

功能性近红外光谱技术在吞咽功能评估中的应用进展

刘欣悦^{1,2}, 马东旭^{1,2}, 师冉^{1*}, 韩莹^{1*}

¹山东第一医科大学第一附属医院康复医学科, 山东 济南

²山东第一医科大学研究生院, 山东 济南

收稿日期: 2025年4月23日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月27日

摘要

脑卒中后会引发各种功能障碍, 其中吞咽障碍是脑卒中患者最常见的症状之一。吞咽障碍的危害极其严重, 脑卒中患者吞咽障碍的早期诊断和疗效评估尤为重要。吞咽是一种复杂的运动功能, 其过程涉及双侧大脑皮层、脑干、特定脑神经及咽部感受器的协同调节。功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)是一种新兴的安全无创技术, 可动态监测组织血氧代谢, 分析任务状态下的脑区激活情况, 具有指导吞咽障碍治疗及疗效评价的潜在价值, 有广阔的临床和科研应用前景。

关键词

吞咽障碍, 吞咽功能, 功能性近红外光谱技术, 脑区激活

Research Progress on the Application of Functional Near-Infrared Spectroscopy in Swallowing Function Assessment

Xinyue Liu^{1,2}, Dongxu Ma^{1,2}, Ran Shi^{1*}, Ying Han^{1*}

¹Department of Rehabilitation Medicine, The First Affiliated Hospital of Shandong First Medical University, Jinan Shandong

²Graduate School of Shandong First Medical University, Jinan Shandong

Received: Apr. 23rd, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: May 27th, 2025

Abstract

Stroke can lead to various functional impairments, among which dysphagia is one of the most

*通讯作者。

文章引用: 刘欣悦, 马东旭, 师冉, 韩莹. 功能性近红外光谱技术在吞咽功能评估中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(5): 1971-1978. DOI: 10.12677/acm.2025.1551581

common symptoms in stroke patients. Dysphagia poses significant risks, making early diagnosis and efficacy evaluation particularly important. Swallowing is a complex motor function that involves the coordinated regulation of both cerebral hemispheres, the brainstem, specific cranial nerves, and pharyngeal receptors. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) is an emerging, safe, and non-invasive technology that dynamically monitors tissue oxygen metabolism and analyzes brain region activation under task conditions. It holds great potential for guiding dysphagia treatment and evaluating therapeutic efficacy, with promising applications in both clinical and research fields.

Keywords

Dysphagia, Swallowing Function, Near-Infrared Brain Functional Imaging, Brain Region Activation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

吞咽障碍(dysphagia)是指由于下颌、唇、舌、软腭、咽喉、食管等器官的结构或功能受损,使食物不能从口腔安全有效地运送到胃里的异常状况,任何与吞咽有关的神经或器官受累,均有可能导致吞咽障碍[1]。吞咽障碍不仅影响营养摄入,还可能导致吸入性肺炎、脱水和营养不良[2] [3],严重者甚至危及生命[4]。因此,吞咽功能的客观评估对于早期诊断和干预至关重要。

目前,临床上常用的吞咽功能评估方法包括视频透视吞咽造影检查(videofluoroscopic swallowing study, VFSS)和纤维内镜吞咽功能检查(fiberoptic endoscopic evaluation of swallowing, FEES)。VFSS 和 FEES 是公认的吞咽障碍的诊断金标准。但这些传统方法主要关注吞咽的解剖和生理层面,难以直接评估吞咽相关的脑功能变化,限制了对吞咽控制机制及康复效果的深入理解。

近年来,功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)在吞咽功能研究中的应用逐渐受到关注。fNIRS 通过测量近红外光在组织中的吸收变化,间接反映大脑皮层局部血氧水平和神经活动[5]。相较于功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI),fNIRS 具有便携性高、抗运动伪影能力强、可进行实时监测等优势[6],适用于吞咽等自然运动任务的研究。此外,fNIRS 允许在床旁或康复训练过程中对患者进行动态监测[7],为吞咽障碍的评估和康复提供了一种新的无创手段。fNIRS 在正常人群、神经疾病患者以及吞咽障碍康复干预评估等方面的研究不断推进,逐渐展现出其在吞咽功能评估领域的独特潜力。

本综述旨在探讨 fNIRS 在吞咽功能评估中的应用现状与发展趋势,重点围绕以下研究问题展开:fNIRS 能否作为一种有效手段,识别吞咽任务相关脑区的激活模式,反映吞咽障碍的神经机制,并为个体化康复治疗提供客观指标?本文将综述 fNIRS 在吞咽评估中的关键研究进展,分析技术局限,进一步提出未来研究中多模态融合、标准范式建立和智能算法发展的具体方向,以期为吞咽障碍的神经功能评估与临床干预提供理论支持与实践指导。

2. fNIRS 评估吞咽功能的理论背景

2.1. 吞咽的神经生理机制

吞咽的中枢调节网络由大脑皮层、皮层下结构(如基底节、小脑、丘脑)及脑干中的吞咽中枢组成[8]。吞咽的启动主要受大脑皮层调控,而吞咽的执行则依赖于脑干反射通路,其中吞咽反射由延髓的吞咽中

枢模式发生器(CPG)介导,该中枢协调一系列肌肉的同步收缩,以完成吞咽动作[9][10]。研究表明,吞咽任务会激活多个脑区,形成一个高度分布的网络,其中包括:初级运动皮层(primary motor cortex, M1)、初级感觉皮层(primary somatosensory cortex, S1)、岛叶、扣带回、辅助运动区(supplementary motor area, SMA)和前运动皮层(premotor cortex, PMC) [11]。

吞咽障碍的康复与大脑皮层的可塑性密切相关。研究表明,卒中等疾病导致的单侧脑损伤后,对侧未受损皮层可通过代偿机制增强吞咽功能[12]。此外,吞咽训练、电刺激治疗、针刺治疗等康复手段可以促进吞咽相关脑区的重塑,提高患者的吞咽能力[13]-[15]。例如,有研究表明,神经肌肉电刺激可能通过神经可塑性改变相关皮层和脑干通路,从而增强吞咽启动功能[15]。fNIRS 作为一种便携式的脑功能成像技术,可以用于监测康复过程中大脑功能的变化,为吞咽障碍的评估和治疗提供客观的神经影像学支持。

2.2. fNIRS 技术概述

fNIRS 是一种无创的脑功能成像技术,通过测量近红外光在生物组织中的吸收和散射特性,间接反映大脑活动引起的血流动力学变化。fNIRS 主要基于光学原理,即氧合血红蛋白(oxy-Hb)和去氧血红蛋白(deoxy-Hb)在近红外光(650~1000 nm 波段)下具有不同的吸收特性[16]。当某一脑区的神经活动增强时,该区域的局部代谢需求增加,导致毛细血管扩张和局部血流增加,从而引起 oxy-Hb 浓度升高、deoxy-Hb 浓度下降[17]-[19]。fNIRS 通过在头皮放置发射和探测光纤,记录大脑皮层浅层组织的血红蛋白浓度变化,从而推测皮层神经活动的动态变化[5]。

相比功能磁共振成像(fMRI),fNIRS 能够提供良好的时间分辨率(秒级)且对运动伪影不敏感[20];相比脑电图(EEG),fNIRS 也能提供更好的空间分辨率,尤其适用于皮层脑区的功能研究[21];相比正电子发射断层扫描(PET),fNIRS 无需放射性示踪剂,具有更高的安全性和可重复性。fNIRS 由于其便携性、抗运动伪影能力强、可实时监测等特点,在吞咽功能研究中具有明显优势。综合而言,fNIRS 作为一种新兴的神经影像技术,为吞咽功能评估提供了一种无创、可重复的手段,能够补充传统吞咽评估方法的不足,并在吞咽障碍的诊断、治疗监测及康复评估中展现出广阔的应用前景。

3. 吞咽功能评估相关的 fNIRS 研究进展

3.1. fNIRS 在健康人群吞咽功能研究中的应用

吞咽是一个由大脑皮层、皮层下结构和脑干协同调控的复杂过程[8],在健康个体中,吞咽任务通常会引起一系列脑区的激活[11]。fNIRS 研究表明[8],初级运动皮层(M1)和初级感觉皮层(S1)是吞咽过程中最主要的激活区域,M1 负责控制吞咽肌群的运动执行,而 S1 负责整合吞咽过程中口腔、咽部和喉部的感觉反馈。此外,岛叶在吞咽过程中起着感知和运动整合作用,辅助运动区(SMA)和前运动皮层(PMC)参与吞咽任务的计划和协调,扣带回可能与吞咽的注意调控和情绪体验有关。fNIRS 研究显示,在重复唾液吞咽任务中,双侧 M1、S1、SMA、PMC 和前额叶区均有显著激活[22],这一结果与既往的 fMRI 研究结果一致[23]-[27]。此外,fNIRS 研究还发现,吞咽时的脑激活具有一定的侧偏性,双侧大脑半球的激活情况存在较大差异[22] [24]。

fNIRS 通过测量吞咽任务诱导的血红蛋白浓度变化,能够反映吞咽相关脑区的神经活动特征。在健康个体中,研究发现吞咽任务通常会引起吞咽相关脑区 oxy-Hb 浓度显著增加,而 deoxy-Hb 浓度相应降低,这种现象被认为是局部神经活动增强所引发的功能性血管扩张(即神经血管耦合效应)[28] [29]。oxy-Hb 和 deoxy-Hb 变化的具体特征包括:吞咽任务开始后,oxy-Hb 浓度在 3~5 秒内逐渐上升,并在吞咽结束后缓慢恢复基线水平,反映出局部脑血流增加和氧供需求上升的趋势。deoxy-Hb 在吞咽任务执行时出现相对下降,这与局部氧代谢的增加相一致。不同吞咽任务(如自发吞咽、随意吞咽、不同质地食物的吞

咽)可能诱导不同的激活模式。例如,主动吞咽比自发吞咽激活更广泛的脑区[30],而吞咽液体与吞咽固体食物相比可能引起不同程度的血流动力学变化[29]。

3.2. fNIRS 在吞咽障碍患者评估中的应用

3.2.1. 神经系统疾病相关吞咽障碍的脑功能变化

吞咽障碍(dysphagia)是多种神经系统疾病的常见并发症,尤其在脑卒中、帕金森病(PD)和肌萎缩侧索硬化(ALS)等疾病中较为常见[31]。研究发现,这些疾病导致的吞咽障碍与吞咽相关脑区的功能异常密切相关[32],fNIRS作为一种便携、无创的脑功能成像工具,为探索这些疾病中的脑功能变化提供了重要支持。

脑卒中患者由于大脑皮层或皮层下损伤,可能导致吞咽功能的丧失或减弱。fNIRS 研究发现,脑卒中患者在吞咽任务时,损伤半球的初级运动皮层(M1)激活减弱,而对侧半球可能出现代偿性增强[33]。此外,一些研究发现,部分脑卒中患者在吞咽任务时氧合血红蛋白(oxy-Hb)的峰值出现延迟,激活范围缩小,提示神经血管耦合受损[29]。

PD 患者的吞咽障碍主要与基底节功能异常及其皮层对吞咽控制的影响相关[34]。fNIRS 研究表明[35],PD 患者的吞咽任务通常伴随皮层激活减弱,特别是初级运动皮层(M1)、辅助运动区(SMA)和岛叶的 oxy-Hb 变化减少。此外,PD 患者在吞咽过程中可能表现出运动时序控制异常,反映在 oxy-Hb 峰值延迟和激活持续时间缩短[36]。

ALS 作为一种同时影响上、下运动神经元的疾病,其吞咽功能受累与皮层运动功能退化有关[37]。研究发现,ALS 患者的吞咽相关脑区(M1、SMA)在 fNIRS 监测下表现出 oxy-Hb 反应显著降低,提示皮层神经活动减弱[38]。此外,部分 ALS 患者在吞咽任务期间,oxy-Hb 变化模式的不稳定性增加,反映出吞咽功能逐渐衰退的过程[39]。

3.2.2. 吞咽康复治疗对脑功能的影响

吞咽障碍的康复治疗旨在通过不同的干预手段促进神经可塑性,恢复吞咽功能。fNIRS 作为一种实时监测大脑功能变化的工具,在评估康复治疗效果方面发挥了重要作用。

研究表明,系统性的吞咽训练(如口咽肌肉强化训练、功能性吞咽训练)可以增强吞咽相关脑区的激活程度[8]。fNIRS 研究发现,经过数周的吞咽训练后,患者在吞咽任务期间 oxy-Hb 反应增强,吞咽相关皮层网络的代偿性激活增加,提示皮层发生重塑[40]。

针刺治疗已被广泛用于吞咽障碍的康复,其作用机制可能涉及脑功能重塑和神经兴奋性调节。fNIRS 研究发现[41],针刺治疗可以增强 M1、SMA 和 PMC 的皮层激活,提示针刺可能通过调节皮层兴奋性改善吞咽功能。

经颅直流电刺激(tDCS)可通过神经调控促进吞咽恢复。fNIRS 研究显示,tDCS 可上调吞咽初级运动皮层(M1)的兴奋性,促进受损半球与健侧半球的皮层平衡[33]。

3.3. fNIRS 结合其他技术在吞咽功能评估中的研究

单一脑成像技术在吞咽功能评估中往往存在一定局限性,例如 fNIRS 受限于较浅的信号穿透深度,fMRI 受制于运动伪影,而 EEG 仅能提供有限的空间分辨率[20][42]。因此,近年来越来越多的研究尝试将 fNIRS 与 fMRI 或 EEG 结合,以提供更全面的吞咽功能评估。

有研究表明[23],fNIRS 与 fMRI 具有较高的信号一致性,尤其在初级运动皮层(M1)、初级感觉皮层(S1)及辅助运动区(SMA)这些吞咽关键脑区,二者的血氧动力学变化高度相关。因此,fNIRS 可以作为 fMRI 研究的补充,提供更自然状态下的吞咽功能评估,并用于临床床旁检测。

有研究发现[43],在吞咽启动阶段,EEG可检测到P300事件相关电位,而fNIRS可记录吞咽执行阶段的oxy-Hb变化,这种互补特性有助于深入理解吞咽障碍的病理生理机制。因此,将EEG事件相关电位与fNIRS血氧动力学信号结合,可以更全面地揭示吞咽过程中的神经活动模式。

随着人工智能的发展,机器学习(machine learning, ML)技术在医学影像分析中的应用逐渐增多,fNIRS结合机器学习算法已成为吞咽障碍评估的新兴方向。传统的吞咽障碍评估依赖临床观察和主观评分,而fNIRS结合机器学习可以实现吞咽障碍患者的自动分类。例如,研究利用支持向量机(SVM)和随机森林(Random Forest)等算法,对健康个体与吞咽障碍患者的fNIRS信号进行分析,发现基于fNIRS血氧动力学特征的分类准确率可达80%~90% [44]。

4. 研究挑战和争议

尽管fNIRS技术在吞咽功能评估中展现出巨大的应用潜力,但仍然面临诸多挑战和争议。fNIRS通过测量皮层局部的血氧动力学变化来间接反映神经活动,但其成像技术仍存在一定的局限性。首先,fNIRS信号易受头皮血流和颅骨结构的影响,尤其是在前额叶区域,血流动力学变化可能并非完全来源于神经活动,而是受头皮血流变化的干扰[45]。其次,fNIRS的空间分辨率相对较低(约1~3 cm),无法精确区分邻近的皮层功能区[46]。此外,由于光在组织中的穿透深度有限(一般为2~3 cm),fNIRS难以探测皮层下结构(如脑干或基底节)[42],而这些区域在吞咽功能调控中起着关键作用。因此,如何优化信号处理方法以提高数据质量,并结合其他成像手段(如fMRI、EEG)克服这些技术瓶颈,仍是当前研究的热点问题。

5. 结论与展望

综上所述,fNIRS作为一种非侵入性、动态监测的脑功能成像工具,在吞咽功能研究中展现出重要应用价值。现有研究已初步验证其可用于识别健康个体吞咽过程中的典型脑区激活模式、观察神经系统疾病相关的皮层功能变化,并用于评估吞咽康复训练的干预效果。其作为吞咽障碍早期筛查、疗效监测及康复指导的工具,具备良好应用前景。

然而,fNIRS技术仍存在信号穿透深度有限、空间分辨率不高、易受头皮血流干扰等问题,影响其独立应用于临床决策的可靠性。因此,未来研究应着重于以下几个可行方向:

(1) 多模态融合研究的开展:建议将fNIRS与fMRI联合用于验证皮层激活位置的空间一致性,与EEG结合提高对吞咽启动与执行过程的时空解析能力。

(2) 标准化任务范式与信号处理流程构建:需建立统一的fNIRS吞咽任务刺激范式(如重复唾液吞咽、自发吞咽、不同质地食物吞咽任务等),并制定数据预处理、伪迹剔除、激活指标提取等标准流程,提高研究结果的可重复性与跨机构对比能力。

(3) 结合机器学习实现吞咽障碍智能评估:未来可构建基于fNIRS信号特征(如oxy-Hb峰值、激活面积、延迟等)的分类模型,利用支持向量机、随机森林或深度神经网络,实现对吞咽障碍严重程度的分级与预后预测。

随着神经影像技术、信号处理方法和人工智能工具的不断发展,fNIRS将在吞咽功能评估领域中扮演愈发重要的角色。通过跨学科协作,有望推动fNIRS成为吞咽障碍精准评估与个体化干预的重要手段。

基金项目

齐鲁医派中医药特色技术——脑病促醒中医药特色技术(2022-JS03);山东省中医药重点学科——中医康复学。

参考文献

- [1] 窦祖林. 吞咽障碍康复指南[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2020.
- [2] Dobkin, B.H. (2021) Bradley and Daroff's Neurology in Clinical Practice. Elsevier.
- [3] 陈林林, 朱美红, 陶佳萍. 脑卒中后吞咽障碍患者误吸的临床研究进展 [J]. 中华物理医学与康复杂志, 2023, 45(12): 1144-1148.
- [4] Feng, M., Lin, Y., Chang, Y., Chen, C., Chiang, H., Huang, L., *et al.* (2019) The Mortality and the Risk of Aspiration Pneumonia Related with Dysphagia in Stroke Patients. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **28**, 1381-1387. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2019.02.011>
- [5] Ekkekakis, P. (2009) Illuminating the Black Box: Investigating Prefrontal Cortical Hemodynamics during Exercise with Near-Infrared Spectroscopy. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, **31**, 505-553. <https://doi.org/10.1123/jsep.31.4.505>
- [6] Klein, F., Kohl, S.H., Lühns, M., Mehler, D.M.A. and Sorger, B. (2024) From Lab to Life: Challenges and Perspectives of fNIRS for Haemodynamic-Based Neurofeedback in Real-World Environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **379**, Article ID: 20230087. <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0087>
- [7] Tsow, F., Kumar, A., Hosseini, S.H. and Bowden, A. (2021) A Low-Cost, Wearable, Do-It-Yourself Functional Near-Infrared Spectroscopy (DIY-fNIRS) Headband. *HardwareX*, **10**, e00204. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00204>
- [8] Cheng, I., Takahashi, K., Miller, A. and Hamdy, S. (2022) Cerebral Control of Swallowing: An Update on Neurobehavioral Evidence. *Journal of the Neurological Sciences*, **442**, Article ID: 120434. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2022.120434>
- [9] Hamdy, S., Aziz, Q., Rothwell, J.C., Singh, K.D., Barlow, J., Hughes, D.G., *et al.* (1996) The Cortical Topography of Human Swallowing Musculature in Health and Disease. *Nature Medicine*, **2**, 1217-1224. <https://doi.org/10.1038/nm1196-1217>
- [10] Humbert, I.A. and Joel, S. (2012) Tactile, Gustatory, and Visual Biofeedback Stimuli Modulate Neural Substrates of Deglutition. *NeuroImage*, **59**, 1485-1490. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.08.022>
- [11] 吴昊月, 罗红玲, 祝乐群, 等. 吞咽功能磁共振成像的研究进展[J]. 中国康复, 2020, 35(6): 325-328.
- [12] Dai, M., Qiao, J., Wei, X., Chen, H., Shi, Z. and Dou, Z. (2022) Increased Cortical-Medulla Functional Connectivity Is Correlated with Swallowing in Dysphagia Patients with Subacute Infratentorial Stroke. *NeuroImage: Clinical*, **35**, Article ID: 103104. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2022.103104>
- [13] Mao, L., Li, L., Mao, Z., Han, Y., Zhang, X., Yao, J., *et al.* (2016) Therapeutic Effect of Acupuncture Combining Standard Swallowing Training for Post-Stroke Dysphagia: A Prospective Cohort Study. *Chinese Journal of Integrative Medicine*, **22**, 525-531. <https://doi.org/10.1007/s11655-016-2457-6>
- [14] Zhang, W., Jin, H., Wang, F., Zhang, J., Bao, Y. and Wang, S. (2024) A Randomized Controlled Study Investigating the Efficacy of Electro-Acupuncture and Exercise-Based Swallowing Rehabilitation for Post-Stroke Dysphagia: Impacts on Brainstem Auditory Evoked Potentials and Cerebral Blood Flow. *Medicine*, **103**, e37464. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000037464>
- [15] Zhang, Y., Dou, Z., Zhao, F., Xie, C., Shi, J., Yang, C., *et al.* (2022) Neuromuscular Electrical Stimulation Improves Swallowing Initiation in Patients with Post-Stroke Dysphagia. *Frontiers in Neuroscience*, **16**, Article 1011824. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1011824>
- [16] Wyatt, J.S., Delpy, D.T., Cope, M., Wray, S. and Reynolds, E.O.R. (1986) Quantification of Cerebral Oxygenation and Haemodynamics in Sick Newborn Infants by near Infrared Spectrophotometry. *The Lancet*, **328**, 1063-1066. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(86\)90467-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(86)90467-8)
- [17] Liao, L., Tsytarev, V., Delgado-Martínez, I., Li, M., Erzurumlu, R., Vipin, A., *et al.* (2013) Neurovascular Coupling: In Vivo Optical Techniques for Functional Brain Imaging. *BioMedical Engineering OnLine*, **12**, Article No. 38. <https://doi.org/10.1186/1475-925x-12-38>
- [18] Nippert, A.R., Biesecker, K.R. and Newman, E.A. (2017) Mechanisms Mediating Functional Hyperemia in the Brain. *The Neuroscientist*, **24**, 73-83. <https://doi.org/10.1177/1073858417703033>
- [19] Scholkmann, F., Kleiser, S., Metz, A.J., Zimmermann, R., Mata Pavia, J., Wolf, U., *et al.* (2014) A Review on Continuous Wave Functional Near-Infrared Spectroscopy and Imaging Instrumentation and Methodology. *NeuroImage*, **85**, 6-27. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.004>
- [20] Li, R., Yang, D., Fang, F., Hong, K., Reiss, A.L. and Zhang, Y. (2022) Concurrent fNIRS and EEG for Brain Function Investigation: A Systematic, Methodology-Focused Review. *Sensors*, **22**, Article 5865. <https://doi.org/10.3390/s22155865>
- [21] Monciatti, A.M., Lapini, M., Gemignani, J., Frediani, G. and Carpi, F. (2025) Unpleasant Odors Compared to Pleasant Ones Cause Higher Cortical Activations Detectable by fNIRS and Observable Mostly in Females. *APL Bioengineering*,

- 9, Article ID: 016101. <https://doi.org/10.1063/5.0231217>
- [22] 彭昕珂, 贾飞阳, 刘静, 等. 健康成年人反复唾液吞咽测试期间的近红外脑功能成像[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(32): 5103-5107.
- [23] Knollhoff, S.M., Hancock, A.S., Barrett, T.S. and Gillam, R.B. (2022) Cortical Activation of Swallowing Using fNIRS: A Proof of Concept Study with Healthy Adults. *Dysphagia*, **37**, 1501-1510. <https://doi.org/10.1007/s00455-021-10403-3>
- [24] 邵佳慧, 李浩正, 王婷玮, 等. 基于功能性近红外光谱技术的吞咽相关任务大脑皮质功能偏侧化研究[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(5): 594-599.
- [25] Wilmskoetter, J., Bonilha, L., Martin-Harris, B., Elm, J.J., Horn, J. and Bonilha, H.S. (2019) Mapping Acute Lesion Locations to Physiological Swallow Impairments after Stroke. *NeuroImage: Clinical*, **22**, Article ID: 101685. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2019.101685>
- [26] Tae, W., Lee, S., Choi, S. and Pyun, S. (2021) Effects of Aging on Brain Networks during Swallowing: General Linear Model and Independent Component Analyses. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 1069. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79782-1>
- [27] Sörös, P., Inamoto, Y. and Martin, R.E. (2008) Functional Brain Imaging of Swallowing: An Activation Likelihood Estimation Meta-Analysis. *Human Brain Mapping*, **30**, 2426-2439. <https://doi.org/10.1002/hbm.20680>
- [28] Miyata, H., Tani, R., Toratani, S. and Okamoto, T. (2022) Effects of Tongue Pressure on Cerebral Blood Volume Dynamics: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study. *Brain Sciences*, **12**, Article 296. <https://doi.org/10.3390/brainsci12020296>
- [29] Kober, S.E. (2018) Hemodynamic Signal Changes during Saliva and Water Swallowing: A Near-Infrared Spectroscopy Study. *Journal of Biomedical Optics*, **23**, 1-7. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.23.1.015009>
- [30] Wen, X., Peng, J., Zhu, Y., Bao, X., Wan, Z., Hu, R., *et al.* (2023) Hemodynamic Signal Changes and Functional Connectivity in Acute Stroke Patients with Dysphagia during Volitional Swallowing: A Pilot Study. *Medical Physics*, **50**, 5166-5175. <https://doi.org/10.1002/mp.16535>
- [31] Luchesi, K.F., Kitamura, S. and Mourão, L.F. (2013) Management of Dysphagia in Parkinson's Disease and Amyotrophic Lateral Sclerosis. *CoDAS*, **25**, 358-364. <https://doi.org/10.1590/s2317-17822013000400010>
- [32] Hess, F., Foerch, C., Keil, F., Seiler, A. and Lapa, S. (2021) Association of Lesion Pattern and Dysphagia in Acute Intracerebral Hemorrhage. *Stroke*, **52**, 2921-2929. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.120.032615>
- [33] Zhang, Q., Shi, Y., Cheng, J., Chen, Y., Wang, J., Wang, X., *et al.* (2024) Impact of RTMs and ITBs on Cerebral Hemodynamics and Swallowing in Unilateral Stroke: Insights from fNIRS. *Medical Science Monitor*, **31**, e944521. <https://doi.org/10.12659/msm.944521>
- [34] Suttrup, I. and Warnecke, T. (2015) Dysphagia in Parkinson's Disease. *Dysphagia*, **31**, 24-32. <https://doi.org/10.1007/s00455-015-9671-9>
- [35] Gallois, Y., Neveu, F., Gabas, M., Cormary, X., Gaillard, P., Verin, E., *et al.* (2022) Can Swallowing Cerebral Neurophysiology Be Evaluated during Ecological Food Intake Conditions? A Systematic Literature Review. *Journal of Clinical Medicine*, **11**, Article 5480. <https://doi.org/10.3390/jcm11185480>
- [36] Koo, Y.W., Neumann, D.L., Ownsworth, T., Yeung, M.K. and Shum, D.H.K. (2022) Understanding the Neural Basis of Prospective Memory Using Functional Near-Infrared Spectroscopy. *Frontiers in Human Neuroscience*, **16**, Article 905491. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.905491>
- [37] Tahedl, M., Tan, E.L., Kleinerova, J., Delaney, S., Hengeveld, J.C., Doherty, M.A., *et al.* (2024) Progressive Cerebro-cerebellar Uncoupling in Sporadic and Genetic Forms of Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Neurology*, **103**, e209623. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000209623>
- [38] Kober, S.E. and Wood, G. (2014) Changes in Hemodynamic Signals Accompanying Motor Imagery and Motor Execution of Swallowing: A Near-Infrared Spectroscopy Study. *NeuroImage*, **93**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.02.019>
- [39] Ohshima, S., Koeda, M., Kawai, W., Saito, H., Niioka, K., Okuno, K., *et al.* (2023) Cerebral Response to Emotional Working Memory Based on Vocal Cues: An fNIRS Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, **17**, Article 1160392. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1160392>
- [40] Ma, X., Peng, Y., Zhong, L., Li, F., Tang, Z., Bao, X., *et al.* (2024) Hemodynamic Signal Changes during Volitional Swallowing in Dysphagia Patients with Different Unilateral Hemispheric Stroke and Brainstem Stroke: A Near-Infrared Spectroscopy Study. *Brain Research Bulletin*, **207**, Article ID: 110880. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2024.110880>
- [41] Yang, D., Shin, Y. and Hong, K. (2021) Systemic Review on Transcranial Electrical Stimulation Parameters and EEG/fNIRS Features for Brain Diseases. *Frontiers in Neuroscience*, **15**, Article 629323.

-
- <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.629323>
- [42] Tang, L., Kebaya, L.M.N., Vahidi, H., Meyerink, P., de Ribaupierre, S., Bhattacharya, S., *et al.* (2024) Predicting Cortical-Thalamic Functional Connectivity Using Functional Near-Infrared Spectroscopy and Graph Convolutional Networks. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 29794. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79390-3>
- [43] Blokland, Y.M., Farquhar, J.D.R., Mourisse, J., Scheffer, G.J., Lerou, J.G.C. and Bruhn, J. (2012) Towards a Novel Monitor of Intraoperative Awareness: Selecting Paradigm Settings for a Movement-Based Brain-Computer Interface. *PLOS ONE*, **7**, e44336. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044336>
- [44] Mao, S. and Sejdić, E. (2023) A Review of Recurrent Neural Network-Based Methods in Computational Physiology. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **34**, 6983-7003. <https://doi.org/10.1109/tnnls.2022.3145365>
- [45] Kirilina, E., Jelzow, A., Heine, A., Niessing, M., Wabnitz, H., Brühl, R., *et al.* (2012) The Physiological Origin of Task-Evoked Systemic Artefacts in Functional near Infrared Spectroscopy. *NeuroImage*, **61**, 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.02.074>
- [46] Almajidy, R.K., Mankodiya, K., Abtahi, M. and Hofmann, U.G. (2020) A Newcomer's Guide to Functional near Infrared Spectroscopy Experiments. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, **13**, 292-308. <https://doi.org/10.1109/rbme.2019.2944351>