

近红外脑功能成像技术在作业治疗领域的应用

方蕊^{1,2} 杜惠蓉² 黄富表^{1,2}

1、中国康复研究中心 作业疗法科 北京市丰台区角门北路10号

2、首都医科大学 康复医学院 北京市丰台区右安门外西头条10号

通讯作者：黄富表 邮箱：huangfubiao123@126.com

一、近红外脑功能成像技术简介

近红外脑功能成像 (Functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) 是一种非侵入式的功能性成像技术。当执行特定任务时，与任务相关的神经元开始工作，神经元所在脑组织局部代谢活动增加。由于神经元所需能量几乎全部由葡萄糖的有氧代谢实时供给，代谢活动会引起局部组织血液中 HbO₂ 浓度降低，HbR 浓度增高。这些血氧浓度的变化会引发局部血管扩张，脑血流及脑血容量增加，使脑血流增加所提供的氧量远远大于神经元活动的实际耗氧量，最终导致局部组织 HbO₂ 浓度增高。换句话说，我们可以通过脑组织局部的血氧浓度变化间接的反映神经活动。fNIRS 检测基于神经血管耦合机制的生理学原理，和局部血氧浓度变化带来的脑组织光学属性改变的物理学原理，后者利用修正的比尔-朗伯定律建立近红外光衰减量与血氧浓度变化之间的关系。

fNIRS 设备的核心部件包括主机、光纤（连接光极）、光纤帽、模拟台、电源和数据传输电缆等。光源发出的近红外光子经光纤传播至头皮表面的发射极，在穿过脑组织时发生散射，其中大部分光子会被脑组织吸收，小部分会从发射极周围的头皮表面穿出被接收极检测。被检测的这部分光子由发射极射入头皮，在脑组织内经香蕉形路径传播到达大脑皮层表面区域，经过光路上的脑组织吸收衰减后射出头皮返回接收极。因此，通过检测到的光强衰减的相对变化量，我们可计算得出发射极和接收极之间“通道”上的血红蛋白浓度的相对变化量，进而反映出该区域的大脑激活情况。

二、fNIRS 技术应用于作业治疗领域的优势和劣势

作业治疗是康复医学的重要组成部分。相比于物理治疗侧重于提高身体各部的运动功能，改善关节活动度、肌力、运动控制障碍等，作业治疗更关注患者完成活动的



能力。作业治疗的目标是提高患者的日常生活活动能力，最终帮助其回归家庭和社会。因此，评估患者完成特定活动时的表现很重要。这些活动往往在治疗室内模拟真实的活动场景，患者需要在坐位或立位下，控制肢体的各个部位产生功能性动作，并注意手眼协调和双侧肢体间的配合，按照既定步骤完成活动。传统脑成像技术如功能性核磁共振成像（Functional magnetic resonance imaging, fMRI），需要受试者卧于磁共振腔体内，并严格限制头动，无法满足言语或运动状态下的脑功能评定。fNIRS技术最明显的优势是极高的生态效度，即允许患者在接近自然情境下进行测试，且对头动和肢体活动的容忍度高，可用于户外活动、运动训练、社会交互等多种场景下的脑功能检测。相较于严格限制受试者的体位、身体活动和测试环境，fNIRS技术的测试结果能更加真实的反映任务过程中的大脑激活情况，这与作业治疗的关注点一致。另一方面，一些特殊受试群体如儿童、精神疾病患者可能无法保持静止、对设备的不适容忍度较低，幽闭恐惧症患者无法在封闭狭小的环境下接受测试。fNIRS技术的检测装置佩戴较为舒适，且易于接受，更适用于这些群体。此外，fNIRS是基于光学原理的脑成像技术，具有抗电磁干扰强的特性。fNIRS不仅能和其他成像设备（fMRI、Electroencephalogram, EEG）无干扰地同步扫描，也可与神经调控技术（经颅磁刺激、经颅电刺激等）联用，以即时评估干预效果。

fNIRS技术存在几点局限性。首先，fNIRS技术只能观测大脑皮层表面区域，不能探测到深部沟回和核团。其次，fNIRS设备本身不能提供测量脑区的解剖位置信息，需要采用国际10-20参考系统或三维定位仪辅助定位，估计感兴趣区域在颅外的大致位置。

三、fNIRS技术在作业治疗领域的临床应用和意义

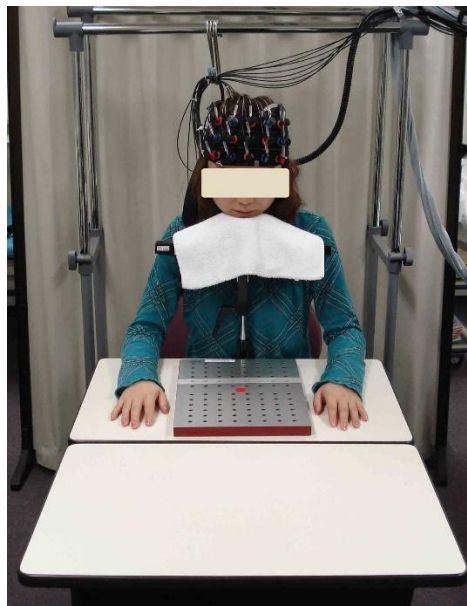
（一）应用对象

- （1）在脑卒中康复领域的临床应用
- （2）在精神疾病领域的临床应用
- （3）在儿童康复领域的临床应用

（二）应用意义

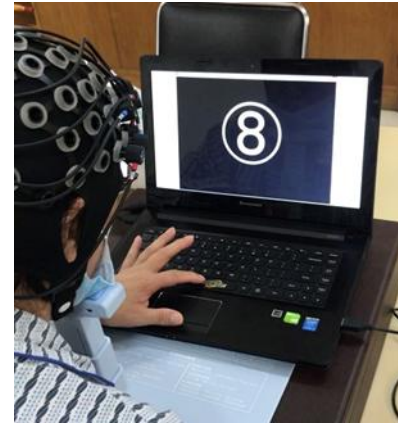
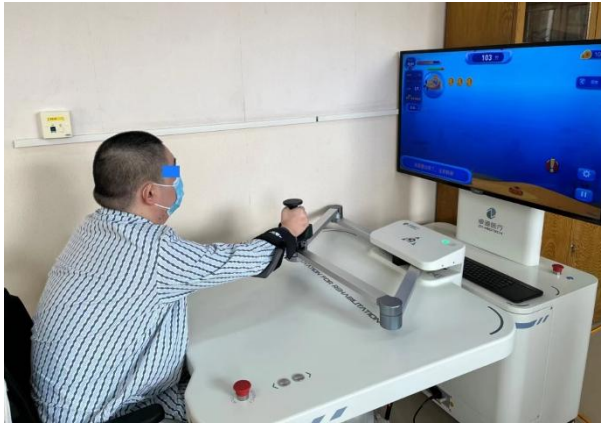
作业治疗通过有选择的作业活动和适当的环境干预来改善康复对象的躯体、心理和社会功能，促进活动和参与。作业治疗师往往根据患者所处的恢复阶段和功能水平

现况设计作业活动，这些活动不仅让肢体的各部位产生预期运动，更让患者能实际操作物品完成附加目的性的任务。根据以往的经验，脑血管意外患肢功能恢复与是否进行附加目的性活动有关。为探究不同目的性活动影响基于皮层激活的上肢功能恢复的因素，Huang 等人利用 fNIRS 检测健康人在执行附加目的的任务和单一目的的任务时前额叶的激活情况。试验中令受试者以钉板任务为基础，分别执行左、右手的附加目的的任务和单一目的的任务。在附加目的的任务中，受试者用拇指和食指捏住木钉，以每秒移动一块木钉的速度，将木钉板上的木钉从一个洞移动到另一个洞。在单一目的的任务中，受试者在没有木钉的情况下进行相同的运动。当任务组块 $O_{xy}\text{-Hb}$ 的变化量高于休息期标准差的 3 倍时，则认为通道显著激活。试验结果表明无论左右手，附加目的的任务能够引起前额叶及其周围脑区更大范围的激活。这可能是实际操作物品时，受试者需要注意木钉的位置、尺寸以及手指的适当位置，并处理手部的感觉信息，以确保木钉平稳的移动并准确的插入。此外，有目的性的完成操作物品比单纯的肢体运动更能提高活动的动机。该研究可以为作业治疗师的临床实践提供指导，应用更多的附加目的的任务来改善患者的功能和日常生活活动能力。



除常规的作业治疗外，新兴的康复治疗技术愈发受到大众关注。康复机器人、虚拟现实和增强现实技术、神经反馈技术等已广泛应用于神经系统疾病的康复评价和治疗，许多学者利用 EEG、fMRI 以及其他无创性神经成像研究其疗效及治疗机制。上肢康复机器人是通过末端执行器或外骨骼与人体上肢固连辅助患者进行康复训练，用以改善上肢肌肉力量、关节活动范围和运动控制。治疗师可根据患者的主动参与程度，从被动运动、辅助运动、主动运动、阻力运动四种训练模式中选择适合的训练模式。

使用机器人设备不仅给患者提供了独立运动的机会，还可以给予患者视听提示和运动表现的信息反馈，增加其训练的积极性。此外，上肢康复机器人增加了手臂训练的重复次数，这种强化的、频繁的、重复的治疗模式符合运动学习的原理，因此可以产生比常规康复更好的效果。有研究利用 fNIRS 评估脑卒中患者在主动智能反馈、上肢悬吊和被动智能反馈机器人训练过程中相关脑区皮层的血氧浓度变化和功能连接情况，以比较上肢智能反馈机器人和其他康复方法在大脑激活方面的差别，探讨上肢智能反馈机器人训练的治疗机制。研究结果显示，与上肢悬吊训练相比，主动智能反馈机器人训练期间受试者的对侧前额叶皮质和同侧初级运动皮质表现出更高的皮质激活和皮质间更紧密的功能连接。其原因可能是智能反馈机器人通过多媒体显示屏设置游戏情境，并给予视听反馈，提高了患者的训练积极性。与被动智能反馈机器人训练相比，主动智能反馈机器人训练时的对侧前额叶皮质、同侧初级运动皮质、同侧初级躯体感觉皮质和同侧运动前和辅助运动皮质的激活更强，但功能连接无显著差异。这可能因为主动训练需要患者控制肌肉产生运动，需要大脑皮层的更多激活。而被动训练时，患肢在机械臂的牵引下被动地运动，患者接受游戏反馈并进行运动想象，这可能导致脑区间功能连接增加。该结果提示被动智能反馈机器人训练能够激活相关脑区并改善功能连接，可应用于脑卒中迟缓期患者。上肢康复机器人不仅可以帮助患者提高运动功能，还能以游戏训练的方式改善其认知功能。Li 等人用 fNIRS 评估上肢运动游戏训练治疗卒中后轻度认知障碍的疗效。运动游戏以上肢机器人辅助训练系统为载体，患者通过连接在前臂托架上的末端手柄输入运动信息与游戏交互，使运动和认知功能训练同时进行。治疗师根据患者兴趣选择认知游戏项目、训练轨迹等。在训练前后利用 fNIRS 检测在持续表现测试（continuous performance test, CPT）任务下前额叶皮质区域的氧合血红蛋白浓度变化，并计算重心值。重心值是 HbO 浓度变化达到总变化量的一半时所对应的时间，该数值越低表明大脑激活速度越快。研究发现，进行上肢运动游戏训练的观察组患者 fNIRS 重心值显著低于对照组。这表明上肢运动游戏训练可以更好地提高神经处理效率，改善卒中后轻度认知障碍。



四、总结与展望

fNIRS 作为一种无创脑功能成像技术，具有生态效率高、抗运动干扰、抗电磁干扰等优点。该技术在康复治疗领域应用广泛，目前主要用以评估治疗效果和探索治疗机制等。随着新的康复治疗理论和新兴康复治疗技术的出现，以及联合疗法在临床中的应用增加，fNIRS 技术可以在脑功能变化层面揭示治疗机制，弥补了仅依赖行为学测试的主观性缺陷。未来 fNIRS 的各类任务范式将被标准化，建立正常人和患者的测试常模，以辅助诊断或预测疗效。

参考文献

- [1] 近红外脑功能成像临床应用专家共识[J].中国老年保健医学,2021,19(02):3-9.
- [2] 中国康复医学会作业治疗专业委员会,李奎成,闫彦宁,等.《作业治疗实践框架》(2019版)及解读[J].中华物理医学与康复杂志, 2021, 43(2):177-180.
- [3] 杨澳祥,韦建军,张治,等.上肢康复机器人现状研究[J].人工智能与机器人研究, 2023, 12(4): 255-266.
- [4] Huang F, Hirano D, Shi Y, et al. Comparison of cortical activation in an upper limb added-purpose task versus a single-purpose task: a near-infrared spectroscopy study[J]. J Phys Ther Sci,2015,27(12): 3891-3894.
- [5] Li H, Fu X, Lu L, et al. 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[J]. Front Neurol, 2023, 14:1-10.
- [6] 李秀丽,李珊,冯梦晨等.采用上肢运动游戏治疗卒中后轻度认知障碍并结合功能性近红外光谱技术进行疗效评估的研究[J].中国康复,2023,38(07):412-416.