执行功能对早期亚急性脑卒中患者上肢功能恢复的影响及其脑网络连接特征

周桐桐[1]，张秀芳[1]，郭航天[1]，岑蒙蒙[1,2]

【摘要】 **目的**：探讨早期亚急性脑卒中患者执行功能对上肢功能恢复及日常生活能力的影响，并分析其潜在的静息态脑网络基础。**方法**：采用前瞻性纵向研究，纳入30例早期亚急性脑卒中患者。干预前，采用Stroop色词测验评估执行功能，采集静息态功能性近红外光谱(fNIRS)数据，并评估上肢运动功能和日常生活活动能力；在常规康复治疗6周后进行随访，再次评估上肢运动功能和日常生活活动能力。采用多元线性回归分析及中介效应模型分析执行功能、脑网络连接与上肢功能恢复的关系。**结果**：回归分析显示，基线(即干预前)执行功能(逆效率干扰值)与上肢运动功能呈显著负相关($B=-0.639$，$P=0.012$，$R^2=0.336$)；在控制基线运动功能等因素后，基线执行功能对随访期间上肢功能的恢复幅度具有显著的正向预测作用($B=-0.422$，$P=0.009$，$R^2=0.380$)。中介分析显示，跨半球前额叶-感觉运动区的功能连接在执行功能影响上肢功能恢复的过程中起中介作用(间接效应$B=-0.215$，$P=0.037$)。**结论**：执行功能是影响早期亚急性脑卒中患者上肢功能恢复的重要因素，与远期恢复程度相关。基线期跨半球前额叶-感觉运动区脑网络连接可能是其发挥作用的潜在基础。

【关键词】 脑卒中；执行功能；上肢功能恢复；功能性近红外光谱；脑网络连接

【中图分类号】 R49；R743.3 **【DOI】** 10.3870/zgkf.2026.10.002

Impact of executive function on upper limb functional recovery and its brain network characteristics in patients with early subacute stroke

Zhou Tongtong[1], *Zhang Xiufang*[1], *Guo Hangtian*[1], *Cen Mengmeng*[1,2]

1. *Xuzhou Central Hospital*, *Xuzhou Jiangsu 221000*, *China*; 2. *Xuzhou Rehabilitation Hospital*

【Abstract】 **Objective**: To investigate the impact of executive function on upper limb functional recovery and activities of daily living (ADL) in patients with early subacute stroke, and to explore its potential resting-state brain network basis. **Methods**: A prospective longitudinal study was conducted involving 30 patients with early subacute stroke. At baseline, executive function was evaluated using the Stroop Color-Word Test, resting-state functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) data were collected, and upper limb motor function alongside ADL were assessed. After a 6-week routine rehabilitation intervention, upper limb motor function and ADL were re-assessed. Multiple linear regression and mediation analyses were performed to examine the relationships among executive function, brain network connectivity, and upper limb functional recovery. **Results**: Regression analysis showed a significant negative correlation between baseline executive function (measured by the inverse efficiency score (IES) interference effect, where lower scores indicate better efficiency) and baseline upper limb motor function ($B=-0.639$, $P=0.012$, $R^2=0.336$). After controlling for baseline motor function and other covariates, baseline executive function significantly and positively predicted the extent of upper limb functional recovery during the follow-up period ($B=-0.422$, $P=0.009$, $R^2=0.380$). Furthermore, mediation analysis indicated that the interhemispheric functional connectivity between the prefrontal cortex and the sensorimotor area mediated the positive effect of executive function on upper limb recovery (indirect effect $B=-0.215$, $P=0.037$). **Conclusion**: Executive function is a crucial factor influencing upper limb recovery in patients with early subacute stroke and is associated with long-term recovery outcomes. The interhemispheric brain network connectivity between the prefrontal cortex and the sensorimotor area may serve as a potential neuroimaging basis underlying this effect.

【Key words】 stroke; executive function; upper limb recovery; functional near-infrared spectroscopy; brain network connectivity

脑卒中是导致成人残疾的主要原因之一，据统计，在脑卒中发生后6个月内，大约55%～75%的患者存在上肢运动功能障碍，严重影响日常生活能力和社会

基金项目：徐州市医学领军人才培养项目(XWRCHT20210024)；徐州市卫健委科技项目青年项目(XWKYHT20240064)
收稿日期：2026-01-26
作者单位：1.徐州市中心医院康复医学科，江苏 徐州 221000；2.徐州市康复医院康复治疗部
作者简介：周桐桐(1990-)，女，主管技师，主要从事脑卒中肢体功能康复方面的研究。
通讯作者：岑蒙蒙，1182257839@qq.com

参与度[1]。传统的上肢康复训练主要聚焦于肌力、协调性和关节活动度等外周运动系统训练[2-3]，或以感觉运动皮层为主要中枢干预靶点[4]。然而，临床上患者在接受相似剂量康复训练后其上肢功能恢复效果常存在明显差异，提示除运动系统因素外，尚有其他影响因素参与恢复过程。认知功能障碍是脑卒中后另一常见并发症，其中执行功能受损尤为突出[5]。执行功能涉及注意调配、工作记忆和抑制控制等过程[6]，不仅影响认知任务表现，也可能通过影响康复依从性、动作计划及错误修正等机制，进一步影响运动功能的恢复[7]。研究表明，脑卒中患者的运动功能与记忆、执行功能及整体认知水平相关[8]，且执行功能障碍可能与较差的远期结局有关[9]。但现有报道缺乏对其作用机制的深入研究。基于此，本研究拟观察早期亚急性脑卒中患者执行功能与上肢功能恢复及日常生活能力之间的关系并考察静息态脑功能连接在其中所发挥的作用。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取2025年8月至2026年1月徐州市康复医院及徐州市中心医院康复医学科收治的早期亚急性脑卒中患者35例。纳入标准：符合《中国各类主要脑血管病诊断要点(2019)》中脑卒中的诊断标准[10]，并经头颅计算机断层扫描(computed tomography，CT)或磁共振成像(magnetic resonance imaging，MRI)证实；参考国际卒中康复与恢复圆桌会议共识标准[11]，病程7d～3个月，处于早期亚急性期；生命体征稳定；存在上肢运动功能障碍，Fugl-Meyer上肢运动功能评定量表(Fugl-Meyer assessment of the upper extremity，FMA-UE)评分16～53分，损伤程度为中等[12]，且能够配合完成评估与训练；年龄18～80岁；意识清醒，能配合完成研究。排除标准：有严重失语、认知障碍等无法完成研究者；无法通过简易色觉筛查者；合并其他严重神经系统疾病或精神障碍者；上肢静息状态下疼痛且无法完成上肢功能评估，视觉模拟评分(visual analogue scale，VAS)≥7分者；功能性近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy，fNIRS)信号有效通道(信噪比≤2dB)数不足总通道数70%者。本研究经徐州市中心医院伦理委员会批准(XZXY-LK-20260206-013)。所有受试者在入组前均签署知情同意书。本研究样本量计算采用G*Power 3.1.9.7软件，基于多元线性回归的F检验进行估算。设检验水准$\alpha=0.05$(双侧)，检验功效$1-\beta=0.80$，预测变量个数为逆效率指标(inverse efficiency score，IES)、年龄、病程。效应量采用Cohen提出的f^2指标[13]，该指标反映自变量对因变量方差解释比例的大小，本研究参考Park等[9]关于执行功能预测脑卒中功能恢复的研究结果，取$f^2=0.35$，计算得出所需最小样本量为29例，本研究共有30例完成全部基线及随访评估，分别为脑出血13例和脑梗死患者17例。由于两种类别脑卒中在病理机制和损伤模式上存在差异，故对两种类别患者的一般资料进行比较，显示差异无统计学意义，见表1。

1.2 方法 所有受试者均接受由康复治疗师实施的一对一常规康复训练，主要取坐位，根据患侧上肢功能采用被动、主动辅助或主动训练。训练内容包括：肩、肘、腕及手指各方向关节活动和肌力训练，每个动作重复8～12次，共2～3组；向不同方向伸手、前臂旋转及抓握—松开等协调与控制训练，每项重复8～10次；抓取、搬移、持杯、旋拧、折叠及模拟进食、穿衣等功能性任务训练，每项练习3～5min；无靠背坐位下进行躯干重心转移、旋转及伸手取物训练。治疗师根据患者能力给予必要的手法辅助，并通过增加活动范围、伸手距离、物体重量或操作精细度逐步提高难度，同时限制耸肩和躯干代偿。康复训练每周5次，每次40～60min，共6周。

1.3 评定标准 为保证2个中心研究实施的一致性，研究启动前统一制定康复训练方案与评估流程，并对相关治疗和评估人员进行培训。2个中心采用相同型号的fNIRS设备(BS-3000)及相同的Stroop色词测验程序，评估均由各中心固定且不参与临床治疗的评估治疗师完成。干预前，所有受试者均接受MMSE、MoCA、Stroop色词测验、FMA-UE、ARAT、MBI及

表1 脑出血与脑梗死患者一般资料比较

脑卒中类别	n	性别(例，男/女)	年龄(岁，$\bar{x}\pm s$)	病程(月，$\bar{x}\pm s$)	损伤侧(例，左/右)	FMA-UE(分，$\bar{x}\pm s$)	ARAT(分，$\bar{x}\pm s$)	MBI(分，$\bar{x}\pm s$)	MMSE(分，$\bar{x}\pm s$)	MoCA(分，$\bar{x}\pm s$)
脑出血	13	6/7	58.00±11.26	1.65±0.97	5/8	25.46±3.02	18.15±7.36	70.63±17.17	25.46±3.02	20.08±4.11
脑梗死	17	11/6	57.41±13.03	1.44±0.73	8/9	25.53±3.06	21.12±10.04	69.24±15.73	25.53±3.06	21.29±4.57
χ^2/t		—[a]	−0.130	−0.694	—[a]	0.061	1.736	0.448	0.061	0.755
P		0.460	0.898	0.493	0.721	0.952	0.093	0.658	0.952	0.457

注：ARAT：手臂动作调查测试(action research arm test)；MBI：改良Barthel指数(modified Barthel index)；MMSE：简明精神检查量表(mini-mental state examination)；MoCA：蒙特利尔认知评估量表(Montreal cognitive assessment)；[a]：Fisher精确检验

静息态 fNIRS 评估；干预 6 周后，再次进行 FMA-UE、ARAT 及 MBI 评估。

1.3.1　*认知功能*　采用 MMSE 和 MoCA 进行评估。MMSE 主要评估定向力、记忆、注意与计算、语言及视空间能力，总分 30 分，得分越高表示整体认知功能越好[14]。MoCA 用于评估轻度认知损害，对执行功能、注意力及视空间能力更为敏感，总分 30 分，得分越高表示认知功能越好[15]。

1.3.2　*执行功能*　采用 E-prime 软件编制的 Stroop 色词测验进行评估[16]。测验包含红、绿、黄 3 种颜色，一致试次占 33.3%，不一致试次占 66.7%。受试者需在 4s 内判断文字的呈现颜色，并按相应颜色键作答。正式测试前完成 5 次练习，正确率达到 60%后进入正式测试；正式测试共 20 个试次，分为 4 个板块，板块间休息 15s。系统记录正确试次的反应时和各条件准确率。考虑到单独使用反应时可能受到脑卒中患者运动迟缓的影响，而单独使用准确率不能反映反应速度，本研究采用逆效率指标(inverse efficiency score，IES)综合评价反应速度与准确性。IES＝RT÷ACC，其中 RT(reaction time)为正确试次的平均反应时，ACC(accuracy)为正确率；IES 值越大表示执行效率越低。本研究进一步计算 IES 干扰值以反映受试者在冲突信息条件下增加的执行控制负荷，IES 干扰值＝不一致条件 IES 与一致条件 IES 的差值，其中不一致条件 IES 和一致条件 IES 分别表示 Stroop 不一致条件和一致条件下受试者的 IES，用于反映冲突信息所引起的执行控制效率损失。

1.3.3　*上肢运动功能*　采用 FMA-UE 及手臂动作调查测试(action research arm test，ARAT)进行评估。FMA-UE 主要评估上肢运动控制、协调性及反射活动，总分 66 分，得分越高表示上肢运动功能越好[17]。ARAT 用于评估上肢在抓握、持物及精细操作等功能性活动中的表现，总分 57 分，得分越高表示上肢功能越好[18]。

1.3.4　*日常生活活动能力*　采用 MBI 进行评估。MBI 主要反映受试者在进食、穿衣、转移、行走等日常活动中的独立性水平，总分 100 分，得分越高表示生活自理能力越强[19]。

1.3.5　*脑网络功能连接评估*　采用 fNIRS 设备(BS-3000)进行评估。受试者在安静环境中取坐位，保持放松状态，闭眼静息，避免明显头部和躯体运动。fNIRS 信号覆盖前额叶及感觉运动相关脑区，见图 1。采集所得信号采用 Matlab R2018b 中的 NIRS_KIT 工具包进行处理[20]，经通道质量控制与预处理后，提取静息态血氧信号时间序列。基于感兴趣区(region of interest，ROI)分析方法，计算前额叶与感觉运动区之间的功能连接强度，并通过相关分析获得静息态功能连接指标，用于反映脑网络连通性特征，对通道间相关系数进行 Fisher-Z 转换以提高正态性。本研究将静息态前额叶-感觉运动区(prefrontal-sensorimotor area，PF-SM)的功能连接(functional connectivity，FC)分为以下 3 类：①受累侧 PF-SM FC，即受累侧半球内前额叶与感觉运动区之间的功能连接强度；②非受累侧 PF-SM FC，即非受累侧半球内前额叶与感觉运动区之间的功能连接强度；③跨半球 PF-SM FC，即双侧半球间前额叶与感觉运动区之间的功能连接强度。

1.4　*统计学方法*　采用 jamovi 2.6.22 统计软件进行数据分析。计量资料符合正态分布，以 $\bar{x}\pm s$ 表示，采用独立样本 t 检验或配对样本 t 检验；非正态分布者以 $M(Q_1,Q_3)$ 表示，采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料以例数表示，采用 Fisher 精确检验。所有统计检验均采用双侧检验，检验水准 $\alpha=0.05$。采用多元线性回归分析探讨执行功能指标与上肢运动功能及日常生活活动能力之间的关系。考虑到年龄和病程与脑卒中后神经可塑性和自然恢复进程密切相关，可能对执行功能与运动功能之间的关系产生混杂影响，故

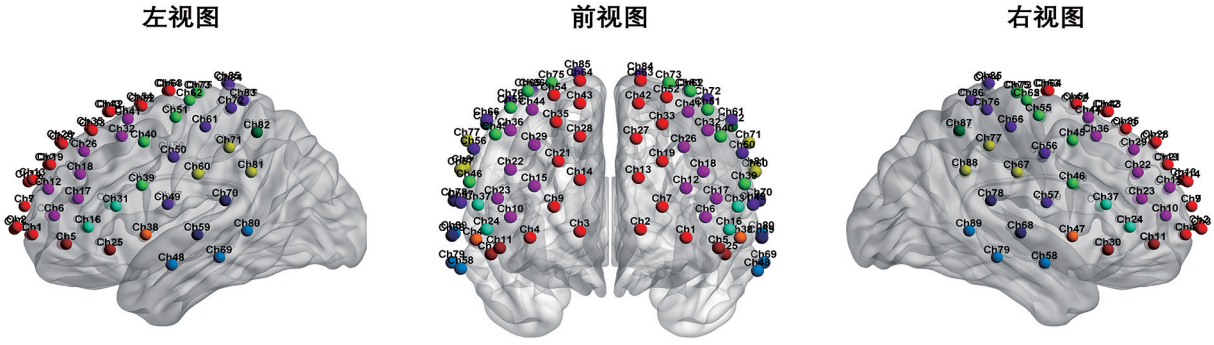

图 1　近红外通道覆盖脑区示意图

将二者作为协变量纳入模型进行控制。鉴于本研究样本量有限，为保证模型稳定性、避免过度拟合，未将性别等其他变量纳入模型。以上肢功能改善幅度为因变量，干预前 IES 干扰值为自变量，干预前 FMA-UE 评分、年龄及病程作为协变量，建立多元线性回归模型，分析干预前执行功能对干预后上肢功能恢复的预测作用。最后，参照 Baron 等[21]提出的逐步法中介分析框架，以干预前 IES 干扰值为自变量，干预后 FMA-UE 改善幅度（ΔFMA-UE）为因变量，静息态 PF-SM FC 为中介变量，纳入干预前 FMA-UE 评分、年龄及病程作为协变量，依次检验总效应（c 路径）、自变量对中介变量的效应（a 路径）、中介变量对因变量的效应（b 路径）及纳入中介变量后的直接效应（c′路径）。采用 Bootstrap 方法（重复抽样 5000 次）估计间接效应（a×b）的 95%置信区间；若 c′路径不再显著，则提示完全中介效应。对受累侧、非受累侧和跨半球 PF-SM FC 分别进行上述中介分析。

2 结果

2.1 *上肢功能及日常活动能力* 干预后，脑出血、脑梗死患者的 FMA-UE、ARAT、MBI 评分均较干预前显著提高（$P<0.01$）。脑出血与脑梗死患者的 FMA-UE、ARAT、MBI 评分在干预前后组间比较均无显著差异。见表 2。因此，在后续相关性分析中将两种类型患者合并进行。

2.2 *执行功能与干预后上肢功能的回归分析* 干预前 IES 干扰值与 FMA-UE 评分呈显著负相关（$P<0.05$），以干预前 ARAT 和 MBI 为因变量时，IES 干扰值的预测效应均无统计学意义。进一步以功能改善幅度为因变量，IES 干扰值仍是 ΔFMA-UE 的显著预测因素（$P<0.01$）；以 ΔARAT 与 ΔMBI 为因变量时，IES 干扰值的预测效应亦无统计学意义。见表 3。

2.3 *功能连接的中介作用回归分析* 干预前 IES 干扰值与跨半球 PF-SM 功能连接强度呈显著负相关（$P<0.01$）。干预前跨半球 PF-SM 功能连接与 ΔFMA-UE 具有显著的正相关（$P<0.01$）。将跨半球 PF-SM 功能连接作为中介变量纳入模型后，执行功能对 ΔFMA-UE 的直接效应不再具有统计学意义。干预前 IES 干扰值、ΔFMA-UE 与受累侧 PF-SM 功能连接强度无显著相关，b 路径亦不显著。纳入中介变量后，执行功能对 ΔFMA-UE 的直接效应仍显著（$P<0.01$），间接效应不显著。干预前 IES 干扰值与非受累侧 PF-SM 功能连接强度无显著相关，而非受累侧 PF-SM 功能连接与 ΔFMA-UE 呈正相关（$P<0.01$），b 路径显著。纳入中介变量后，执行功能的直接效应仍显著（$P<0.01$），间接效应不显著。见表 4。

3 讨论

本研究以脑卒中早期亚急性期患者为对象，系统分析执行功能与上肢功能恢复之间的关系，并探讨静息态脑功能连接的潜在作用。结果显示，早期亚急性脑卒中患者的基线执行功能不仅与同期上肢运动功能相关，还可独立预测 6 周后的上肢功能恢复。前额叶-感觉运动区静息态功能连接在二者之间发挥中介作用。上述结果提示，执行功能可能通过调节认知控制网络与感觉运动网络之间的协同活动影响上肢运动恢复。早期评估执行功能及相关脑网络特征可能有助于识别康复潜力并优化个体化干预策略。

执行功能是维持目标导向行为、调节注意分配和抑制无关反应的重要认知过程[22]。脑卒中后执行功

表 2 脑出血与脑梗死患者干预前后 FMA-UE、ARAT、MBI 评分比较 分，$\bar{x}\pm s$

脑卒中类别	n	FMA-UE				ARAT				MBI			
		干预前	干预后	t	P	干预前	干预后	t	P	干预前	干预后	t	P
脑出血	13	25.46±3.02	42.69±11.9	8.565	<0.001	18.15±7.36	27.69±12.4	5.186	<0.001	70.63±17.17	81.41±13.75	4.349	<0.001
脑梗死	17	25.53±3.06	42.53±10.39	7.841	<0.001	21.12±10.04	28.12±10.75	7.833	<0.001	69.24±15.73	82.54±12.76	5.335	<0.001
t		0.061	0.631			1.736	0.520			0.448	−0.229		
P		0.952	0.533			0.093	0.607			0.658	0.820		

表 3 干预前 IES 干扰值与干预后上肢运动功能的多元线性回归分析

预测变量	B（95% CI）	β	SE	t	P	R^2
FMA-UE（模型 1）	−0.639（−1.124，−0.153）	−0.433	0.236	−2.702	0.012	0.336
ARAT（模型 2）	−0.359（−0.964，0.245）	−0.227	0.294	−1.222	0.233	0.108
MBI（模型 3）	0.174（−0.891，1.239）	0.061	0.518	0.335	0.740	0.142
ΔFMA-UE（模型 4）	−0.422（−0.729，−0.116）	−0.508	0.149	−2.840	0.009	0.380
ΔARAT（模型 5）	−0.233（−0.622，0.156）	−0.242	0.189	−1.233	0.229	0.094
ΔMBI（模型 6）	−0.442（−0.988，0.103）	−0.254	0.265	−1.670	0.107	0.427

注：模型 1～3 以年龄、病程为协变量；模型 4～6 以基线对应量表评分、年龄、病程为协变量

表4 基线执行功能经PF-SM功能连接影响上肢功能恢复的中介效应分析

中介变量	分析路径	路径过程	B（95% CI）	β	P
跨半球PF-SM FC	c路径	IES→ΔFMA-UE	−0.422（−0.693，−0.152）	−0.508	0.002
	a路径	IES→FC	−0.033（−0.047，−0.018）	−0.629	<0.001
	b路径	FC→ΔFMA-UE	6.537（1.134，11.939）	0.414	0.018
	c'路径	IES→ΔFMA-UE	−0.239（−0.545，0.068）	−0.289	0.127
	a×b路径	IES→FC→ΔFMA-UE	−0.215（−0.417，−0.014）	−0.261	0.037
受累侧PF-SM FC	c路径	IES→ΔFMA-UE	−0.422（−0.693，−0.152）	−0.508	0.002
	a路径	IES→FC	−0.011（−0.068，0.019）	−0.156	0.386
	b路径	FC→ΔFMA-UE	1.459（−1.897，4.816）	0.124	0.394
	c'路径	IES→ΔFMA-UE	−0.427（−0.693，−0.160）	−0.519	0.002
	a×b路径	IES→FC→ΔFMA-UE	−0.016（−0.068，0.036）	−0.019	0.544
非受累侧PF-SM FC	c路径	IES→ΔFMA-UE	−0.422（−0.693，−0.152）	−0.508	0.002
	a路径	IES→FC	−0.018（−0.041，0.004）	−0.280	0.110
	b路径	FC→ΔFMA-UE	5.699（2.462，8.936）	0.452	<0.001
	c'路径	IES→ΔFMA-UE	−0.341（−0.579，−0.103）	−0.414	0.005
	a×b路径	IES→FC→ΔFMA-UE	−0.104（−0.245，0.037）	−0.127	0.147

能障碍较为常见，如果存在执行功能和注意力缺陷，患者上肢运动功能在训练后的改善幅度会受到负面影响[23]。薛炘等[24]认为，认知损害程度与脑卒中患者上肢功能障碍及康复结局存在显著关联，认知训练的介入有望改善上肢功能和日常生活独立性。以上研究从行为学层面和干预层面均支持了执行功能与上肢运动恢复的密切关系。本研究也发现，执行功能指标与上肢功能显著相关，提示执行功能可能在脑卒中后运动功能表现中发挥基础性支持作用。进一步的分析显示执行功能可预测干预6周后上肢功能恢复情况。上肢康复训练本质上是一个依赖重复练习与反馈调节的运动学习过程[7,23]。该过程高度依赖高级认知资源的分配，需要患者持续参与、理解训练目标并根据反馈不断调整动作策略。执行功能受损可能影响患者对训练任务的理解、注意维持以及错误修正能力，从而降低康复训练的有效性。相比仅关注基线运动功能水平，执行功能为解释个体间恢复差异提供了新的视角。

本研究从静息态脑网络角度探讨了执行功能影响上肢恢复的潜在特征。结果显示，仅双侧前额叶-感觉运动区跨半球功能连接在执行功能与上肢功能恢复之间起显著中介作用，而受累侧半球和非受累侧半球内部的PF-SM连接均未表现出中介效应。这一差异可能源于以下两方面：其一，跨半球的认知-运动整合网络作用，跨半球连接在协调双侧大脑的感知、认知和运动功能方面扮演关键角色[25]。当一侧半球损伤时，另一侧半球前额叶的执行功能与对侧的运动区域之间的连接可能成为促进功能恢复的重要通路。前额叶执行控制网络通常包括双侧前额叶-顶叶通路[26−27]，有研究指出，脑卒中后负责高阶认知控制的前额叶-顶叶网络完整性与患者上肢训练的效果密切相关[23,28]，意味着跨半球整合的认知-运动网络越健全，患者在运动学习和功能恢复方面可能越有优势；其二，脑卒中后的神经代偿机制，单侧脑损伤后，脑网络常通过重组实现双侧参与的代偿，非损伤半球会更多地参与控制以代偿受损半球的功能缺失[28−29]。相应地，跨半球PF-SM功能连接可能反映了非受累侧前额叶与患侧感觉运动区之间的新通路重建，其可能充当了执行功能影响患侧运动功能恢复的桥梁，这与既往神经调控相关研究的结果相吻合[30−31]。

本研究结果对脑卒中康复实践具有一定启示意义。首先，在脑卒中早期亚急性期康复评估中，除常规运动功能评定外，应关注执行功能等高级认知因素。早期识别执行功能受损的患者，有助于更准确地评估其康复潜力。其次，对于执行功能受损的患者，单纯依赖常规运动训练可能难以达到理想效果，必要时可考虑结合认知策略训练或调整康复任务结构，以提高训练依从性与学习效率。此外，静息态脑网络指标为理解个体差异提供了客观参考，未来有望作为康复分层评估的补充工具。本研究仍存在一定局限性。首先，研究的样本量较小，可能限制了统计效能及结果的外推性。本研究受试者均为具备一定认知基础且处于早期亚急性期的非重度上肢偏瘫患者。其次，研究仅设置干预前、后2个时间点，并不能完整描绘上肢功能恢复的动态轨迹；再次，本研究仅在干预前进行了单次的认知与fNIRS评估。因此，本研究所发现的跨半球功能连接本质上反映的是一种有利于康复的预测参考，由于缺乏干预前后的脑成像动态对比数据，尚不能将其直接等同于功能恢复的动态因果机制；最后，执行功能评估主要基于行为学任务，没有区分不同执行子成分的具体作用。上述问题有待在未来研究中通过扩大

样本量、增加随访时间点及结合任务态脑功能成像等方法进一步验证。

【参考文献】

[1] Nichols-Larsen D S, Clark P C, Zeringue A, et al. Factors influencing stroke survivors' quality of life during subacute recovery[J]. Stroke, 2005, 36(7): 1480-1484.

[2] Winstein C J, Stein J, Arena R, et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery[J]. Stroke, 2016, 47(6): e98-e169.

[3] Facciorusso S, Guanziroli E, Brambilla C, et al. Muscle synergies in upper limb stroke rehabilitation: a scoping review[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2024, 60(5): 767-792.

[4] Keser Z, Ikramuddin S, Shekhar S, et al. Neuromodulation for post-stroke motor recovery: a narrative review of invasive and non-invasive tools[J]. Curr Neurol Neurosci Rep, 2023, 23(12): 893-906.

[5] Cramer S C, Richards L G, Bernhardt J, et al. Cognitive deficits after stroke[J]. Stroke, 2023, 54(1): 5-9.

[6] Friedman N P, Miyake A. Unity and diversity of executive functions: individual differences as a window on cognitive structure[J]. Cortex, 2017, 86: 186-204.

[7] Rajda C M, DeSbrais K, Levin M F. Relationships between cognitive impairments and motor learning after stroke: a scoping review[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2025, 39(2): 142-156.

[8] Einstand M S, Saltvedt I, Lydersen S, et al. Associations between post-stroke motor and cognitive function: a cross-sectional study[J]. BMC Geriatr, 2021, 21(1): 103.

[9] Park Y H, Jang J W, Park S Y, et al. Executive function as a strong predictor of recovery from disability in patients with acute stroke: a preliminary study[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2015, 24(3): 554-561.

[10] 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.

[11] Bernhardt J, Hayward K S, Kwakkel G, et al. Agreed definitions and a shared vision for new standards in stroke recovery research: the Stroke Recovery and Rehabilitation Roundtable taskforce[J]. Int J Stroke, 2017, 12(5): 444-450.

[12] Woytowicz E J, Rietschel J C, Goodman R N, et al. Determining levels of upper extremity movement impairment by applying a cluster analysis to the Fugl-Meyer Assessment of the Upper Extremity in chronic stroke[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2017, 98(3): 456-462.

[13] Selya A S, Rose J S, Dierker L C, et al. A practical guide to calculating Cohen's f^2, a measure of local effect size, from PROC MIXED[J]. Front Psychol, 2012, 3: 111.

[14] Tombaugh T N, McIntyre N J. The mini-mental state examination: a comprehensive review[J]. J Am Geriatr Soc, 1992, 40(9): 922-935.

[15] Carson N, Leach L, Murphy K J. A re-examination of Montreal cognitive assessment cutoff scores[J]. Int J Geriatr Psychiatry, 2018, 33(2): 379-388.

[16] Scarpina F, Tagini S. The stroop color and word test[J]. Front Psychol, 2017, 8: 557.

[17] Gladstone D J, Danells C J, Black S E. The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke: a critical review of its measurement properties[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2002, 16(3): 232-240.

[18] Chen H F, Lin K C, Wu C Y, et al. Rasch validation and predictive validity of the Action Research Arm Test in patients receiving stroke rehabilitation[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2012, 93(6): 1039-1045.

[19] Shah S, Vanclay F, Cooper B. Improving the sensitivity of the Barthel Index for stroke rehabilitation[J]. J Clin Epidemiol, 1989, 42(8): 703-709.

[20] Hou X, Zhang Z, Zhao C, et al. NIRS-KIT: a MATLAB toolbox for both resting-state and task fNIRS data analysis[J]. Neurophotonics, 2021, 8(1): 010802.

[21] Baron R M, Kenny D A. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: conceptual, strategic, and statistical considerations[J]. J Pers Soc Psychol, 1986, 51(6): 1173-1182.

[22] Diamond A. Executive functions[J]. Annu Rev Psychol, 2013, 64: 135-168.

[23] VanGilder J L, Hooyman A, Peterson D S, et al. Post-stroke cognitive impairments and responsiveness to motor rehabilitation: a review[J]. Curr Phys Med Rehabil Rep, 2020, 8(4): 461-468.

[24] 薛炘, 张丽, 金雪明, 等. 脑卒中患者上肢功能恢复与认知训练的关系[J]. 神经损伤与功能重建, 2020, 15(4): 210-212.

[25] Ocklenburg S, Guo Z V. Cross-hemispheric communication: insights on lateralized brain functions[J]. Neuron, 2024, 112(8): 1222-1234.

[26] Chen A C, Oathes D J, Chang C, et al. Causal interactions between fronto-parietal central executive and default-mode networks in humans[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2013, 110(49): 19944-19949.

[27] 李诗怡, 王梦寰, 王乙休, 等. 经皮耳迷走神经刺激促进卒中患者上肢功能恢复的脑网络机制的研究[J]. 中国康复, 2025, 40(4): 195-201.

[28] 谢敏, 王梦寰, 耿宝峰, 等. 经皮耳迷走神经电刺激联合作业治疗对脑卒中上肢功能的疗效[J]. 中国康复, 2024, 39(11): 649-654.

[29] 吴何必, 陈树耿, 贾杰. 脑机接口技术在脑卒中患者上肢运动功能康复领域的脑机制研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2025, 42(3): 480-487.

[30] Li S Y, Xu K, Wang Y X, et al. Task-specific cortical mechanisms of taVNS-paired task-oriented training for post-stroke upper extremity dysfunction under cognitive load: an fNIRS study[J]. Front Hum Neurosci, 2025, 19: 165261.

[31] Wang M H, Wang Y X, Xie M, et al. Transcutaneous auricular vagus nerve stimulation with task-oriented training improves upper extremity function in patients with subacute stroke: a randomized clinical trial[J]. Front Neurosci, 2024, 18: 1346634.