者运动功能恢复过程中的皮层活动模式[5]-[7],并用于评估不同康复干预手段(如机器人辅助训练及运动想象疗法)对上肢功能恢复的效果[8]。通过实时监测皮层活动及功能连接变化, fNIRS 不仅有助于解析脑皮层的可塑性与重组机制,还为康复策略的疗效评估和干预优化提供了客观依据[9] [10]。因此, fNIRS 在脑卒中偏瘫患者上肢康复中是一种非侵入性、可靠且具有临床指导价值的工具。局部振动(focal vibration, FV)作为卒中后痉挛的重要干预手段,其作用靶点尚未形成统一共识。近年来,手掌因机械感受器密集且在躯体感觉皮层中具有广泛且可塑的表征,作为干预靶点受到广泛关注[11]。在健康人群中,手掌局部振动(focal palm vibration, FPV)已被证明可改善触觉感知与运动功能,但在脑卒中患者中对肢体痉挛及上肢运动功能的应用报道仍较有限[12] [13]。本研究旨在基于 fNIRS 技术探究 FPV 对健康受试者与脑卒中患者大脑皮层活动的诱导效应,为脑卒中康复干预提供临床和理论依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究对象

共招募 2023 年 12 月至 2025 年 10 月本院脑卒中恢复期偏瘫患者 22 例以及 14 例健康受试者。纳入标准:① 诊断符合美国卒中协会《2019 年急性缺血性卒中早期管理指南》[14]及《2015 年脑出血指南》[15],经头颅 CT/MRI 检查确认为脑卒中;② 病程为发病后 2 周至半年之间;③ 体内无金属植入物或心脏起搏器;④ 可完成临床量表评估并坚持随访;⑤ 认知功能正常,无失语或智力障碍。排除标准:① 严重认知障碍;② 精神病史;③ 无法完成随访;④ 既往有脑损伤史或合并神经系统退行性疾病;⑤ 上肢存在影响外周血管的疾病,如深静脉血栓、血管炎或雷诺病。

### 2.2. 干预方法

采用区块设计 fNIRS 技术,测量并比较健康成人和脑卒中患者在 FPV 刺激前后的皮层 HbO<sub>2</sub> 浓度变化。分析不同皮层区域的活动模式,以探讨 FPV 对两组人群皮层活动的影响。手掌局部振动(focal palm vibration, FPV)治疗设备(中国泽普医疗器械有限公司;型号: ZEPU-K5000A)以 60 Hz 的频率和 6 mm 的振幅进行 FPV 治疗。治疗师将设备垂直于患者的手掌进行局部振动治疗。

### 2.3. fNIRS 探头定位和测量点

在任务执行期间,采用连续波 fNIRS 设备(中国丹阳慧创医疗器械有限公司;型号: NirScan6000A)记

录血流动力学活动。该设备使用 730 nm 波长的发光二极管检测 HbO<sub>2</sub> 浓度变化, 采样频率为 11 Hz。光学探头组包括 14 个发射器和 14 个接收器, 按照 10/20 国际标准系统布置, 共形成 30 个通道, 覆盖双侧前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)、前运动和辅助运动皮层(premotor and supplementary motor cortex, P-SMA)、初级运动皮层(primary motor cortex, M1)、初级躯体感觉皮层(primary somatosensory cortex, S1)及缘上回皮层(supramarginal gyrus, SMG) (见图 1)。实验在一个安静的实验室中进行, 只有研究者和参与者在场。参与者在测试前被告知休息、保持稳定的心理状态, 并避免使用兴奋剂。在测试过程中, 参与者保持镇静, 避免头部移动和讲话, 尽量减少干扰。研究者提供了任务开始和结束的口头提示。区块设计包括 30 秒的 FPV 刺激, 随后是 30 秒的休息(共 5 个循环) (见图 2)。多通道连续波 fNIRS 用于量化任务执行和休息期间皮层感兴趣区域(ROIs)的血流动力学活动, 涵盖 PFC、P-SMA、M1、S1 和 SMG。

Channels	ROI
2,14/12,29	Supramarginal Gyrus (R/L)
13,16/27,28	Primary Motor Cortex (R/L)
1,15/11,30	Somatosensory Cortex (R/L)
20,21,26/ 25,31,32	Pre-motor and Supplementary Motor Area (R/L)
3,4,5,6,17,18,19/ 7,8,9,10,22,23,24	Prefrontal Motor Cortex (R/L)

Figure 1. Channel distribution across ROIs  
图 1. 各感兴趣区域(ROIs)上的通道分布

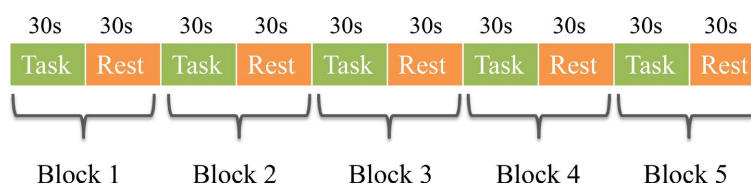


Figure 2. Block design  
图 2. 区块设计

## 2.4. fNIRS 数据分析

fNIRS 数据采用 NirSpark 软件进行标准化预处理, 包括伪影去除、光密度转换、0.01~0.2 Hz 带通滤波及 HbO<sub>2</sub> 浓度计算。通过去除运动及环境干扰, 提高信号质量[16]; 将原始光学信号转换为光密度值后进行滤波处理, 以减少生理噪声和低频漂移的影响[17]; 最终依据 Beer-Lambert 定律计算 HbO<sub>2</sub> 浓度相对变化值, 作为皮层激活的评价指标[18]。

## 2.5. 偏侧指数

参与者左右半球的平均激活值用于计算偏侧指数(laterality index, LI), 其范围为-1 至 1。当 LI > 0.1 时, 左半球占主导地位, 当 LI < 0.1 时, 右半球占主导地位, 当 LI 绝对值 ≤ 0.1 时, 激活模式被归类为双侧。LI 根据等式计算(如下)。

$$LI = AL - AR / AL + AR$$

(AL 和 AR 分别是左脑区和右脑区的平均激活)

## 2.6. 统计学分析

所有实验数据均使用 SPSS 软件(版本 26.0)进行分析。采用 Shapiro-Wilk 检验评估连续变量的正态性。符合正态分布的连续数据以均值  $\pm$  标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示, 基线时组间比较采用独立样本  $t$  检验, 组内的干预前后比较使用配对样本  $t$  检验。对于非正态分布的连续数据, 以中位数(四分位数间距)  $M(P_{25}, P_{75})$  表示, 组内干预前后比较采用 Wilcoxon 符号秩检验。 $P < 0.05$  被认为具有统计学意义。

## 3. 结果

### 3.1. 受试者人口学和临床特征

共招募了 14 名健康成人和 22 名脑卒中患者, 均为右利手, 患者人口学和临床特征见表 1。

**Table 1.** Demographic and clinical characteristics of patients

**表 1.** 患者人口学与临床特征

人口统计学和临床特征	总人数(N = 22)
年龄(岁) <sup>b</sup>	62.55 $\pm$ 12.07
性别, 男/女 <sup>a</sup>	16/6
脑梗死/脑出血 <sup>a</sup>	18/4
优势手(右/左) <sup>a</sup>	20/0
右侧偏瘫/左侧偏瘫 <sup>a</sup>	14/8

注: <sup>a</sup>参与者人数; <sup>b</sup>均值  $\pm$  标准差。

### 3.2. FPV 对健康受试者和脑卒中患者皮层活动的影响

在健康受试者中, 任务仅在 LS1 区域引发了较高的 HbO<sub>2</sub> 浓度( $p = 0.001, t = -3.419$ ), 其他感兴趣区域(ROIs)未观察到显著变化(表 2; 图 3(A))。在脑卒中患者中, 任务期间多个 ROIs 的 HbO<sub>2</sub> 浓度均有所增加, 包括双侧 M1、S1、P-SMA、PFC 和 LSMG, 而 RSMG 未观察到显著效果(表 3; 图 3(B))。所有显著结果在应用 FDR 校正后,  $p$  值均低于显著性阈值( $p < 0.05$ )。

**Table 2.** Changes in HbO<sub>2</sub> concentration in healthy subjects

**表 2.** 健康受试者 HbO<sub>2</sub> 浓度变化

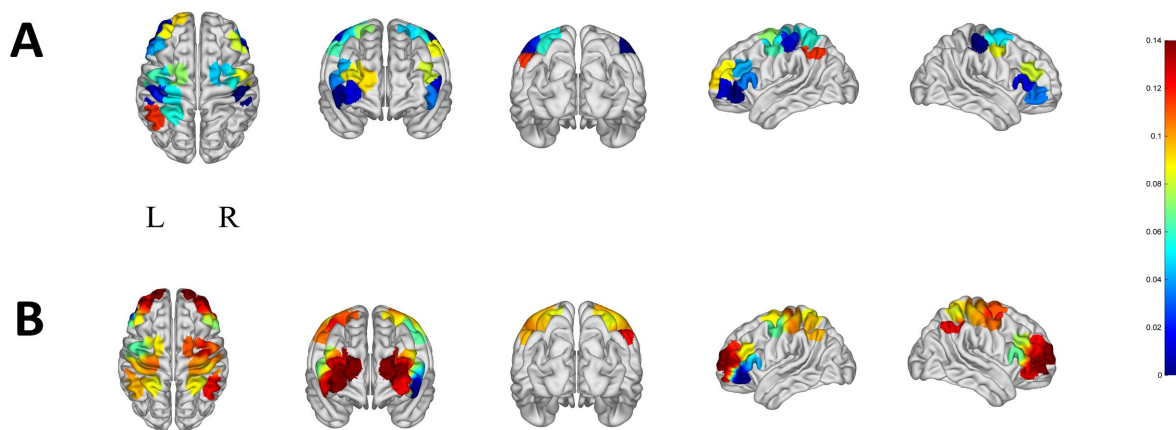
ROI	HbO <sub>2</sub> Task	HbO <sub>2</sub> Rest	$t/Z$	$P$	$P^{FDR}$
RSMG	0.00813 $\pm$ 0.05496 <sup>a</sup>	-0.00673 (-0.01607, 0.03753) <sup>b</sup>	-0.026	0.980	ns
LSMG	0.00018 $\pm$ 0.06239 <sup>a</sup>	0.01569 $\pm$ 0.06270 <sup>a</sup>	-0.735	0.472	ns
RM1	0.06246 $\pm$ 0.08862 <sup>a</sup>	0.04622 $\pm$ 0.09709 <sup>a</sup>	1.336	0.199	ns
LM1	-0.00253 $\pm$ 0.05872 <sup>a</sup>	0.01312 $\pm$ 0.06536 <sup>a</sup>	-0.603	0.554	ns
RS1	0.00206 $\pm$ 0.05736 <sup>a</sup>	-0.00930 $\pm$ 0.10212 <sup>a</sup>	0.521	0.609	ns
<b>LS1</b>	<b>0.02920 (0.02303, 0.04565)<sup>b</sup></b>	<b>0.02114 (0.00540, 0.02932)<sup>b</sup></b>	<b>-3.419</b>	<b>0.001</b>	<b>0.007</b>
RPSMA	0.03453 (0.02118, 0.05789) <sup>b</sup>	0.02609 (0.01681, 0.13348) <sup>b</sup>	0.714	0.485	ns
LPSMA	0.02631 (0.01633, 0.04423) <sup>b</sup>	0.06890 (0.01363, 0.08321) <sup>b</sup>	0.212	0.835	ns
RPFC	0.00783 $\pm$ 0.06037 <sup>a</sup>	0.00154 $\pm$ 0.08477 <sup>a</sup>	-0.588	0.557	ns
LPFC	0.02739 $\pm$ 0.06144 <sup>a</sup>	0.03305 $\pm$ 0.06822 <sup>a</sup>	-1.067	0.286	ns

注: HbO<sub>2</sub> 值以 <sup>a</sup>均值  $\pm$  标准差(正态分布)或 <sup>b</sup>中位数( $P_{25}, P_{75}$ ) (非正态分布)表示。正态性采用 Shapiro-Wilk 检验评估。根据数据分布情况, 采用配对样本  $t$  检验或 Wilcoxon 符号秩检验。 $P^{FDR}$ : 经错误发现率(false discovery rate, FDR)校正后的  $P$  值。加粗表示经 FDR 校正后差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。

**Table 3.** Changes in HbO<sub>2</sub> concentration in stroke patients  
**表 3.** 脑卒中患者 HbO<sub>2</sub> 浓度变化

ROI	HbO <sub>2</sub> Task	HbO <sub>2</sub> Rest	<i>t</i> / <i>Z</i>	<i>P</i>	<i>P</i> <sup>FDR</sup>
RSMG	-0.00519 ± 0.11211 <sup>a</sup>	0.03658 ± 0.07419 <sup>a</sup>	-0.751	0.459	ns
LSMG	0.01072 ± 0.04434 <sup>a</sup>	0.02058 ± 0.03535 <sup>a</sup>	2.756	0.010	0.023
RM1	0.04448 ± 0.05350 <sup>a</sup>	0.02184 ± 0.04725 <sup>a</sup>	4.863	<0.001	0.002
LM1	0.01698 ± 0.05357 <sup>a</sup>	0.02729 ± 0.03606 <sup>a</sup>	3.293	0.003	0.008
RS1	0.05467 (0.03462, 0.08324) <sup>b</sup>	0.03453 (0.01185, 0.05115) <sup>b</sup>	-3.912	<0.001	<0.001
LS1	0.01398 ± 0.03416 <sup>a</sup>	0.02567 ± 0.02961 <sup>a</sup>	2.881	0.008	0.014
RPSMA	0.01674 ± 0.04395 <sup>a</sup>	0.02115 ± 0.03771 <sup>a</sup>	4.188	<0.001	<0.001
LPSMA	0.02380 ± 0.03490 <sup>a</sup>	0.03195 ± 0.03680 <sup>a</sup>	3.941	0.001	0.003
RPFC	0.04951 ± 0.02902 <sup>a</sup>	0.02863 ± 0.02193 <sup>a</sup>	-2.960	0.003	0.008
LPFC	0.04461 ± 0.02803 <sup>a</sup>	0.02162 ± 0.02444 <sup>a</sup>	-3.621	<0.001	<0.001

注：HbO<sub>2</sub> 值以 <sup>a</sup> 均值 ± 标准差(正态分布)或 <sup>b</sup> 中位数(*P*<sub>25</sub>, *P*<sub>75</sub>) (非正态分布)表示。正态性采用 Shapiro-Wilk 检验评估。根据数据分布情况，采用配对样本 *t* 检验或 Wilcoxon 符号秩检验。*P*<sup>FDR</sup>：经 FDR 校正后的 *P* 值。加粗表示经 FDR 校正后差异具有统计学意义(*P* < 0.05)。



**Figure 3.** Task-Evoked cortical activation maps in healthy participants (A) and stroke patients (B)  
**图 3.** 健康受试者 (A)和脑卒中患者 (B)在 FPV 任务期间的皮层活动情况解剖图

### 3.3. 偏侧指数结果

在 FPV 任务中，脑卒中患者组的 LI 为 -0.0589，表现为双侧脑区激活，而健康受试者组的 LI 为 0.319，表现为左半球激活优势。

## 4. 讨论

早期关于局部振动的神经机制探索多在健康受试者中开展，2002 年的一项 fMRI 研究显示，健康受试者在进行右侧手掌振动时，中央前回和中央后回显著活动[13]。Naito [19]在其综述中指出，使用 fMRI 技术对健康受试者施加肌腱局部振动可以诱发“运动错觉”，主要观察到对侧运动皮层的活动。Casini 等 [20]通过脑磁图研究发现，振动健康受试者腕屈肌、伸肌肌腱同样能产生“运动错觉”，并激活对侧初级感觉运动皮层、辅助运动皮层及内侧角回相关区域。Lopez 等[21]利用脑电图(electroencephalograph, EEG)

记录显示,四肢肌肉振动可增强健康受试者对侧 S1-M1 区域的神经生理振荡和兴奋性。Imai 等[22]利用功能性近红外光谱(fNIRS)检测腕伸肌肌腱在不同振动频率下的皮层活动时发现,双侧运动前皮层及顶叶皮层的神经活动显著增加。综上对健康受试者肌腹和肌腱施加 FV 通常会激活对侧的感觉运动皮层。健康受试者仅 LS1 出现显著激活,说明 FPV 首先作用于手掌丰富的机械感受器,并以较为直接的方式增强躯体感觉输入。手掌在感觉皮层中具有较大的皮层表征面积,因此局部振动刺激较易在 S1 区域引起可检测到的血流动力学变化。与此同时,健康个体的感觉-运动网络结构完整、信息传递效率较高,对于单纯振动刺激可能并不需要额外募集更多运动相关皮层资源即可完成感觉加工,同时, fNIRS 的空间分辨率较低,仅能捕捉皮层表面的活动,无法探测到深部大脑区域,这可能解释了本研究中未观察到运动皮层的活动[23][24]。值得注意的是,临床振动治疗设备通常是金属基材,限制了 fMRI 的使用,而 fNIRS 则提供了一个实践中的解决方案,具有显著的临床潜力。

与健康组相比,脑卒中患者在 FPV 刺激下出现双侧 M1、S1、P-SMA、PFC 及左侧 SMG 激活增强,提示卒中后大脑对外周振动输入的反应不再局限于初级感觉区,而是扩展至运动执行、运动准备及高级认知调控相关区域。S1 激活增强提示 FPV 可有效提高患侧相关感觉输入; M1 和 P-SMA 激活增强则表明,这种感觉输入可能进一步促进了感觉-运动耦合及运动程序准备; PFC 激活增强可能反映卒中患者在接受刺激时需要募集更多注意控制和执行功能资源,以完成对外界刺激的整合与调节。左侧 SMG 激活增强则提示 FPV 可能还涉及更高水平的感觉整合及感觉信息向运动输出的转换。整体来看,FPV 并非单纯的外周机械刺激,其在脑卒中患者中更可能通过增强感觉传入、促进感觉-运动整合以及调动代偿网络,进而影响皮层重组过程。这些结果与之前研究 FV 在患者肌腹和肌腱上的应用结果一致[25]-[27]。Wang 等随机对照研究进一步显示, FV 可改善亚急性脑卒中患者上肢运动功能,其潜在机制可能与增强感觉通路效能及促进感觉运动皮层可塑性改变有关[28]。这些结果与本研究总体一致,提示 FPV 并非单纯的外周机械刺激,而更可能通过增强感觉输入、促进感觉-运动整合以及调动代偿网络,共同参与卒中后皮层重组。需要指出的是,广泛皮层激活并不必然等同于更优的神经恢复。Chen 等在 2025 年的 fNIRS 研究中发现,触觉反馈可增强脑卒中患者抓握任务中的运动皮层血流反应,但患者整体脑网络功能仍弱于健康对照,部分脑区激活水平反而较低,提示卒中后任务相关脑活动增强有时可能反映额外的神经资源消耗,而非真正高效的网络加工[29]。因此,本研究中脑卒中患者表现出的多脑区共同募集,虽然提示 FPV 能够诱发较强的中枢反应,但其功能意义仍需结合临床改善程度及脑网络效率综合判断。值得注意的是,鉴于 SMG 在高级躯体感觉整合及感觉-运动转换中的关键作用,本研究特别关注了 SMG 的活动。然而,结果显示 RSMG 未出现显著变化。这提示 FPV 对脑卒中患者皮层活动的调节并非均一扩展至整个顶叶联合区,而是更倾向于作用于与基础感觉输入处理及感觉-运动耦合密切相关的核心网络。其诱发的皮层反应主要集中于初级感觉运动环路及与运动准备、任务维持相关的辅助脑区,而对参与高级躯体感觉整合、空间表征和注意调控的 RSMG 影响相对有限。这一结果可能与患者病灶部位、损伤程度及病程存在个体差异有关,也可能受刺激参数、刺激时长及样本量限制的影响,使部分脑区虽有激活趋势但未达到统计学显著性。

本研究中偏侧指数结果具有重要启示。健康组  $LI = 0.319$ ,表现为左半球激活优势;脑卒中组  $LI = -0.0589$ ,表现为双侧激活模式。该结果提示,健康个体在 FPV 任务中仍保持相对稳定的半球侧化特征,而脑卒中患者则表现出侧化减弱甚至双侧共同参与的皮层反应。对于这种“双侧激活”模式,现有研究并不支持单一解释。一方面,传统代偿理论认为,卒中后双侧募集可反映损伤后残存网络重组及对侧半球辅助参与,是一种适应性可塑性表现[30]。另一方面,近年来关于对侧半球作用的研究表明,对侧 M1 的过度激活也可能具有潜在适应不良意义,尤其在损伤较轻或患侧残存网络仍具有较强恢复潜力时,对侧半球过度参与可能通过半球间抑制机制干扰患侧半球的有效重组[31]。因此,本研究观察到的双侧激活

更适合被理解为一种与损伤程度、残余结构储备和任务需求相关的重组表型，而不能简单解释为完全有益的恢复信号。这一观点也得到其他近年研究的支持。Xu 等利用 fNIRS 观察卒中患者步行过程中皮层活动变化时发现，干预后对侧前运动皮层激活下降，作者认为这可能意味着运动模式更加自动化、对代偿性皮层资源的依赖减少[32]。这一结果提示，在某些情况下，皮层激活减少未必代表功能减弱，反而可能提示神经控制效率提高。由此推测，本研究中 FPV 诱发的双侧激活可能既包含适应性代偿成分，也可能包含低效率募集成分，其具体意义仍需结合功能结局进一步判断。

本研究具有明确的临床意义和一定的创新性。在意义方面，它试图揭示一种物理治疗手段(FPV)背后的神经生理机制，为脑卒中康复的临床实践提供了客观的神经影像学证据。使用 fNIRS 这一便携、无创的技术来评估康复干预效果，本身就具有很高的临床转化价值。在创新性方面，研究将振动刺激的靶点选定为手掌，这是一个独特的切入点。相较于以往研究多集中于肌腹或肌腱，手掌作为机械感受器密集的区域，其在感觉皮层具有巨大的表征，探讨其对大脑的激活效应具有新颖性。此外，通过直接比较健康人与脑卒中患者的激活模式差异，清晰地揭示了脑损伤后大脑对外周感觉输入的响应模式发生了根本性改变，为理解脑卒中后的神经可塑性提供了新的视角。

本研究亦存在若干局限。首先，样本量相对较小，可能影响结果的稳定性与外推性。其次，本研究仅观察 FPV 刺激下的即时皮层血流动力学变化，尚未结合纵向随访评价其对上肢运动功能、痉挛程度及日常生活能力的持续影响。再次，卒中患者在病灶部位、病程、损伤严重程度及残余皮质脊髓束完整性等方面均存在异质性，而这些因素均可能影响双侧激活的功能意义。此外，本研究主要采用 HbO<sub>2</sub> 和 LI 进行分析，尚未进一步探讨脑区间功能连接、网络拓扑特征及其与临床改善之间的关系。已有系统综述指出，当前卒中康复 fNIRS 研究在任务范式、脑区覆盖、指标选择及标准化流程方面仍存在明显异质性，这也限制了不同研究之间的横向比较[33]。

基于上述局限，未来研究可从以下几个方面进一步深入：第一，扩大样本量并开展多中心研究，同时按病灶部位、病程阶段、上肢功能损害程度及皮质脊髓束保留情况进行分层，以明确不同患者亚型对 FPV 的反应差异；第二，设置假刺激对照，并系统比较不同刺激频率、振幅、持续时间及刺激部位的剂量-反应关系；第三，将 fNIRS 与 TMS、DTI、EEG、SEP/MEP 等技术联合应用，以进一步揭示双侧激活背后的皮层兴奋性、结构基础和网络连接机制；第四，将皮层激活变化与 FMA-UE、MAS、MBI 等临床结局指标进行纵向关联分析，以明确哪些双侧激活属于适应性重组，哪些更可能反映低效率代偿或潜在适应不良模式。

综上所述，本研究创新性地选取手掌作为局部振动靶点。结果表明，FPV 可诱发脑卒中患者较健康受试者更广泛的皮层激活，并使皮层活动由相对侧化模式转向双侧募集模式。该双侧激活可能反映卒中后感觉输入增强和感觉-运动网络重组，但其功能意义并非完全单向有益，而可能同时包含适应性代偿与潜在低效率募集两方面特征。因此，在本研究条件下，FPV 更适合作为一种能够诱发卒中后皮层反应和感觉-运动网络参与的辅助干预手段，其长期疗效及最佳适用人群仍有待进一步研究证实。

## 声 明

本研究经安徽医科大学第二附属医院医学伦理委员会批准(伦理审批号: YX2024187F1), 已在中国临床试验注册中心(ChiCTR; <https://www.chictr.org.cn>, ChiCTRTRC14005228)完成注册。所有患者及其家属均签署知情同意书。

## 基金项目

安徽省高等教育机构质量工程项目(2024xskc053), 安徽医科大学科研基金项目(2022xkj196)。

## 利益冲突

本文所有作者均声明不存在利益冲突。

## 参考文献

- [1] Huppert, T.J., Diamond, S.G., Franceschini, M.A. and Boas, D.A. (2009) Homer: A Review of Time-Series Analysis Methods for Near-Infrared Spectroscopy of the Brain. *Applied Optics*, **48**, D280. <https://doi.org/10.1364/ao.48.00d280>
- [2] Mihara, M. and Miyai, I. (2016) Review of Functional Near-Infrared Spectroscopy in Neurorehabilitation. *Neurophotonics*, **3**, Article 031414. <https://doi.org/10.1117/1.nph.3.3.031414>
- [3] Cao, J., Khan, B., Hervey, N., Tian, F., Delgado, M.R., Clegg, N.J., *et al.* (2015) Evaluation of Cortical Plasticity in Children with Cerebral Palsy Undergoing Constraint-Induced Movement Therapy Based on Functional Near-Infrared Spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*, **20**, Article 046009. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.20.4.046009>
- [4] 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.
- [5] Delorme, M., Vergotte, G., Perrey, S., Froger, J. and Laffont, I. (2019) Time Course of Sensorimotor Cortex Reorganization during Upper Extremity Task Accompanying Motor Recovery Early after Stroke: An fNIRS Study. *Restorative Neurology and Neuroscience*, **37**, 207-218. <https://doi.org/10.3233/rnn-180877>
- [6] Huo, C., Sun, Z., Xu, G., Li, X., Xie, H., Song, Y., *et al.* (2022) fNIRS-Based Brain Functional Response to Robot-Assisted Training for Upper-Limb in Stroke Patients with Hemiplegia. *Frontiers in Aging Neuroscience*, **14**, Article ID: 1060734. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.1060734>
- [7] Xia, W., Dai, R., Xu, X., Huai, B., Bai, Z., Zhang, J., *et al.* (2022) Cortical Mapping of Active and Passive Upper Limb Training in Stroke Patients and Healthy People: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study. *Brain Research*, **1788**, Article 147935. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2022.147935>
- [8] Dai, Y., Huang, F. and Zhu, Y. (2022) Clinical Efficacy of Motor Imagery Therapy Based on fNIRS Technology in Rehabilitation of Upper Limb Function after Acute Cerebral Infarction. *Pakistan Journal of Medical Sciences*, **38**, 1980-1985. <https://doi.org/10.12669/pjms.38.7.5344>
- [9] Ma, Y., Xie, D., Yu, Y., Yao, K., Zhang, S., Li, Q., *et al.* (2025) Differences in Brain Activation and Connectivity during Unaffected Hand Exercise in Subacute and Convalescent Stroke Patients. *Neuroscience*, **565**, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.11.038>
- [10] Li, H., Fu, X., Lu, L., Guo, H., Yang, W., Guo, K., *et al.* (2023) Upper Limb Intelligent Feedback Robot Training Significantly Activates the Cerebral Cortex and Promotes the Functional Connectivity of the Cerebral Cortex in Patients with Stroke: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study. *Frontiers in Neurology*, **14**, Article ID: 1042254. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1042254>
- [11] Johnson, K.O., Yoshioka, T. and Vega-Bermudez, F. (2000) Tactile Functions of Mechanoreceptive Afferents Innervating the Hand. *Journal of Clinical Neurophysiology*, **17**, 539-558. <https://doi.org/10.1097/00004691-200011000-00002>
- [12] Tsuzuki, D. and Dan, I. (2014) Spatial Registration for Functional Near-Infrared Spectroscopy: From Channel Position on the Scalp to Cortical Location in Individual and Group Analyses. *NeuroImage*, **85**, 92-103. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.07.025>
- [13] Golaszewski, S.M., Siedentopf, C.M., Baldauf, E., Koppelstaetter, F., Eisner, W., Unterrainer, J., *et al.* (2002) Functional Magnetic Resonance Imaging of the Human Sensorimotor Cortex Using a Novel Vibrotactile Stimulator. *NeuroImage*, **17**, 421-430. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1195>
- [14] Powers, W.J., Rabinstein, A.A., Ackerson, T., *et al.* (2019) Guidelines for the Early Management of Patients with Acute Ischemic Stroke: 2019 Update to the 2018 Guidelines for the Early Management of Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*, **50**, e344-e418.
- [15] Hemphill, J.C., Greenberg, S.M., Anderson, C.S., Becker, K., Bendok, B.R., Cushman, M., *et al.* (2015) Guidelines for the Management of Spontaneous Intracerebral Hemorrhage: A Guideline for Healthcare Professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*, **46**, 2032-2060. <https://doi.org/10.1161/str.0000000000000069>
- [16] Huo, C., Li, X., Jing, J., Ma, Y., Li, W., Wang, Y., *et al.* (2019) Median Nerve Electrical Stimulation-Induced Changes in Effective Connectivity in Patients with Stroke as Assessed with Functional Near-Infrared Spectroscopy. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, **33**, 1008-1017. <https://doi.org/10.1177/1545968319875952>
- [17] Pinti, P., Scholkmann, F., Hamilton, A., Burgess, P. and Tachtsidis, I. (2019) Current Status and Issues Regarding Pre-Processing of fNIRS Neuroimaging Data: An Investigation of Diverse Signal Filtering Methods within a General Linear Model Framework. *Frontiers in Human Neuroscience*, **12**, Article No. 505. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00505>

- [18] Scholkmann, F., Spichtig, S., Muehleemann, T. and Wolf, M. (2010) How to Detect and Reduce Movement Artifacts in Near-Infrared Imaging Using Moving Standard Deviation and Spline Interpolation. *Physiological Measurement*, **31**, 649-662. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/31/5/004>
- [19] Naito, E. (2004) Sensing Limb Movements in the Motor Cortex: How Humans Sense Limb Movement. *The Neuroscientist*, **10**, 73-82. <https://doi.org/10.1177/1073858403259628>
- [20] Casini, L., Romaiuguère, P., Ducorps, A., Schwartz, D., Anton, J. and Roll, J. (2006) Cortical Correlates of Illusory Hand Movement Perception in Humans: A MEG Study. *Brain Research*, **1121**, 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.08.124>
- [21] Lopez, S., Bini, F., Del Percio, C., Marinozzi, F., Celletti, C., Suppa, A., *et al.* (2017) Electroencephalographic Sensorimotor Rhythms Are Modulated in the Acute Phase Following Focal Vibration in Healthy Subjects. *Neuroscience*, **352**, 236-248. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.03.015>
- [22] Imai, R., Hayashida, K., Nakano, H. and Morioka, S. (2014) Brain Activity Associated with the Illusion of Motion Evoked by Different Vibration Stimulation Devices: An fNIRS Study. *Journal of Physical Therapy Science*, **26**, 1115-1119. <https://doi.org/10.1589/jpts.26.1115>
- [23] Xu, F., Li, J., Zheng, C. and Mi, L. (2026) Monitoring Neonatal Brain Function: Recent Advances in Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS). *Frontiers in Pediatrics*, **13**, Article ID: 1689905. <https://doi.org/10.3389/fped.2025.1689905>
- [24] Pinti, P., Tachtsidis, I., Hamilton, A., Hirsch, J., Aichelburg, C., Gilbert, S., *et al.* (2020) The Present and Future Use of Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) for Cognitive Neuroscience. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1464**, 5-29. <https://doi.org/10.1111/nyas.13948>
- [25] Snyder, D.B., Beardsley, S.A., Hyngstrom, A.S. and Schmit, B.D. (2023) Cortical Effects of Wrist Tendon Vibration during an Arm Tracking Task in Chronic Stroke Survivors: An EEG Study. *PLOS ONE*, **18**, e0266586. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266586>
- [26] Shen, X., Yu, Y., Xiao, H., Ji, L. and Wu, J. (2023) Cortical Activity Associated with Focal Muscle Vibration Applied Directly to the Affected Forearm Flexor Muscle in Post-Stroke Patients: An fNIRS Study. *Frontiers in Neuroscience*, **17**, Article ID: 1281160. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1281160>
- [27] Li, W., Luo, F., Xu, Q., Liu, A., Mo, L., Li, C., *et al.* (2022) Brain Oscillatory Activity Correlates with the Relief of Post-Stroke Spasticity Following Focal Vibration. *Journal of Integrative Neuroscience*, **21**, Article No. 96. <https://doi.org/10.31083/j.jin2103096>
- [28] Wang, L., Wang, S., Zhang, S., Dou, Z. and Guo, T. (2023) Effectiveness and Electrophysiological Mechanisms of Focal Vibration on Upper Limb Motor Dysfunction in Patients with Subacute Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Brain Research*, **1809**, Article 148353. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2023.148353>
- [29] Chen, L., Meng, F., Huo, C., Shao, G., Pan, G., Zhang, X., *et al.* (2025) Effects of Tactile Feedback in Post-Stroke Hand Rehabilitation on Functional Connectivity and Cortical Activation: An fNIRS Study. *Biomedical Optics Express*, **16**, Article 643. <https://doi.org/10.1364/boe.541820>
- [30] Yu, P., Dong, R., Wang, X., Tang, Y., Liu, Y., Wang, C., *et al.* (2024) Neuroimaging of Motor Recovery after Ischemic Stroke—Functional Reorganization of Motor Network. *NeuroImage: Clinical*, **43**, Article 103636. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2024.103636>
- [31] Suputtitida, P., Costa, V. and Fregni, F. (2025) The Role of the Contralesional Primary Motor Cortex in Upper Limb Recovery after Stroke: A Scoping Review Following Prisma-SCR Guidelines. *BMC Neuroscience*, **26**, Article No. 31. <https://doi.org/10.1186/s12868-025-00950-y>
- [32] Xu, S., Zhu, S., Li, M., Zhang, T., Wang, Q., Sui, Y., *et al.* (2025) Altered Cortical Activation Patterns in Post-Stroke Patients during Walking with Two-Channel Functional Electrical Stimulation: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Observational Study. *Frontiers in Neurology*, **15**, Article ID: 1449667. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1449667>
- [33] Huang, Y., Zhan, X., Zeng, H., Li, S., Shi, J., Cui, Z., *et al.* (2026) A Systematic Review of Functional Near-Infrared Spectroscopy-Based Task Paradigms in Stroke Rehabilitation. *Frontiers in Human Neuroscience*, **19**, Article ID: 1633142. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1633142>