

近紅外腦功能成像技術在作業治療領域的應用

方蕊^{1,2} 杜惠蓉² 黃富表^{1,2}

1、中國康復研究中心 作業療法科 北京市豐臺區角門北路 10 號

2、首都醫科大學 康復醫學院 北京市豐臺區右安門外西頭條 10 號

通訊作者：黃富表 郵箱：huangfubiao123@126.com

一、近紅外腦功能成像技術簡介

近紅外腦功能成像 (Functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) 是一種非侵入式的功能性成像技術。當執行特定任務時，與任務相關的神經元開始工作，神經元所在腦組織局部代謝活動增加。由於神經元所需能量幾乎全部由葡萄糖的有氧代謝即時供給，代謝活動會引起局部組織血液中 HbO_2 濃度降低， HbR 濃度增高。這些血氧濃度的變化會引發局部血管擴張，腦血流及腦血容量增加，使腦血流增加所提供的氧量遠遠大於神經元活動的實際耗氧量，最終導致局部組織 HbO_2 濃度增高。換句話來說，我們可以通過腦組織局部的血氧濃度變化間接的反映神經活動。fNIRS 檢測基於神經血管耦合機制的生理學原理，和局部血氧濃度變化帶來的腦組織光學屬性改變的物理學原理，後者利用修正的比爾-朗伯定律建立近紅外光衰減量與血氧濃度變化之間的關係。

fNIRS 設備的核心部件包括主機、光纖 (連接光極)、光纖帽、模擬臺、電源和數據傳輸電纜等。光源發出的近紅外光子經光纖傳播至頭皮表面的發射極，在穿過腦組織時發生散射，其中大部分光子會被腦組織吸收，小部分會從發射極周圍的頭皮表面穿出被接收極檢測。被檢測的這部分光子由發射極射入頭皮，在腦組織內經香蕉形路徑傳播到達大腦皮層表面區域，經過光路上的腦組織吸收衰減後射出頭皮返回接收極。因此，通過檢測到的光強衰減的相對變化量，我們可計算得出發射極和接收極之間“通道”上的血紅蛋白濃度的相對變化量，進而反映出該區域的大腦啟動情況。

二、fNIRS 技術應用於作業治療領域的優勢和劣勢

作業治療是康復醫學的重要組成部分。相比於物理治療側重於提高身體各部的運動功能，改善關節活動度、肌力、運動控制障礙等，作業治療更關注患者完成活動的

能力。作業治療的目標是提高患者的日常生活活動能力，最終幫助其回歸家庭和社會。因此，評估患者完成特定活動時的表現很重要。這些活動往往在治療室內模擬真實的活動場景，患者需要在坐位或立位下，控制肢體的各個部位產生功能性動作，並注意手眼協調和雙側肢體間的配合，按照既定步驟完成活動。傳統腦成像技術如功能性核磁共振成像（Functional magnetic resonance imaging, fMRI），需要受試者臥於磁共振腔體內，並嚴格限制頭動，無法滿足言語或運動狀態下的腦功能評定。fNIRS 技術最明顯的優勢是極高的生態效度，即允許患者在接近自然情境下進行測試，且對頭動和肢體活動的容忍度高，可用於戶外活動、運動訓練、社會交互等多種場景下的腦功能檢測。相較於嚴格限制受試者的體位、身體活動和測試環境，fNIRS 技術的測試結果能更加真實的反映任務過程中的大腦啟動情況，這與作業治療的關注點一致。另一方面，一些特殊受試群體如兒童、精神疾病患者可能無法保持靜止、對設備的不適容忍度較低，幽閉恐懼症患者無法在封閉狹小的環境下接受測試。fNIRS 技術的檢測裝置佩戴較為舒適，且易於接受，更適用於這些群體。此外，fNIRS 是基於光學原理的腦成像技術，具有抗電磁干擾強的特性。fNIRS 不僅能和其他成像設備（fMRI、Electroencephalogram, EEG）無干擾地同步掃描，也可與神經調控技術（經顱磁刺激、經顱電刺激等）聯用，以即時評估干預效果。

fNIRS 技術存在幾點局限性。首先，fNIRS 技術只能觀測大腦皮層表面區域，不能探測到深部溝回和核團。其次，fNIRS 設備本身不能提供測量腦區的解剖位置資訊，需要採用國際 10-20 參考系統或三維定位儀輔助定位，估計感興趣區域在顱外的大致位置。

三、fNIRS 技術在作業治療領域的臨床應用和意義

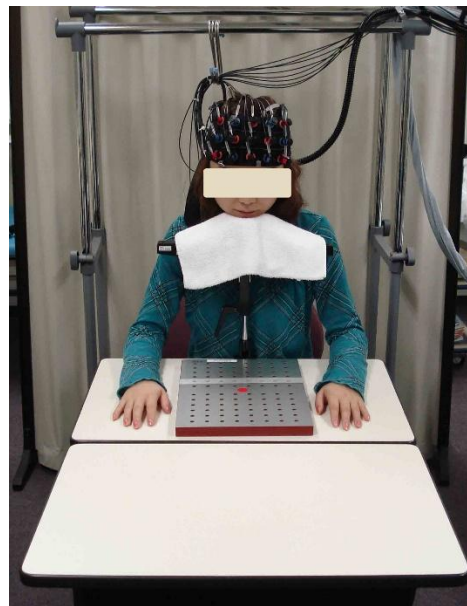
（一）應用對象

- （1）在腦卒中康復領域的臨床應用
- （2）在精神疾病領域的臨床應用
- （3）在兒童康復領域的臨床應用

（二）應用意義

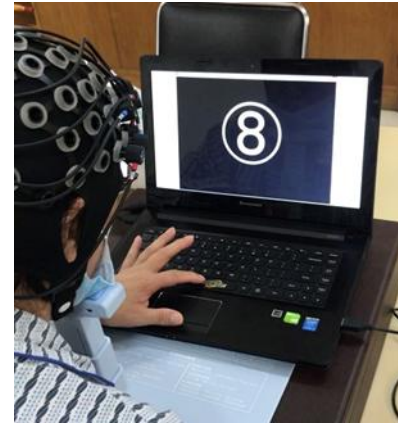
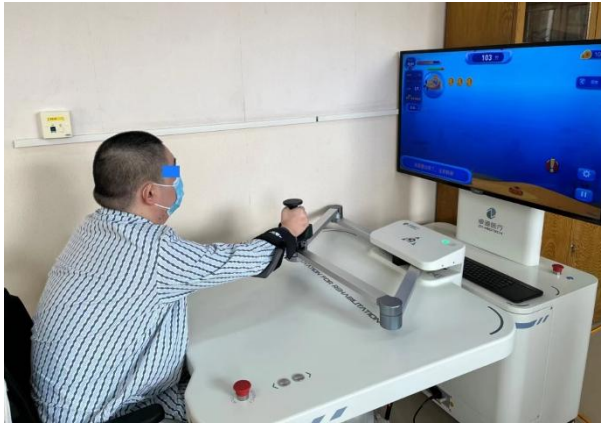
作業治療通過有選擇的作業活動和適當的環境干預來改善康復對象的軀體、心理和社會功能，促進活動和參與。作業治療師往往根據患者所處的恢復階段和功能水準

現況設計作業活動，這些活動不僅讓肢體的各部位產生預期運動，更讓患者能實際操作物品完成附加目的性的任務。根據以往的經驗，腦血管意外患肢功能恢復與是否進行附加目的性活動有關。為探究不同目的性活動影響基於皮層啟動的上肢功能恢復的因素，Huang 等人利用 fNIRS 檢測健康人在執行附加目的任務和單一目的任務時前額葉的啟動情況。試驗中令受試者以釘板任務為基礎，分別執行左、右手的附加目的任務和單一目的任務。在附加目的任務中，受試者用拇指和食指捏住木釘，以每秒移動一塊木釘的速度，將木釘板上的木釘從一個洞移動到另一個洞。在單一目的任務中，受試者在沒有木釘的情況下進行相同的運動。當任務組塊 $O_{xy}\text{-Hb}$ 的變化量高於休息期標準差的 3 倍時，則認為通道顯著啟動。試驗結果表明無論左右手，附加目的任務能夠引起前額葉及其周圍腦區更大範圍的啟動。這可能是實際操作物品時，受試者需要注意木釘的位置、尺寸以及手指的適當位置，並處理手部的感覺資訊，以確保木釘平穩的移動並準確的插入。此外，有目的性的完成操作物品比單純的肢體運動更能提高活動的動機。該研究可以為作業治療師的臨床實踐提供指導，應用更多的附加目的任務來改善患者的功能和日常生活活動能力。



除常規的作業治療外，新興的康復治療技術愈發受到大眾關注。康復機器人、虛擬現實和增強現實技術、神經回饋技術等已廣泛應用於神經系統疾病的康復評價和治療，許多學者利用 EEG、fMRI 以及其他無創性神經成像研究其療效及治療機制。上肢康復機器人是通過末端執行器或外骨骼與人體上肢固連輔助患者進行康復訓練，用以改善上肢肌肉力量、關節活動範圍和運動控制。治療師可根據患者的主動參與程度，從被動運動、輔助運動、主動運動、阻力運動四種訓練模式中選擇適合的訓練模式。

使用機器人設備不僅給患者提供了獨立運動的機會，還可以給予患者視聽提示和運動表現的資訊回饋，增加其訓練的積極性。此外，上肢康復機器人增加了手臂訓練的重複次數，這種強化的、頻繁的、重複的治療模式符合運動學習的原理，因此可以產生比常規康復更好的效果。有研究利用 fNIRS 評估腦卒中患者在主動智能回饋、上肢懸吊和被動智能回饋機器人訓練過程中相關腦區皮層的血氧濃度變化和功能連接情況，以比較上肢智能回饋機器人和其他康復方法在大腦啟動方面的差別，探討上肢智能回饋機器人訓練的治療機制。研究結果顯示，與上肢懸吊訓練相比，主動智能回饋機器人訓練期間受試者的對側前額葉皮質和同側初級運動皮質表現出更高的皮質啟動和皮質間更緊密的功能連接。其原因可能是智能回饋機器人通過多媒體顯示幕設置遊戲情境，並給予視聽回饋，提高了患者的訓練積極性。與被動智能回饋機器人訓練相比，主動智能回饋機器人訓練時的對側前額葉皮質、同側初級運動皮質、同側初級軀體感覺皮質和同側運動前和輔助運動皮質的啟動更強，但功能連接無顯著差異。這可能因為主動訓練需要患者控制肌肉產生運動，需要大腦皮層的更多啟動。而被動訓練時，患肢在機械臂的牽引下被動地運動，患者接受遊戲回饋並進行運動想像，這可能導致腦區間功能連接增加。該結果提示被動智能回饋機器人訓練能夠啟動相關腦區並改善功能連接，可應用於腦卒中遲緩期患者。上肢康復機器人不僅可以幫助患者提高運動功能，還能以遊戲訓練的方式改善其認知功能。Li 等人用 fNIRS 評估上肢運動遊戲訓練治療卒中後輕度認知障礙的療效。運動遊戲以上肢機器人輔助訓練系統為載體，患者通過連接在前臂托架上的末端手柄輸入運動資訊與遊戲交互，使運動和認知功能訓練同時進行。治療師根據患者興趣選擇認知遊戲專案、訓練軌跡等。在訓練前後利用 fNIRS 檢測在持續表現測試 (continuous performance test, CPT) 任務下前額葉皮質區域的氧合血紅蛋白濃度變化，並計算重心值。重心值是 HbO 濃度變化達到總變化量的一半時所對應的時間，該數值越低表明大腦啟動速度越快。研究發現，進行上肢運動遊戲訓練的觀察組患者 fNIRS 重心值顯著低於對照組。這表明上肢運動遊戲訓練可以更好地提高神經處理效率，改善卒中後輕度認知障礙。



四、總結與展望

fNIRS 作為一種無創腦功能成像技術，具有生態效度高、抗運動干擾、抗電磁干擾等優點。該技術在康復治療領域應用廣泛，目前主要用以評估治療效果和探索治療機制等。隨著新的康復治療理論和新興康復治療技術的出現，以及聯合療法在臨床中的應用增加，fNIRS 技術可以在腦功能變化層面揭示治療機制，彌補了僅依賴行為學測試的主觀性缺陷。未來 fNIRS 的各類任務範式將被標準化，建立正常人和患者的測試常模，以輔助診斷或預測療效。

參考文獻

- [1] 近紅外腦功能成像臨床應用專家共識[J].中國老年保健醫學,2021,19(02):3-9.
- [2] 中國康復醫學會作業治療專業委員會,李奎成,閻彥寧,等.《作業治療實踐框架》(2019 版)及解讀[J].中華物理醫學與康復雜誌, 2021, 43(2):177-180.
- [3] 楊澳祥,韋建軍,張治,等.上肢康復機器人現狀研究[J].人工智能與機器人研究, 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] 李秀麗,李珊,馮夢晨等.採用上肢運動遊戲治療卒中後輕度認知障礙並結合功能性近紅外光譜技術進行療效評估的研究[J].中國康復,2023,38(07):412-416.