

• 专题研究:卒中 •

功能性近红外脑光谱成像技术在脑卒中领域中的应用

聂萍, 王兆露*, 唐金荣*

南京医科大学第一附属医院神经内科, 江苏 南京 210029

[摘要] 脑卒中作为一种急性脑血管疾病,其特点包括高发病率、高复发率、高致残率、高死亡率以及沉重的经济负担,对人类生命健康构成了极为严峻的威胁。功能性近红外光谱成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)作为一种无创、便携且抗电磁干扰的脑光学成像方法,近年来在神经科学和临床康复领域得到了广泛应用。尤其在脑卒中神经功能康复中, fNIRS以其独特的优势为康复评估、治疗优化及神经机制研究提供了有力支持。文章综述 fNIRS 在该领域的主要应用方向及研究进展、存在的争议以及未来研究方向,为脑卒中神经功能康复的研究和实践提供参考。

[关键词] 功能性近红外光谱成像技术; 脑卒中; 康复; 研究进展

[中图分类号] R743.3

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2025)05-605-07

doi: 10.7655/NYDXBNSN241275

Application of functional near-infrared spectroscopy in the field of stroke

NIE Ping, WANG Zhaolu*, TANG Jinrong*

Department of Neurology, the First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China

[Abstract] Stroke, as an acute cerebrovascular disease, is characterised by high incidence, high recurrence rate, high disability rate, high mortality rate, and significant economic burden, posing an extremely serious threat to human life and health. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), a non-invasive, portable, and electromagnetic interference-resistant optical brain imaging technique, has seen extensive application in neuroscience and clinical rehabilitation fields in recent years. Particularly in the neurological rehabilitation of stroke, fNIRS has provided substantial support for rehabilitation assessment, treatment optimization and neural mechanism research due to its unique advantages. This paper reviews the main applications, research progress, existing controversies, and future research directions of fNIRS in this field, aiming to provide a reference for the research and practice in neurological rehabilitation of stroke.

[Key words] functional near-infrared spectroscopy; stroke; rehabilitation; research progress

[J Nanjing Med Univ, 2025, 45(05): 605-611]

脑卒中作为全球致残的主要原因之一,也是三大死亡原因之一^[1],其严重性在全球范围内得到广泛关注。在我国,脑卒中的形势更为严峻,其发病率与患病率呈逐年上升趋势,这不仅导致了显著的伤残,还给患者家庭和社会带来了沉重的经济负担^[2]。

研究表明,早期且规范的康复治疗对脑卒中患者具有显著的积极影响。这种治疗能够有效地促进患者的运动功能恢复、提升感觉功能、增强认知能力、改善言语功能,并且显著提升心理健康状况。尽管早期康复治疗的效果已被广泛认可,仍有超过半数的脑卒中患者在发病后长时间内存在运动或非运动功能障碍,这些问题不仅限制了患者的日常生活能力,也严重影响了他们的职业发展和社交活动,总体生活质量大幅下降。因此,未来脑卒中的康复治疗需要向更加个体化和精准化的方向发展,以促进患者的神经功能康复,提高脑卒中患者

[基金项目] 江苏省研究型医院学会神经介入专委会项目(JY202303),南京市政府重大项目(2019060002)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: tangjr2622@163.com (ORCID: 0009-0003-9912-0896); zhaoluwang@njmu.edu.cn, (ORCID: 0009-0001-2889-3184)

的生活质量。

功能近红外光谱成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)是一种新型非侵入性的脑功能检测技术,神经血管耦合过程会将快速变化的神经电活动转换为缓慢变化的血流动力学变化,在这一原理基础上,fNIRS可通过实时动态地监测大脑皮层中氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的浓度波动,进而间接映射出大脑的神经功能活动^[3]。相比功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、脑电图(electroencephalogram, EEG)、正电子发射计算机断层显像(positron emission tomography, PET)等神经功能影像学评定技术,fNIRS具有安全无创、生态效率高、使用成本低、可移动、抗干扰强、兼容性好等优势^[4-5],迅猛发展并成为当今脑成像领域不可或缺的成员。已被广泛应用于脑卒中神经功能康复领域,可实时反馈康复干预疗效,反映和判断神经功能重建情况,在指导和优化康复方案方面有重要的临床应用价值。文章主要探讨fNIRS在缺血性脑卒中患者神经功能康复中的应用进展。

1 fNIRS在脑卒中诊断中的研究

于脑卒中患者而言,若能做到早发现早诊断早治疗,并采取有效的预防及干预措施,将极大程度地优化患者的康复进程,提升其生存质量。急性发作的神经功能障碍是卒中的关键临床特征。然而,在大多数情况下,脑血管的病理生理变化先于事件发生,通常是多年。定期进行临床神经学评估是唯一推荐的神经学监测方法。这种临床检测到的预警,在大多数情况下需要通过核磁共振成像或计算机断层扫描重复神经成像,对人体带来一定的辐射风险。显然,在脑卒中的这个阶段,一种无创性持续监测病变组织病理生理变化的方法是非常迫切的^[6-7]。

早在2000年Chen等^[8]研究表明用近红外光谱法测量出的大鼠脑梗死灶部位及大小与fMRI的解剖样本匹配良好。同样Terborg等^[9]的研究表明灌注加权MRI(perfusion-weighted MRI, PWI)和fNIRS测量结果的一致性。且后续Klein等^[10]的研究更是表明基于fMRI的验证,在空间特异性和任务敏感性方面,辅助运动区(supplementary motor area, SMA)激活可以用(continuous-wave functional near-infrared spectroscopy, CW-fNIRS)可靠地测量。上述研究均证实近红外光谱成像技术的可靠性及准确

性。2014年Kainerstorfer等^[11]构建了一种新血流动力学模型,并采用fNIRS监测脑血管,根据fNIRS监测结果确定脑血管的生理参数,脑微血管血流动力学、脑自动调节和脑血管反应性的定量评估,对各种神经血管疾病、外伤性脑损伤和中风的诊断及评估具有深远意义。2023年Gao等^[12]使用机器学习利用fNIRS提出了一个基于大脑血氧饱和度信号的自动分类框架进行中风分析和识别,模型的准确率>90%,对区分出血性脑卒中或缺血性脑卒中患者具有重要意义。这意味着光学成像技术在脑卒中的诊断及预测领域将有重要应用价值。

2 fNIRS在脑卒中运动功能康复中的监测作用

脑卒中往往导致患者运动功能重创,多数患者会出现偏瘫或四肢瘫痪的严重后果。肢体运动功能障碍是脑卒中后的主要功能障碍之一,恢复速度慢,难度大,神经机制复杂,目前仍是研究的重点领域。当前运动功能恢复的两大模型是代偿模型和半球间竞争模型,对于脑损伤后结构保留度高的患者,主要应用半球间竞争模型,即抑制健侧大脑半球兴奋性或兴奋患侧大脑半球;对于脑损伤后结构保留度低的患者,主要应用代偿模型,即刺激健侧或抑制患侧大脑半球兴奋性^[13-15]。fNIRS可根据血流信号反映大脑皮层活动的兴奋性,主要检测区域包括双侧运动前皮层、SMA、运动区、顶叶皮质区域以及躯体感觉区^[16]。

2.1 上肢运动障碍

Kato等^[17]分别用fNIRS与fMRI观察了6例脑卒中患者和5例健康对照者在执行上肢运动任务时的皮质激活情况,两种成像方法均观察到正常受试者在每次手部运动时主要激活对侧初级感觉运动皮层和辅助运动区域。脑卒中患者在健侧的手部运动中表现出正常的激活模式。而在患侧的手部运动中,脑卒中患者不仅在对侧运动皮层表现出延长的激活,而且在同侧运动皮层(初级运动皮层和辅助运动皮层)也表现出延长的激活。其团队在2007年进一步研究表明在脑卒中康复早期手部运动激活了双侧感觉运动皮层,而激活模式在后期恢复正常^[18]。这表明与健康个体相比,脑卒中患者表现出健侧大脑半球参与代偿。这与后续一些研究结果一致^[19-20],验证了卒中康复期间健侧代偿的机制,可以通过同侧运动皮层的功能重组来改善偏瘫的恢复。但是一些研究者持不同观点^[21-22],他们认为健侧半球在患侧半球之前被激活,但是在运动功

能恢复过程中,皮质激活模式从健康半球过渡到受影响的半球。需要进一步的研究来探索半球间激活模式对运动功能恢复的影响,以确定激活差异是否与脑卒中严重程度、康复周期或自发恢复有关。通过监测患者皮质损伤程度,评估患者状态,以便提供更加个性化的康复手段。

2.2 下肢运动障碍

脑卒中后患者行走的恢复情况变化很大,准确地测量和记录行走过程中的脑功能激活特征可以帮助指导康复。相关研究显示,内侧感觉运动皮质和SMA主要参与稳定步态,前额叶皮层参与步行速度的调节^[23]。之前关于脑卒中患者行走过程中脑区变化的研究主要集中在前额叶^[24-25],2022年Lim等^[26]的研究首次报道了脑卒中患者行走时额叶到顶叶区域特定氧合和脱氧血红蛋白变化,得出感觉运动皮层仅在行走的早期加速阶段活跃的结论。后顶叶皮层在行走后期的稳定阶段显示了激活的变化。更快的步态速度也与对位感觉运动和后顶叶皮质的激活增加有关,揭示了后顶叶皮质在中风后行走中的重要性,为卒中患者的康复治疗提供了新的关注点。除行走外,平衡问题亦是脑卒中的主要后遗症。Fujimoto等^[27]研究发现,对偏瘫脑卒中患者强化康复后,受影响和未受影响半球SMA中与姿势扰动相关的皮质激活显著增加。未受影响的半球SMA中姿势扰动相关的氧合血红蛋白信号的增加与Berg平衡量表测量的平衡功能增益显著相关。随后Mihara等^[28]使用功能性近红外光谱介导的神经反馈(functional near-infrared spectroscopy-mediated neurofeedback, fNIRS-NFB)作用于SMA促进中风后步态和平衡恢复,结果显示干预组与意象相关的SMA激活显著增加,SMA和腹外侧运动前区之间静息态连接增强。这些研究结果表明,SMA在中风后平衡功能的恢复中起着至关重要的作用。

3 fNIRS在脑卒中非运动功能障碍康复中的监测作用

除运动功能的损伤外,脑卒中患者的非运动功能损伤也严重影响患者的生活质量,包括但不限于卒中后抑郁(post-stroke depression, PSD)和认知障碍、失语及吞咽障碍。Koyanagi等^[29]将言语流畅性测验作为认知激活任务来评估fNIRS是否可以应用于PSD的诊断和评估。结果表明,与非抑郁组患者相比,抑郁组患者的氧合血红蛋白浓度较低,额叶激活水平较低。并且氧合血红蛋白积分值与汉密

尔顿抑郁量表得分呈负相关,表明使用fNIRS测量氧合血红蛋白是诊断脑卒中后患者PSD的有效方法。Kong等^[30]使用时钟绘制测试、数字跨度测试、Corsi块敲击测试以及同步fNIRS检测评估卒中后认知障碍患者及非认知障碍患者与健康对照者的短期记忆和视觉空间能力,发现卒中后认知障碍患者出现明显的大脑功能连接降低,且功能连接水平与简易智能精神状态检查量表得分密切相关。这提示功能连接水平降低可能是卒中后认知功能受损的标志。既往研究表明,额下回与语言处理能力显著相关^[31]。然而Gilmore等^[32]研究发现卒中后失语症患者相比健康者激活了传统脑区之外的区域,特别是额上回,为卒中后失语症患者的语言恢复机制提供了参考。Ma等^[33]对不同部位中风后吞咽困难的患者进行fNIRS监测,结果显示不同脑卒中位置的患者和健康对照者在吞咽过程中的皮质激活区域不同。健康受试者和脑干病变患者双侧激活更多,而单侧半球脑卒中患者未受影响的半球皮质激活更多。为未来治疗脑卒中后吞咽困难提供了基础。虽有上述结果,但是目前关于fNIRS在脑卒中后非运动功能障碍中的研究相对较少,仍需进一步验证。

4 fNIRS在脑卒中康复中的评估作用

运动功能评估是脑卒中后运动障碍康复的关键。神经成像技术结合机器学习帮助解码患者的功能状态。然而,个体脑功能信息如何预测脑卒中患者运动障碍程度还需要更多研究。Lin等^[34]通过对运动网络的小世界属性相关的研究使用近红外光谱(near-infrared spectrum, NIRS)、红外光谱功能连接和支持向量机共同构成了一种在个体水平上评估脑卒中后运动障碍程度的有效方法。此外,fNIRS可以通过小波相干分析脑组织氧血红蛋白浓度来评估前额叶功能连接性^[35]。Lamberti等^[36]表明在亚急性脑卒中中,通过NIRS评估的生物标志物皮质代谢成本(the cortical metabolic cost, CMC)在偏瘫手臂的运动任务中可能预测皮层时间、治疗重组,有利于患者选择更好的康复治疗方式。Wang等^[37]的研究同样证明了fNIRS反映的脑血流动力学活动可作为评估脑卒中肢体运动功能障碍的可靠神经生物标志物。脑梗死后运动相关神经网络重塑对患者运动功能恢复至关重要^[37-38],fNIRS被证实在静息态卒中患者皮层活动强度和脑网络指标健侧中具有高度的可靠性^[39]。Xu等^[40]使用fNIRS比较分

析卒中后偏侧化的特征,包括皮质活动、功能网络和血流动力学滞后,研究结果证明3个方面的偏侧化指标均与Fugl-Meyer评分相关,可为脑卒中康复提供临床参考。同样Ye等^[41]将表面肌电图和fNIRS相结合提出了一种创新方法来评估上肢的运动功能,预测上肢Fugl-Meyer评分。多项研究均表明fNIRS可从多方面、多角度为脑卒中康复评估提供有效的方法^[42-44]。

5 fNIRS在脑卒中康复治疗中的作用

近年来,近红外光谱技术得到了迅速发展,从单位测量到二维测量,再到三维测量。脑机接口(brain-computer interface, BCI)是其最有前途的应用之一,最早由Coyle等^[45]提出。BCI利用大脑活动来控制外部设备,绕过周围神经系统,帮助瘫痪患者与环境进行交互。Liu等^[46]研究表明基于BCI的康复可以有效干预中度或重度上肢麻痹患者的运动表现,是脑卒中神经康复的潜在策略。多项研究均表明fNIRS与脑机接口技术的结合可有效改善脑卒中患者的功能障碍^[47-48]。但受环境影响,脑机接口在临床中的应用仍受限制。另有研究将20例中风患者分为3组:fNIRS引导的重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)治疗(fNIRS组),运动诱发电位(motor evoked potential, MEP)引导的rTMS治疗(MEP组)和假干预组。与假干预组相比,两个干预组的肌肉力量、Fugl-Meyer评定量表和沃尔夫运动功能测试(Wolf motor function test, WMFT)评分均有显著改善。且fNIRS组的肘部功能改善显著高于MEP组^[49]。这表明fNIRS是脑卒中患者运动神经调控热点导航的可靠工具,对皮质氧合变化具有高灵敏度,在脑卒中患者中取得了优于传统基于MEP方法的结果。因此,此方法更加简单、实用、易操作,可用于校准治疗部位,指导经颅磁刺激技术(transcranial magnetic stimulation, TMS)干预方案的实施,让TMS的应用有据可依,更加科学。不仅如此,fNIRS还被广泛应用于神经反馈疗法^[28,50]、镜像疗法^[51-52]等康复手段中,效果均得到高度认可。

6 总结

fNIRS凭借血液主要成分在600~900 nm波长范围内的优异散射特性,能够精确追踪大脑活动期间氧合血红蛋白与脱氧血红蛋白的浓度波动。该技术具有一定组织穿透深度并能完成无损组织参数(包括光学参数、血氧参数、血流动力)测试,相对

fMRI、PET具有更高的时间分辨率,相对EEG、事件相关电位(event-related potential, ERP)具有更高的空间分辨率,相对fMRI、EEG、ERP具有更强的抗运动伪影能力,这意味着fNIRS在脑科学领域广阔的研究与应用前景。fNIRS还具有和其他成像设备的良好兼容性。光学信号和电、磁的良好兼容,使得fNIRS可以和fMRI、EEG无干扰地进行同步扫描。此外,fNIRS还可以与TMS等非侵入神经调控技术结合,如TMS、rTMS、经颅电刺激(transcranial electrical stimulation, TES)等,一方面可以用于靶脑区定位,另一方面也可以用于评估干预的效果。fNIRS还可以同时检测氧合/脱氧血红蛋白浓度变化,从多个角度反映脑功能活动的规律,有助于更好地理解神经血管耦合关系。除此之外,fNIRS具有较高的采样率(可达数十赫兹),有助于高频噪声的分离与剔除。但是经典的有线fNIRS仪器通常都很笨重,电缆可能会降低参与者的运动和头部自由度,电缆的振荡可能会产生运动伪影。因此,可穿戴的多通道fNIRS系统可以克服这一缺陷,被认为是神经康复最方便的器械。值得注意的是,便携式和无线系统的仪器数量正在不断增加,在不久的将来,无光纤漫射光学层析成像系统可能会进一步提高光学成像的灵活性。

虽然fNIRS在脑卒中康复中的应用前景广阔,但其临床应用仍然存在挑战和局限性。fNIRS技术只能观测大脑皮层表面区域。由于存在散射和吸收效应以及安全方面对光强的限制,发射极发出的近红外光仅能到达头皮下1.5~2.0 cm(即大脑皮层表面)。因此,fNIRS很难探测到大脑皮层的沟回深处,更无法探测到岛叶以及杏仁核、海马、丘脑等皮层下的核团。在未来的神经科学研究与临床应用中,探索将fNIRS与其他先进的神经影像技术相结合,如弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)、磁共振波谱分析(magnetic resonance spectroscopy, MRS)、PET、单光子发射计算机断层扫描(single-photon emission computed tomography, SPECT)以及fMRI,无疑是一个值得期待的研究方向。这种跨技术的融合有望为大脑活动的检测提供更加全面、深入且准确的视角。未来在针对脑卒中患者的研究中,应更重视fNIRS技术在脑卒中预防及早期诊断中的作用,从根源上减轻卒中带来的危害。

利益冲突声明:

所有作者声明无利益冲突。

Conflict of Interests:

All authors declare no conflict of interests.

作者贡献声明:

聂萍负责论文撰写与修改;王兆露和唐金荣负责研究方向指导、论文修改。

Author's Contributions:

NIE Ping wrote the initial draft of the manuscript and revised the manuscript; WANG Zhaolu and TANG Jinrong were responsible for research direction guidance and paper revision.

[参考文献]

- [1] IADECOLA C, BUCKWALTER M S, ANRATHER J. Immune responses to stroke: mechanisms, modulation, and therapeutic potential [J]. *J Clin Invest*, 2020, 130(6): 2777-2788
- [2] 《中国脑卒中防治报告》编写组, 王陇德. 《中国脑卒中防治报告 2021》概要[J]. *中国脑血管病杂志*, 2023, 20(11): 783-792
Report on stroke prevention and treatment in China Writing Group, WANG L D. Brief report on stroke prevention and treatment in China, 2021 [J]. *Chinese Journal of Cerebrovascular Disease*, 2023, 20(11): 783-792
- [3] YAMAZAKI R, INOUE Y, MATSUDA Y, et al. Laterality of prefrontal hemodynamic response measured by functional near-infrared spectroscopy before and after repetitive transcranial magnetic stimulation: a potential biomarker of clinical outcome [J]. *Psychiatry Res*, 2022, 310: 114444
- [4] RICHER N, DOWNEY R J, DAVID HAIRSTON W, et al. Motion and muscle artifact removal validation using an electrical head phantom, robotic motion platform, and dual layer mobile EEG [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(8): 1825-1835
- [5] 近红外脑功能成像临床应用专家共识编写组. 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(2): 3-9
Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology writing group. Expert consensus on clinical application of near-infrared brain imaging technology [J]. *Chinese Journal of Geriatric Care*, 2021, 19(2): 3-9
- [6] WALSH K B. Non-invasive sensor technology for prehospital stroke diagnosis: current status and future directions [J]. *Int J Stroke*, 2019, 14(6): 592-602
- [7] HUO C C, XU G C, XIE H, et al. Functional near-infrared spectroscopy in non-invasive neuromodulation [J]. *Neural Regen Res*, 2024, 19(7): 1517-1522
- [8] CHEN W, LU G, LICHTY W. Localizing the focus of ischemic stroke with near infrared spectroscopy [J]. *Chin Med J (Engl)*, 2002, 115(1): 84-88
- [9] TERBORG C, GRÖSCHEL K, PETROVITCH A, et al. Noninvasive assessment of cerebral perfusion and oxygenation in acute ischemic stroke by near-infrared spectroscopy [J]. *Eur Neurol*, 2009, 62(6): 338-343
- [10] KLEIN F, DEBENER S, WITT K, et al. fMRI-based validation of continuous-wave fNIRS of supplementary motor area activation during motor execution and motor imagery [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 3570
- [11] KAINERSTORFER J M, SASSAROLI A, HALLACOGLU B, et al. Practical steps for applying a new dynamic model to near-infrared spectroscopy measurements of hemodynamic oscillations and transient changes: implications for cerebrovascular and functional brain studies [J]. *Acad Radiol*, 2014, 21(2): 185-196
- [12] GAO T X, LIU S, WANG X, et al. Stroke analysis and recognition in functional near-infrared spectroscopy signals using machine learning methods [J]. *Biomed Opt Express*, 2023, 14(8): 4246-4260
- [13] DIONÍSIO A, DUARTE I C, PATRÍCIO M, et al. The use of repetitive transcranial magnetic stimulation for stroke rehabilitation: a systematic review [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2018, 27(1): 1-31
- [14] LEÓN RUIZ M, RODRÍGUEZ SARASA M L, SANJUÁN RODRÍGUEZ L, et al. Current evidence on transcranial magnetic stimulation and its potential usefulness in post-stroke neurorehabilitation: opening new doors to the treatment of cerebrovascular disease [J]. *Neurologia (Engl Ed)*, 2018, 33(7): 459-472
- [15] MURATA Y, HIGO N, HAYASHI T, et al. Temporal plasticity involved in recovery from manual dexterity deficit after motor cortex lesion in macaque monkeys [J]. *J Neurosci*, 2015, 35(1): 84-95
- [16] LIU J C, WANG C H. Microstructure and genetic polymorphisms: role in motor rehabilitation after subcortical stroke [J]. *Front Aging Neurosci*, 2022, 14: 813756
- [17] KATO H, IZUMIYAMA M, KOIZUMI H, et al. Near-infrared spectroscopic topography as a tool to monitor motor reorganization after hemiparetic stroke: a comparison with functional MRI [J]. *Stroke*, 2002, 33(8): 2032-2036
- [18] TAKEDA K, GOMI Y, IMAI I, et al. Shift of motor activation areas during recovery from hemiparesis after cerebral infarction: a longitudinal study with near-infrared spectroscopy [J]. *Neurosci Res*, 2007, 59(2): 136-144
- [19] YANG C L, LIM S B, PETERS S, et al. Cortical activation during shoulder and finger movements in healthy adults: a functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study [J]. *Front Hum Neurosci*, 2020, 14: 260
- [20] SUI Y X, KAN C J, ZHU S Z, et al. Resting-state functional connectivity for determining outcomes in upper extremity function after stroke: a functional near-infrared spec-

- troscopy study[J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 965856
- [21] 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*, 2022, 14: 1077218
- [22] WANG H W, XIONG X, ZHANG K X, et al. Motor network reorganization after motor imagery training in stroke patients with moderate to severe upper limb impairment[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2023, 29(2): 619–632
- [23] HE X, LEI L, YU G, et al. Asymmetric cortical activation in healthy and hemiplegic individuals during walking: a functional near - infrared spectroscopy neuroimaging study [J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 1044982
- [24] CLARK D J, ROSE D K, BUTERA K A, et al. Rehabilitation with accurate adaptability walking tasks or steady state walking: a randomized clinical trial in adults post-stroke[J]. *Clin Rehabil*, 2021, 35(8): 1196–1206
- [25] CALIANDRO P, MOLteni F, SIMBOLOTTI C, et al. Exoskeleton-assisted gait in chronic stroke: an EMG and functional near-infrared spectroscopy study of muscle activation patterns and prefrontal cortex activity[J]. *Clin Neurophysiol*, 2020, 131(8): 1775–1781
- [26] LIM S B, YANG C L, PETERS S, et al. Phase-dependent brain activation of the frontal and parietal regions during walking after stroke - an fNIRS study [J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 904722
- [27] FUJIMOTO H, MIHARA M, HATTORI N, et al. Cortical changes underlying balance recovery in patients with hemiplegic stroke[J]. *Neuroimage*, 2014, 85(Pt 1): 547–554
- [28] MIHARA M, FUJIMOTO H, HATTORI N, et al. Effect of neurofeedback facilitation on poststroke gait and balance recovery[J]. *Neurology*, 2021, 96(21): e2587–e2598
- [29] KOYANAGI M, YAMADA M, HIGASHI T, et al. The usefulness of functional near-infrared spectroscopy for the assessment of post-stroke depression[J]. *Front Hum Neurosci*, 2021, 15: 680847
- [30] KONG Y, PENG W N, LI J, et al. Alteration in brain functional connectivity in patients with post-stroke cognitive impairment during memory task: a fNIRS study [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2023, 32(9): 107280
- [31] OBAYASHI S. The supplementary motor area responsible for word retrieval decline after acute thalamic stroke revealed by coupled SPECT and near-infrared spectroscopy [J]. *Brain Sci*, 2020, 10(4): 247
- [32] GILMORE N, YÜCEL M A, LI X G, et al. Investigating language and domain-general processing in neurotypicals and individuals with aphasia - a functional near - infrared spectroscopy pilot study [J]. *Front Hum Neurosci*, 2021, 15: 728151
- [33] MA X C, PENG Y, ZHONG L D, et al. Hemodynamic signal changes during volitional swallowing in dysphagia patients with different unilateral hemispheric stroke and brainstem stroke: a near-infrared spectroscopy study [J]. *Brain Res Bull*, 2024, 207: 110880
- [34] LIN S S, WANG D, SANG H J, et al. Predicting poststroke dyskinesia with resting - state functional connectivity in the motor network [J]. *Neurophotonics*, 2023, 10(2): 025001
- [35] HAN Q Y, ZHANG M, LI W H, et al. Wavelet coherence analysis of prefrontal tissue oxyhaemoglobin signals as measured using near-infrared spectroscopy in elderly subjects with cerebral infarction [J]. *Microvasc Res*, 2014, 95: 108–115
- [36] LAMBERTI N, MANFREDINI F, NARDI F, et al. Cortical oxygenation during a motor task to evaluate recovery in subacute stroke patients: a study with near - infrared spectroscopy [J]. *Neurol Int*, 2022, 14(2): 322–335
- [37] WANG D, WANG J, ZHAO H B, et al. The relationship between the prefrontal cortex and limb motor function in stroke: a study based on resting-state functional near-infrared spectroscopy [J]. *Brain Res*, 2023, 1805: 148269
- [38] 孙妍玉, 吴晋. 神经网络重塑促进脑卒中后功能修复的研究进展 [J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(4): 577–581
- SUN Y Y, WU J. Research progress on the critical role of neural network remodeling in functional recovery after stroke [J]. *Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences)*, 2023, 43(4): 577–581
- [39] XU G C, HUO C C, YIN J H, et al. Test-retest reliability of fNIRS in resting-state cortical activity and brain network assessment in stroke patients [J]. *Biomed Opt Express*, 2023, 14(8): 4217–4236
- [40] XU G C, CHEN T D, YIN J H, et al. Lateralization of cortical activity, networks, and hemodynamic lag after stroke: a resting-state fNIRS study [J]. *J Biophotonics*, 2024, 17(7): e202400012
- [41] YE S J, TAO L, GONG S, et al. Upper limb motor assessment for stroke with force, muscle activation and interhemispheric balance indices based on sEMG and fNIRS [J]. *Front Neurol*, 2024, 15: 1337230
- [42] CHEN S M, ZHANG X L, CHEN X X, et al. The assessment of interhemispheric imbalance using functional near-infrared spectroscopic and transcranial magnetic stimulation for predicting motor outcome after stroke [J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1231693
- [43] YANG Z, YE L, YANG L N, et al. Early screening of post-stroke fall risk: a simultaneous multimodal fNIRS - EMG

- study[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(9): e70041
- [44] ZHOU Y, XIE H, LI X, et al. Predicting upper limb motor recovery in subacute stroke patients *via* fNIRS-measured cerebral functional responses induced by robotic training [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1): 226
- [45] COYLE S, WARD T, MARKHAM C, et al. On the suitability of near-infrared (NIR) systems for next-generation brain - computer interfaces [J]. *Physiol Meas*, 2004, 25(4): 815-822
- [46] LIU L Y, JIN M X, ZHANG L G, et al. Brain-computer interface - robot training enhances upper extremity performance and changes the cortical activation in stroke patients: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. *Front Neurosci*, 2022, 16: 809657
- [47] ASGHER U, KHAN M J, ASIF NIZAMI M H, et al. Motor training using mental workload (MWL) with an assistive soft exoskeleton system: a functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study for brain - machine interface (BMI) [J]. *Front Neurobot*, 2021, 15: 605751
- [48] WANG Z P, CAO C, CHEN L, et al. Multimodal neural response and effect assessment during a BCI-based neurofeedback training after stroke [J]. *Front Neurosci*, 2022, 16: 884420
- [49] CHANG P W, LU C F, CHANG S T, et al. Functional near-infrared spectroscopy as a target navigator for rTMS modulation in patients with hemiplegia: a randomized control study [J]. *Neurol Ther*, 2022, 11(1): 103-121
- [50] RIEKE J D, MATARASSO A K, MINHAL YUSUFALI M, et al. Development of a combined, sequential real-time fMRI and fNIRS neurofeedback system to enhance motor learning after stroke [J]. *J Neurosci Methods*, 2020, 341: 108719
- [51] BELLO U M, CHAN C C H, WINSER S J. Task complexity and image clarity facilitate motor and visuo-motor activities in mirror therapy in post-stroke patients [J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 722846
- [52] BAI Z F, FONG K N K, ZHANG J Q, et al. Cortical mapping of mirror visual feedback training for unilateral upper extremity: a functional near - infrared spectroscopy study [J]. *Brain Behav*, 2020, 10(1): e01489

[收稿日期] 2024-11-22

(本文编辑:戴王娟)



欢迎关注我刊微博、微信公众号!