·专栏·

基于 fNIRS 探索代偿模型的不同靶区刺激对严重脑卒中后上肢功能障碍患者的影响

杨雅雯[1,2] 乔勇军[2] 潘文秀[1,2] 赵丹[1,2] 谢青[1,2*]

（1.上海市瑞金康复医院康复医学科，上海 200023；2.上海交通大学医学院附属瑞金医院康复医学科，上海 200025）

【摘要】 目的 探索基于代偿模型理论的健侧初级运动皮层（contralesional primary motor cortex, cM1）或健侧背外侧前运动皮层（contralesional dorsal premotor cortex, cPMd）高频重复经颅磁刺激（repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS）治疗方案对严重脑卒中患者上肢运动功能的影响及其机制，通过近红外脑功能成像（functional near infrared spectroscopy, fNIRS）技术分析脑网络重塑特征。**方法** 本研究招募病程 3 ~ 12 月首次脑卒中患者 23 例，进行随机单盲对照实验。受试者随机分为 cM1 组、cPMd 组和对照组（假刺激组）。cM1 组刺激参数为 5 Hz，cM1，100%RMT，1 000 脉冲/次。cPMd 组刺激参数为 5 Hz，cPMd，100%RMT，1 000 脉冲/次。治疗时间均为每天 1 次，每周 5 天，共 2 周。受试者在干预前后进行 Fugl–Meyer 上肢功能评定（Fugl–Meyer assessment–upper extremity, FMA–UE）和静息态 fNIRS 检测。fNIRS 感兴趣脑区（region of interest, ROI）定位在左右两侧的 BA4 与 BA6，静息态 fNIRS 关注于各 ROI 之间的功能连接（functional connection, FC）变化。**结果** 3 组患者的 FMA–UE 评分在基线水平差异无统计学意义（$P>0.05$）。干预 2 周后的结果显示，与干预前相比，cM1 组、cPMd 组的 FMA–UE 评分显著提高（$P<0.05$）；组间对照结果显示，与对照组相比，cM1 组干预前后 FMA–UE 评分变化值差异具有统计学意义（$P=0.007$）。静息态 fNIRS 结果显示，cM1 组的左侧 BA4 与右侧 BA4 之间（LBA4–RBA4）的 FC 显著大于 cPMd 组（$P=0.046$），对照组的左侧 BA4 与右侧 BA4 之间（LBA4–RBA4）的 FC 显著大于 cPMd 组（$P=0.011$）。除此之外，并未发现其他显著差异。**结论** 基于代偿模型理论的 cM1、cPMd 靶区刺激均可改善严重脑卒中后上肢运动障碍患者的上肢运动功能，具有临床可行性及安全性。靶向 cM1 区的高频 rTMS 治疗方案通过增强半球间运动皮层的功能连接，显著改善严重脑卒中患者上肢运动功能，同时，cM1 较 cPMd 在促进严重脑卒中上肢运动功能障碍患者的功能恢复上更具优势。

【关键词】 重复经颅磁刺激；脑卒中；上肢运动功能；代偿模型；近红外脑功能成像技术

【中图分类号】 R743.3; R493 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202505005

Investigating the effects of stimulating different target regions within the compensation model on upper limb dysfunction in patients with severe stroke using fNIRS

Yang Yawen[1,2], Qiao Yongjun[2], Pan Wenxiu[1,2], Zhao Dan[1,2], Xie Qing[1,2]*

(*1.Department of Rehabilitation and Medicine, Shanghai Ruijin Rehabilitation Hospital, Shanghai 200023,China; 2.Department of Rehabilitation and Medicine, Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China*)

【Abstract】 Objective To explore the effects and mechanisms of high–frequency repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) targeting the contralesional primary motor cortex (cM1) or the contralesional dorsal premotor cortex (cPMd) on upper limb motor function in patients with severe stroke, based on the compensation model theory. The study utilized functional near infrared spectroscopy (fNIRS) to analyze the characteristics of brain network reorganization. **Methods** This study recruited 23 patients with first–onset stroke within a disease course of 3 ~ 12 months and conducted a randomized single–blind controlled experiment. Participants were randomly assigned to the cM1 group, cPMd group, and the control group (sham stimulation group). The cM1 group received stimulation at 5 Hz,

基金项目：上海市黄浦区卫健委青年项目（HLQ202107）

第一作者：杨雅雯，女，硕士研究生，主治医师，研究方向：神经调控

通信作者：谢青，女，硕士研究生，主任医师，研究方向：神经调控

100% resting motor threshold (rMT), with 1 000 pulses per session. The cPMd group received stimulation at 5 Hz, 100% rMT, with 1 000 pulses per session. The treatment was administered once daily, five days per week, for a total of two weeks. Participants underwent Fugl–Meyer assessment of upper extremity function (FMA–UE) and resting–state fNIRS detection before and after the intervention. The regions of interest (ROIs) for fNIRS were located in the bilateral Brodmann areas 4 (BA4) and 6 (BA6), with the resting–state fNIRS focusing on the changes in functional connectivities (FC) between these ROIs. **Results** There were no significant statistical differences in the baseline FMA–UE scores among the three groups ($P>0.05$). Compared with pre–intervention, the results after two weeks of intervention showed that the FMA–UE scores in the cM1 group and the cPMd group significantly increased ($P<0.05$). The intergroup comparison revealed that the change in FMA–UE scores in the cM1 group was significantly different from that in the control group ($P=0.007$). For the resting–state fNIRS results, the FC between the left BA4 and right BA4 (LBA4–RBA4) in the cM1 group was significantly greater than that in the cPMd group ($P=0.046$), and the FC between LBA4 and RBA4 in the control group was significantly greater than that in the cPMd group ($P=0.011$). No other significant differences were found. **Conclusion** High–frequency rTMS targeting cM1 and cPMd based on the compensation model theory can improve upper limb motor function in patients with upper limb motor dysfunction after severe stroke, with clinical feasibility and safety. The rTMS treatment targeting the cM1 area significantly enhances the interhemispheric functional connectivity of the motor cortex, thereby improving upper limb motor function in patients with severe stroke. Moreover, cM1 appears to be more advantageous than cPMd in promoting functional recovery in patients with upper limb motor dysfunction after severe stroke.

【Key words】 Repetitive transcranial magnetic stimulation; Stroke; Upper limb motor function; Compensation model; Functional near–infrared spectroscopy

运动功能障碍是卒中后最常见的功能障碍，约80%的卒中患者存在运动功能障碍，它也是恢复独立生活能力的关键[1-2]。运动系统由皮质和皮质下区域的复杂网络组成[3]，其中神经元群体通过兴奋和抑制机制相互作用。脑卒中引起的结构性病变可能严重影响运动网络内兴奋性和抑制性作用的复杂平衡，卒中后脑区间的功能连接（functional connection, FC）也发生相应变化[4-5]。现有研究表明，神经可塑性及其诱导的功能重组是脑卒中后功能恢复的基础[6]。

重复经颅磁刺激（repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS）可通过调节皮质兴奋性促进大脑重塑来改善运动功能，但作用机制尚未明确[7-8]。尽管基于半球间抑制模型的rTMS治疗方案能有效改善存在轻度运动障碍的卒中患者的上肢功能，但在严重受损的卒中患者中却并未产生相同水平的改善。这可能是因为患侧半球严重损伤后，同侧半球的其他脑区及健侧半球的相关脑区对运动功能恢复起到了代偿作用[9]。在损伤严重的患者中，代偿模型起到更加重要的作用。因此，提高健侧半球相关脑区的兴奋性可能为部分脑卒中患者带来新的获益。现有研究[10]发现，高频rTMS作用于健侧初级运动皮层（contralesional primary motor cortex, cM1）对严重脑卒中患者运动功能的改善优于低频rTMS或假刺激作用于cM1。高频rTMS应用于健侧大脑皮层的治疗方案为卒中后脑网络的精准调控提供了新的思路。此外，还有研究[11]发现，脑卒中患者的整体运动网络连通性降低可能由患侧的初级运动皮层（primary motor cortex, M1）、初级感觉皮层的显著变化所驱动，而辅助运动区（supplementary motor area, SMA）、前运动皮层（premotor cortex, PMC）等次级运动区的功能完整性表明其在脑卒中后对维持残余运动功能起到了关键作用。现有研究[12]表明，健侧背外侧前运动皮层（contralesional dorsal premotor cortex, cPMd）在运动的规划和协调中起到核心作用。当患侧M1受损时，背外侧前运动皮层（dorsal premotor cortex, PMd）的活动可能会增加，其可能增强与患侧残存的皮质脊髓束的连接，从而促进手部运动的输出。

近红外脑功能成像（functional near infrared spectroscopy, fNIRS）技术是一种神经影像技术，通过监测大脑皮层氧合血红蛋白（oxyhemoglobin, HbO_2）与脱氧血红蛋白含量反映大脑活动[13-15]。本研究将fNIRS与rTMS干预相结合，旨在探索：①不同靶点（cM1、cPMd）高频rTMS对严重脑卒中患者上肢运动功能的影响；②rTMS干预前后各感兴趣脑区（region of interest, ROI）之间的功能连接变化，以明确重塑特征；③功能连接变化与上肢运动

功能变化的相关性。研究结果将为rTMS的精准临床治疗方案的制定提供依据，同时推动rTMS个体化神经调控策略的发展。

1 资料与方法

1.1 研究对象及分组

参考既往小样本研究[16-17]，选取2022年10月至2024年7月在上海市瑞金康复医院康复医学科住院治疗的26例严重脑卒中患者。

纳入标准：①符合2019版《中国急性缺血性脑卒中诊治指南》的诊断标准[18]；②经头颅CT或MRI证实为首次脑梗死；③单侧发病，病程3～12个月；④年龄40～80岁；⑤Fugl-Meyer上肢功能评定量表（Fugl-Meyer assessment-upper extremity, FMA-UE）评分<33分；⑥简易智力状态检查（mini-mental state examination, MMSE）评分>20分；⑦对本研究知情同意并签署相关文件。

排除标准：①有癫痫病史或正在服用抗癫痫药物预防癫痫发作；②心、肺、肝、肾等重要脏器功能衰竭；③有严重认知及交流障碍而不能配合治疗；④戴有起搏器，颅内植入金属或有颅骨缺损、脑肿瘤等；⑤患者出现新发梗死或出血，病情恶化者。

按照随机数字表法将入组患者分为cM1组、cPMd组和对照组（假刺激组），入组病例数分别为9例、8例、9例，其中对照组中3例患者因不可抗力因素终止。最终3组入组病例数分别为9例、8例、6例，共23例。3组受试者在性别、损伤部位、年龄、发病时程、身高、体重等方面比较，差异均无统计学意义（$P>0.05$），见表1。本研究经医院医学伦理委员会批准（RKIRB2021-05），并在中国临床试验注册中心完成注册（ChiCTR2200055146）。

表1 3组患者的一般临床资料比较

组别	例数	性别（例）		损伤部位（例）		年龄（岁，$\bar{x}\pm s$）	病程（天，$\bar{x}\pm s$）	身高（cm，$\bar{x}\pm s$）	体重（kg，$\bar{x}\pm s$）
		男	女	左侧	右侧				
cM1组	9	7	2	4	5	65.89 ± 9.24	145.33 ± 55.83	170.56 ± 8.22	65.44 ± 14.13
cPMd组	8	6	2	4	4	64.75 ± 7.70	165.00 ± 75.92	167.38 ± 3.96	66.59 ± 7.59
对照组	6	5	1	4	2	70.83 ± 4.45	151.17 ± 33.97	169.50 ± 7.69	67.17 ± 9.97
χ^2/F值		0.142[a]		0.736[a]		1.158[b]	0.238[b]	0.462[b]	0.047[b]
P值		0.931		0.692		0.334	0.791	0.636	0.954

注：[a]为χ^2值；[b]为F值。

1.2 治疗方法

所有受试者均接受常规的药物治疗（抗板或抗凝、营养神经、改善循环等）及常规康复治疗（物理因子治疗、运动疗法、作业治疗等）。常规康复治疗频率为每周5天，每天1次，持续2周。cM1组、cPMd组在进行常规康复治疗的基础上，应用武汉依瑞德公司的CCY-IV型TMS治疗仪，线圈直径为90 mm，8字线圈。rTMS治疗由1位专业从事经颅磁刺激技术的医生进行操作。患者取舒适仰卧位，依据EEG10/20系统，通过调整线圈位置识别并标记“热点”，即经颅磁刺激时靶肌肉能够产生最大运动诱发电位（motor evoked potential, MEP）的位置。本研究将刺激线圈轻置于健侧M1区，给予较大强度单次刺激，待记录波形、潜伏期基本稳定的MEP后，逐渐降低刺激强度，直至10次连续刺激中至少有5次能诱发出第一骨间背侧肌MEP波幅>50 μv的最小刺激强度即为该患者静息运动阈值（rest motor threshold, rMT）。3组患者取舒适仰卧位，枕垫控制头颈部无明显移位，嘱患者放松，头部勿动，健侧上肢自然放于座椅扶手上，患侧上肢自然放置于体侧。cM1组刺激参数为：5 Hz，cM1，100%RMT，1 000脉冲/次。cPMd组刺激参数为：5 Hz，cPMd，100%RMT，1 000脉冲/次。cPMd的定位为能够诱发第一骨间背侧肌运动位置的前方2.5 cm。对照组进行rTMS假刺激，线圈垂直放置。治疗时间均为每天1次，每周5天，共2周。在干预过程中，由1名专业的康复医生在旁观察，并嘱患者在治疗过程中避免头部移位。

1.3 评定方法

所有受试者均在rTMS干预前、rTMS干预2周后分别进行评估。评估均由2名经验丰富的且对分组不知情的治疗师进行。评估内容主要分为以下两个部分。

（1）上肢运动功能评定：采用FMA-UE，其包

含反射、肩、肘、腕与手指运动等33个项目，每项0～2分，得分范围为0～66分，得分越高，表明上肢运动功能越好[19]。

（2）fNIRS检测：本研究采用江苏丹阳慧创医疗设备有限公司近红外光谱脑成像设备NirScan进行信号采集。采集帽包含63个通道，由24个光源发射器和24个探测器组成。本研究主要观察双侧大脑运动皮质的激活情况及功能连接情况，结合蒙特利尔神经研究所（Montreal Neurological Institute, MNI）坐标（见表2）及Brodmann分区，选定感兴趣脑区（ROI）为双侧BA4（Brodmann area 4, M1）、BA6（Brodmann area 6, SMA、PMC）。

表2 各ROI对应通道

ROI	通道
左侧BA4	CH54、CH57
右侧BA4	CH20、CH32
左侧BA6	CH36、CH37、CH38、CH40
右侧BA6	CH31、CH33、CH46、CH47

注：ROI为感兴趣脑区。

1.4 fNIRS数据采集

fNIRS数据采集于1间独立安静的评定室中进行。患者取舒适坐位，嘱患者静坐5 min，舒缓情绪，放松肢体，再为患者配戴fNIRS头帽，后进行8 min静息态数据采集，患者取舒适坐位，闭上双眼，嘱其避免入睡，肢体放松。静息态测试分为2个阶段：第1阶段是预扫描阶段，持续10 s，要求受试者集中注意力和准备开始测试；第2阶段是主要测试阶段，要求受试者闭上眼睛休息8 min。

1.5 fNIRS数据处理与分析

静息态数据处理与分析：将NirScan的原始数据导出至Homer2，原始数据转换为可以在NIRS-KIT（2.0版本）工具包上进行数据分析的光强文件，随后fNIRS的数据分析均在NIRS-KIT上进行（Homer2与NIRS-KIT在Matlab R2013b上运行），预处理包括移除前20 s和后40 s数据以保证血氧信号稳定、去漂移（Order1）、伪影校正（TDDR法）、滤波（IIR，0.01～0.08 Hz）。接着提取各ROI在时间序列上的HbO_2浓度，使用Pearson相关系数分析各ROI之间功能连接（FC）水平。

1.6 统计学方法

本研究采用SPSS 23.0统计软件对一般临床资料及结局指标进行统计分析。一般临床资料中性别、损伤部位是分类变量，采用卡方检验分析；对于一般临床资料中的其他计量资料及结局指标（FMA-UE、FC），符合正态分布的连续变量，以均值±标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，不符合正态分布的连续变量采用中位数（第1四分位数，第3四分位数）[M（Q_1, Q_3）]形式表示。FMA-UE的统计分析，根据是否符合正态分布，采用配对样本t检验或Wilcoxon秩和检验进行组内比较，采用单因素ANOVA检验或Kruskal-Wallis检验对FMA-UE评分变化值进行组间比较。各ROI之间的FC分析采用重复测量方差分析，组内对比不同时间下FC的差异，组间对比不同组之间FC的差异，并采用LSD事后检验进行多重比较。采用Pearson相关性分析法对患者FMA-UE评分的变化值与各ROI间FC的变化值进行分析，相关程度标准如下：0<|r|<0.3为微弱相关；0.3≤|r|<0.5为低度相关；0.5≤|r|<0.8为中度相关；0.8≤|r|<1为高度相关。以P<0.05表示差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 3组患者干预前后FMA-UE评分的比较

干预前，3组患者FMA-UE评分在基线水平差异无统计学意义（P>0.05）。组内对照结果显示，干预2周后，cM1组FMA-UE评分较干预前明显增加，差异有统计学意义（P=0.004），cPMd组FMA-UE评分也较干预前明显增加，差异有统计学意义（P<0.001），假刺激组FMA-UE评分较干预前增加，但是差异无统计学意义（P=0.091）。组间对照结果显示，cM1组与cPMd组的干预前后FMA-UE评分变化值差异无统计学意义（P=0.146），cM1组与对照组的干预前后FMA-UE评分变化值差异有统计学意义（P=0.007），cPMd组与对照组的干预前后FMA-UE评分变化值差异无统计学意义（P=0.127）。见表3。

表3 3组患者FMA-UE评分的比较（分，$\bar{x} \pm s$）

组别	例数	干预前	干预后	t值	P值
cM1组	9	16.44 ± 8.37	24.67 ± 12.74[ab]	−3.953	0.004
cPMd组	8	16.63 ± 9.01	21.75 ± 10.66[c]	−7.137	0.001
对照组	6	14.00 ± 9.38	15.50 ± 10.04	−2.087	0.091

注：FMA-UE为Fugl-Meyer上肢功能评定量表；[a]cM1组与cPMd组的干预前后FMA-UE评分变化值比较，P=0.146；[b]cM1组与对照组的干预前后FMA-UE评分变化值比较，P=0.007；[c]cPMd组与对照组的干预前后FMA-UE评分变化值比较，P=0.127。

2.2 3组患者干预前后各ROI间FC的比较

本研究选取了4个ROI（见表2），各ROI之间共形成6对FC，3组患者重复测量结果显示，各FC在干预前后差异均无统计学意义（$P>0.05$）。进行组间对照时发现，3组患者仅有左侧BA4与右侧BA4之间的FC差异有统计学意义（$F=4.337$，$P=0.027$），其他ROI之间的FC差异无统计学意义（$P>0.05$）。具体如下：cM1组与cPMd组间的左侧BA4与右侧BA4之间（LBA4–RBA4）的FC差异有统计学意义（$P=0.046$），cPMd组与对照组间的LBA4–RBA4的FC差异有统计学意义（$P=0.011$），cPMd组的FC值显著小于cM1组和对照组，见表4。

表4 3组患者静息态左侧BA4与右侧BA4之间的FC比较

组别（I）	组别（J）	均值差值（I–J）	标准误	*P*值
cM1组	cPMd组	0.206	0.097	0.046*
cM1组	对照组	–0.095	0.108	0.391
cPMd组	对照组	–0.300	0.108	0.011*

注：FC为功能连接；*$P<0.05$。

2.3 患者FMA–UE评分变化值与各ROI间FC变化值的Pearson相关系数分析

Pearson相关系数分析结果显示，3组患者FMA–UE评分变化值与各ROI间FC变化值之间均未发现显著相关性（$P>0.05$），见表5，说明两者无相关性。

表5 3组患者FMA–UE评分变化值与各ROI间FC变化值的Pearson相关系数（*P*值）

组别	FC变化值					
	右BA4–右BA6	左BA4–右BA4	左BA4–右BA6	左BA4–左BA6	左BA6–右BA4	左BA6–右BA6
cM1组	0.597	0.399	0.572	0.690	0.992	0.923
cPMd组	0.244	0.796	0.693	0.283	0.151	0.484
对照组	0.238	0.622	0.261	0.939	0.529	0.389

注：FMA–UE为Fugl–Meyer上肢功能评定量表；ROI为感兴趣脑区；FC为功能连接。

3 讨论

本研究结果表明，与干预前比较，cM1组、cPMd组患者的FMA–UE评分均显著提高（$P<0.05$），表明两组干预均能改善上肢运动功能。与对照组相比，仅接受高频rTMS作用的cM1组脑卒中患者的上肢运动功能改善具有显著统计学差异。这一结果与Wang等[10]的研究结果一致，针对严重脑卒中患者，高频rTMS作用于cM1的治疗方案对运动功能的改善效果显著优于低频rTMS干预或假刺激。Sankarasubramanian等[12]分别应用1 Hz和5 Hz rTMS作用于cM1和cPMd，结果发现，在损伤严重的脑卒中患者中，cPMd作为刺激部位的干预方式可更好地改善上肢运动功能，而对于轻度损伤的脑卒中患者，刺激cM1可产生更多的改善。本研究同样发现，5 Hz rTMS作用于cPMd可显著改善严重脑卒中患者的上肢运动功能，但与对照组相比无统计学差异。我们进一步对高频rTMS作用于cM1或cPMd的疗效进行对比发现，仅cM1组干预前后FMA–UE变化值达到最小临床差异（minimal clinically important differences, MCID）阈值[20]，表明该组FMA–UE的变化具有临床意义。cPMd组患者上肢运动功能虽有改善但变化幅度较小，提示cPMd可能并非最佳刺激靶点。PMd主要参与运动计划与运动准备过程[21]，对执行功能的影响较小，这可能是其对严重脑卒中后上肢运动功能障碍患者效果有限的原因。

静息态fNIRS各ROI间FC结果显示，在干预前后3组均无显著统计学差异（$P>0.05$）。本研究在干预2周后，在干预组及对照组均未观察到各ROI间FC的显著变化，陈松美等[22]的研究中也发现进行低频rTMS干预20 d后，非受累侧PMC–M1、患侧M1–PMC及患侧M1–SMA的功能连接有差异，但差异无统计学意义（$P>0.05$）。一项基于静息态fNIRS的研究发现，FMA–UE评分与患侧背外侧前额叶相关ROI的FC之间存在相关性，患侧背外侧前额叶可能在运动相关神经可塑性中发挥重要作用[23]。本研究仅将fNIRS感兴趣脑区（ROI）定位在左右两侧的BA4与BA6，未对与运动相关的其他ROI进行分析。此外，2周的rTMS干预周期较短，可能尚未引起各ROI间FC的显著变化。干预2周后，cM1组与cPMd组、cPMd组与对照组间的左侧BA4与右侧BA4之间的FC（LBA4–RBA4）均存在显著统计学差异。此外，cPMd组FC值显著小于cM1组与对照组。我们推测，cM1组与对照组通过直接加强双侧BA4间的功能连接，促进双侧半球协同恢复，对上肢运动功能的恢复发挥积极作用。cPMd则通过弱化双侧BA4间的功能连接，强化其他神经通路，从而进一步促进严重脑卒中患者上肢运动功

能的恢复。现有研究[22]发现，5 Hz rTMS作用于cPMd治疗20 d后，健侧PMC–M1功能连接显著增加（P<0.05）、健侧M1–患侧M1的功能连接显著降低（P<0.05）。这一结果与我们前述推测一致。此外，还有研究[24]发现，病变对结构连接的破坏决定了其对功能连接的影响，且半球间结构失连可能在卒中后功能连接异常中发挥重要作用。

本研究对严重脑卒中后上肢运动功能障碍的患者进行不同靶点的干预，分析高频rTMS作用于cM1或cPMd对患侧上肢运动功能的疗效差异，并用fNIRS揭示相关的脑网络重塑机制。这对完善脑卒中偏瘫患者神经调控策略的制定提供了临床依据，为无创脑刺激治疗的个体化治疗方案的制定提供了新的思路。

综上所述，基于代偿模型理论的cM1、cPMd靶区刺激均可改善脑卒中后严重上肢运动障碍患者的运动功能，具有临床可行性及安全性，其可能与半球间的功能连接变化有关。此外，cM1较cPMd在促进脑卒中后严重上肢运动功能障碍患者功能恢复上更具优势。

但本研究尚存在一定的局限性，需在未来的研究中进一步完善以下几点：①样本量少，治疗时间短，并缺乏长期随访，在未来研究中可扩大样本量，随访长期治疗效应。② fNIRS仅能进行运动相关皮层的研究，无法对深部的运动通路信号的变化进行探索，未来可借助功能磁共振等进行深入研究。借助rTMS磁导航系统进行精准定位，同时丰富结构影像等的评估。未来，通过更深入的研究可为无创脑调控技术的精准应用提供更多的科学依据。

[参 考 文 献]

[1] Tang Z, Liu T, Han K, et al. The effects of rTMS on motor recovery after stroke: a systematic review of fMRI studies [J]. Neurol Sci, 2024, 45(3): 897–909.

[2] 陈松斌, 黎晓彤, 杨文清, 等. 间歇性 θ 爆发式刺激在脑卒中后上肢运动功能恢复中的有效性研究：一项随机对照试验 [J]. 现代仪器与医疗, 2025, 31(1): 16–21.

[3] Du J, Yao W, Li J, et al. Motor network reorganization after repetitive transcranial magnetic stimulation in early stroke patients: a resting state fMRI study [J]. Neurorehabil Neural Repair, 2022, 36(1): 61–68.

[4] Tscherpel C, Dern S, Hensel L, et al. Brain responsivity provides an individual readout for motor recovery after stroke [J]. Brain, 2020, 143(6): 1873–1888.

[5] Xia Y, Huang G, Quan X, et al. Dynamic structural and functional reorganizations following motor stroke [J]. Med Sci Monit, 2021, 27: e929092.

[6] Langhorne P, Bernhardt J, Kwakkel G. Stroke rehabilitation [J]. Lancet, 2011, 377(9778): 1693–1702.

[7] Bai Z, Zhang J, Fong K N K. Effects of transcranial magnetic stimulation in modulating cortical excitability in patients with stroke: a systematic review and meta–analysis [J]. J Neuroeng Rehabil, 2022, 19(1): 24.

[8] Ni J, Jiang W, Gong X, et al. Effect of rTMS intervention on upper limb motor function after stroke: a study based on fNIRS [J]. Front Aging Neurosci, 2023, 14: 1077218.

[9] Di Pino G, Pellegrino G, Assenza G, et al. Modulation of brain plasticity in stroke: a novel model for neurorehabilitation [J]. Nat Rev Neurol, 2014, 10(10): 597–608.

[10] Wang Q, Zhang D, Zhao Y Y, et al. Effects of high–frequency repetitive transcranial magnetic stimulation over the contralesional motor cortex on motor recovery in severe hemiplegic stroke: a randomized clinical trial [J]. Brain Stimul, 2020, 13(4): 979–986.

[11] Larivière S, Ward N S, Boudrias M H. Disrupted functional network integrity and flexibility after stroke: relation to motor impairments [J]. Neuroimage Clin, 2018, 19: 883–891.

[12] Sankarasubramanian V, Machado A G, Conforto A B, et al. Inhibition versus facilitation of contralesional motor cortices in stroke: deriving a model to tailor brain stimulation [J]. Clin Neurophysiol, 2017, 128(6): 892–902.

[13] Bu L, Qu J, Zhao L, et al. A neuroergonomic approach to assessing motor performance in stroke patients using fNIRS and behavioral data [J]. Appl Ergon, 2023, 109: 103979.

[14] 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.

[15] Lin J, Jin S, You Y, et al. EEG–fNIRS multilayer brain network analysis revealed functional neural reorganization of rTMS with motor training in stroke [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2025: 1–12.

[16] McCambridge A B, Stinear J W, Byblow W D. Revisiting interhemispheric imbalance in chronic stroke: a tDCS study [J]. Clin Neurophysiol, 2018, 129(1): 42–50.

[17] Pipatsrisawat S, Klaphajone J, Kitisak K, et al. Effects of combining two techniques of non–invasive brain stimulation in subacute stroke patients: a pilot study [J]. BMC Neurol, 2022, 22(1): 98.

[18] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国各类主要脑血管病诊断要点2019 [J]. 中华神经科杂志, 2019, 52(9): 710–715.

[19] Lundquist C B, Maribo T. The Fugl–Meyer assessment of the upper extremity: reliability, responsiveness and validity of the Danish version [J]. Disabil Rehabil, 2017, 39(9): 934–939.

[20] Page S J, Fulk G D, Boyne P. Clinically important differences for the upper–extremity Fugl–Meyer scale in people with minimal to moderate impairment due to chronic stroke [J]. Phys Ther, 2012, 92(6): 791–798.

[21] Wang C C, Wang C P, Tsai P Y, et al. Inhibitory repetitive transcranial magnetic stimulation of the contralesional premotor and primary motor cortices facilitate poststroke motor recovery [J]. Restor Neurol Neurosci, 2014, 32(6): 825–835.

[22] 陈松美, 周芷晴, 徐曙天, 等. 非受累侧半球高频经颅磁刺激改善脑卒中后中重度上肢偏瘫的作用及运动皮质重组特征分析 [J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(2): 167–173.

[23] Sui Y, Kan C, Zhu S, et al. Resting–state functional connectivity for determining outcomes in upper extremity function after stroke: a functional near–infrared spectroscopy study [J]. Front Neurol, 2022, 13: 965856.

[24] 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.