

双侧上肢不同强度抗阻训练下的皮层血氧响应变化

洪思宇

利川市民族中医院 湖北 利川 445400

【摘要】：本研究通过功能性近红外光谱技术（Functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS）探究了不同力量强度（低强度、高强度）及变化模式（渐进强度）的双侧上肢抗阻训练下的皮层激活响应和功能网络变化。10名健康成年人参与了为期3天的不同模式的抗阻任务，在训练期间测量了静息态和不同模式下大脑双侧运动皮层（Motor cortex, MC）和双侧额前叶皮层（Prefrontal cortex, PFC）的含氧血红蛋白浓度信号（Oxygenated Hemoglobin Concentration, HbO）。本研究的结论有望为人-机交互运动训练下康复治疗方案的闭环调整提供力量强度因素变化的依据。

【关键词】：功能性近红外光谱技术；抗阻训练；训练强度；皮层激活响应；脑网络

DOI:10.12417/2705-098X.26.07.028

1 引言

运动功能对人类生产生活不可或缺，运动功能障碍患者因部分或全部运动能力的丧失，日常活动造成严重困扰，特别是上肢运动功能障碍问题，日常生活中的身体运动包括精细运动和粗大运动都离不开上肢的控制。研究发现运动康复训练能够促进患肢的运动功能恢复，其中抗阻训练是指身体克服阻力以达到肌肉增长，以及力量增加的过程^[1]，其能够有效改善由脑卒中、脑损伤以及其他神经系统疾病导致的运动功能障碍^[2]。抗阻训练的疗效受到多方面因素的影响，包括训练频率、训练模式、训练强度等，其中训练强度是其核心要素^[2]，上肢的训练强度评估一般通过任务力量分级来实现。

2 材料和方法

2.1 参与者

本研究共招募 10 名健康成年人（6 男，4 女，平均年龄 22.15±0.80 岁，平均身高为 168±5.23 cm，平均体重为 66.20±6.82 kg，BMI 指数为 22.04±1.68 kg/m²）。实验前，每位参与者都签署了知情同意书，并提前熟悉实验操作和程序。本研究的纳入标准为：i) 身体健康，无精神疾病史、神经系统疾病史、运动系统等疾病；ii) 通过爱丁堡优势手调查表确认为右利手；iii) 在实验前 1 月内没有进行高强度运动。排除标准包括任何先前的手部或手臂肌肉骨骼损伤、精神病史、重大头外伤手术史、专项运动经历。10 名被试者均符合纳入和排除标准，并被纳入实验。

2.2 实验设计与 fNIRS 数据采集

在本研究中，所有被试者均接受相同的训练任务，所采用的训练设备为常州市钱璟康复股份有限公司生产的一款上下肢康复训练器（型号：AP-ZXQ-10，转动阻力调节范围：0~20，转动速度调节范围：1~60r/min）。下图 1 为实验任务设计流程。

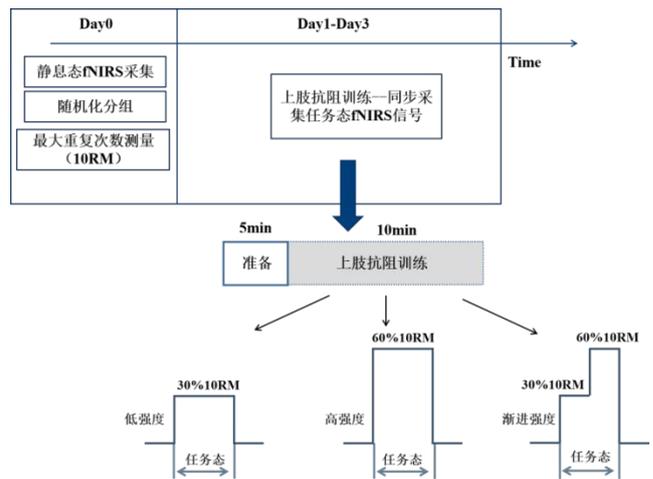


图 1 双侧上肢抗阻训练实验任务设计

静息态和任务态下的 fNIRS 信号是利用波长为 760 和 850 nm 的连续波 fNIRS 系统采集得到（中国江苏丹阳慧创医疗设备公司），采样频率设置为 11Hz。根据国际 10-20 系统标准，Cz 点的位置被用作参考点。我们主要关注以下感兴趣区域（ROIs）：左右侧 MC（Left Motor cortex, LMC; Right Motor cortex, RMC）和 PFC（Left Prefrontal cortex, LPFC; Right Prefrontal cortex, RPFC）。下图 2 显示了 fNIRS 通道的排布。圆圈包围的区域是我们的感兴趣区域（ROIs）。

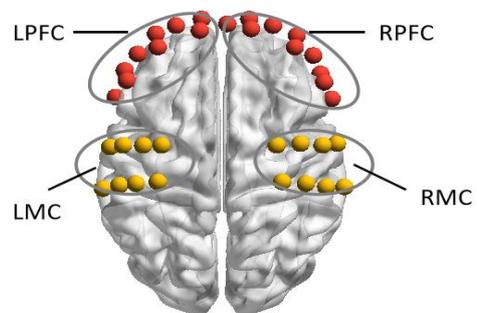


图 2 可视化的空间 ROI 图

2.3 数据处理与分析

2.3.1 皮层激活响应

连续小波变换 (Continuous wavelet transform, CWT) 实现了对信号从时域到时频域的复杂变换, 适合对低频神经振荡信号进行分析^[3]。本研究采用 CWT 分析方法对预处理后的 HbO 信号进行分析, 通过计算小波幅值 (Wavelet Amplitude, WA) 来反映不同实验条件下的皮层激活响应。根据 fNIRS 通道分布, 将同一脑区内各通道的 WA 平均得到脑区激活度, 以反映不同实验条件下各脑区的激活水平。

2.3.2 EC 分析和网络构建

有效连接 (Effective connectivity, EC) 能够解释大脑区域之间相互作用的因果关系^[4]。本研究将 CWT 下的动态相位信息与动态贝叶斯推理 (Dynamic bayesian inference, DBI) 相结合构成了一种 EC 分析方法^[5]。通过 EC 分析方法, 我们为每个被试者的每种实验条件构建了一个 EC 网络, 该网络由 LMC、RMC、LPFC 以及 RPFC 4 个脑区构成, 我们使用耦合强度 (Coupling Strength, CS) 来表征皮层区域之间相互作用的方向和强度。

2.4 统计学分析

采用 K-S 检验进行数据的正态性评估, 所有变量均服从正态分布。因此, 所有数据都被允许用于参数统计分析。单因素重复测量方差分析用于比较被试者在不同训练任务间是否存在显著性差异, 然后利用配对 t 检验进行不同训练任务之间的两两比较, 显著水平设为 $P < 0.05$, 并对统计分析做了 FDR 多重比较校正^[6]。

3 结果

3.1 不同强度对皮层激活响应的影响

图 3 显示了被试在静息态和不同强度下抗阻训练的大脑皮层激活图。从图中可以直观地观察到, 被试在静息态、低强度和高强度下, 双侧 MC 和 PFC 的对称激活 (如图 4.1a-c), 两侧半球的激活水平和激活范围相当。随着训练强度的逐渐增大, 被试在 MC 和 PFC 的激活水平不断增加。特别在高强度和渐进强度下, MC 和 PFC 的激活水平相较于静息态和低强度有了明显的提升。

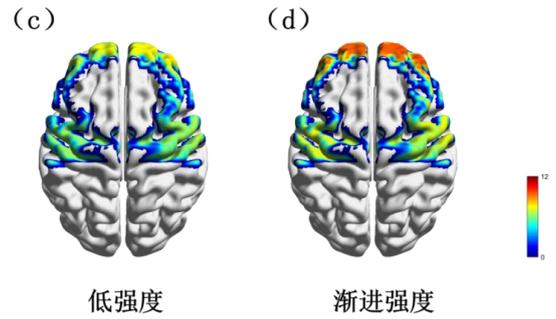
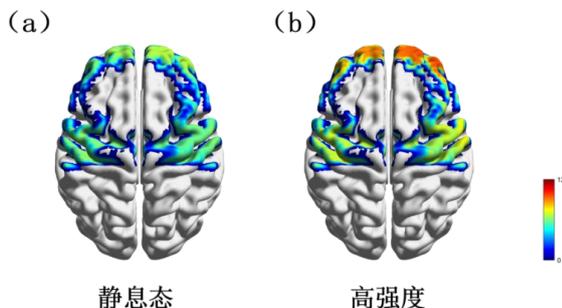


图 3 静息态和不同力量强度 (低强度、高强度、渐进强度) 下大脑皮层激活图, a~d 分别为静息态、低强度、高强度和渐进强度。

3.2 不同强度对有效连接网络的影响

图 4 展示为被试在静息态和不同强度 (低强度、高强度、渐进强度) 下的耦合强度 (CS) 变化情况。统计分析结果表明, 双侧 MC 间、LMC 到 LPFC、RMC 到 RPFC 以及 LPFC 和 RMC 间的 CS 值在静息态和不同强度下存在显著差异 (LMC → RMC:F=3.359, $P < 0.05$; RMC → LMC:F=3.561, $P < 0.05$; LMC → LPFC:F=3.797, $P < 0.05$; RMC → RPFC:F=3.102, $P < 0.05$; LPFC → RMC:F=2.957, $P < 0.05$; RMC → LPFC:F=2.957, $P < 0.05$)。

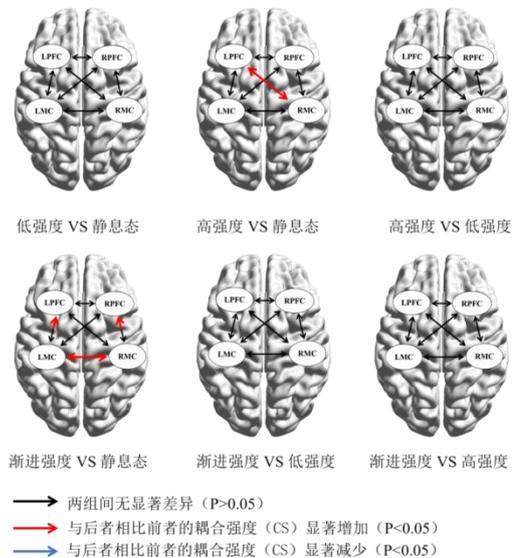


图 4 静息态和不同强度 (低强度、高强度、渐进强度) 下的耦合强度 (CS) 变化情况。

4 讨论

与低强度相比, 高强度任务需要克服更大的恒定阻力负荷, 而渐进强度任务在运动过程中涉及到阻力负荷的动态变化, 任务难度均相对更高, 因此需要更多与协调运动的计划和体感引导相关的皮层参与激活。研究发现, 在上肢任务执行过程中, MC 参与了肌肉输出的调节, PFC 与注意力水平、认知、控制、较高的力量输出相关^[7]。本研究要求患者在坐立姿势下完成基于上下肢康复训练器的双侧上肢转动训练, 运动过程中

需要考验患者的躯干稳定性、平衡控制能力以及肌肉收缩和力量输出强度,相较于低强度下的恒定力量任务,被试者在高强度和渐进强度下需要显著激活双侧 PFC,以维持匀速循环旋转运动的状态。

基于 EC 分析方法的结果表明,渐进强度任务模式通过在双侧 MC 间以及半球内 MC 和 PFC 间建立代偿通路,以增强半球内以及半球间脑区间的相互作用,进而维持一定的运动表现,高强度下的恒定力量任务能够增强 LPFC 和 RMC 在运动过程中的双向 CS 值,提示了半球间相互驱动作用的增强。多项研究表明,大脑半球间的交流有助于卒中后的运动康复,尤其是双侧 MC 间增强的连接^[8]。这与本研究在渐进强度任务模式下观察到的半球间双侧 MC 相互调节作用增强具有一致性。还有研究发现,在肢体受损程度较轻且患侧半球功能保留程度较高的情况下,支持恢复的网络重组应该优先考虑在患侧

半球内进行^[9]。针对亚急性期卒中患者的 fNIRS 研究也表明,患侧 PFC 和 MC 间的功能连接强度与上肢运动功能评分存在显著的正相关性。本研究中的研究对象为健康人,不同于卒中后大脑半球间存在的功能失衡状态,渐进强度下主要表现为双侧半球内 MC 和 PFC 间代偿通路的建立。

5 结论

我们的研究结果表明:高强度和渐进强度下,被试的双侧 MC 和 PFC 均显著激活,而两者的皮层网络连接模式存在不同。高强度下的恒定力量任务促使半球间 PFC 和 MC 间代偿性连接的建立,而渐进强度任务显著增强半球内 MC 和 PFC 间,以及双侧 MC 间的相互调节作用。本研究加深了双侧上肢抗阻训练相关神经过程的理解,并有望为基于脑功能参数反馈技术的人-机交互运动训练下康复治疗方案的调整提供力量强度因素变化的依据,以进一步提高康复效率。

参考文献:

- [1] 黄涛.早期分离与抗阻运动训练对脑卒中膝过伸和偏瘫步态的防治作用[J].医药界,2020(3):1.
- [2] Kim Y,Byronmehta,Tapanthirumalai,Mohanrajpadalabalanarayanan,Sangeetharimmer,James H.Motl,Robert W.Exercise Training Guidelines for Multiple Sclerosis,Stroke,and Parkinson Disease Rapid Review and Synthesis[J].American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation,2019,98(7).
- [3] Huo C,Xu G,Sun A,et al.Cortical response induced by task-oriented training of the upper limb in subacute stroke patients as assessed by functional near-infrared spectroscopy[J].Journal of Biophotonics,2022.
- [4] Ticcinelli V,Stankovski T,Iatsenko D,et al.Coherence and Coupling Functions Reveal Microvascular Impairment in Treated Hypertension[J].Frontiers in Physiology,2017,8.
- [5] Lancaster G,Iatsenko D,Pidde A,et al.Surrogate data for hypothesis testing of physical systems[J].Physics Reports-Review Section of Physics Letters,2018,748:1-60.
- [6] Chumbley J,Worsley K,Flandin G,et al.Topological FDR for neuroimaging[J].Neuroimage,2010,49(4):3057-3064.
- [7] Assad M,Galperin I,Giladi N,et al.Disease severity and prefrontal cortex activation during obstacle negotiation among patients with Parkinson's disease:Is it all as expected?[J].Parkinsonism&related disorders,2022,101:20-26.
- [8] Carter A R,Astafiev S V,Lang C E,et al.Resting Interhemispheric Functional Magnetic Resonance Imaging Connectivity Predicts Performance after Stroke[J].Annals of Neurology,2010,67(3):365-375.
- [9] Mcdonnell M N,Stinear C M.TMS measures of motor cortex function after stroke:A meta-analysis[J].Brain Stimulation,2017,10(4):721.