·综 述·

脑卒中后吞咽障碍患者fMRI成像特征的研究进展

马静梅，曾明

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2025.09.029
【中图分类号】 R445.2 【文献标志码】 C 【文章编号】 1671-0800(2025)09-0987-04

脑卒中后吞咽障碍是脑卒中患者常见的并发症，发生率高达30%～65%[1-2]。吞咽困难会让患者同时遭遇营养不良与吸入性肺炎的严峻挑战，还影响其生活品质与康复进程[3-4]。近年来，功能磁共振成像（functional magnetic resonance imaging，fMRI）技术的快速发展为研究脑卒中后吞咽障碍的神经机制提供了新的视角。fMRI能够无创观察大脑活动，揭示吞咽过程中不同脑区的激活模式和功能连接变化[5]。本文旨在系统回顾脑卒中后吞咽障碍患者fMRI的特征研究进展，分析其在临床评估与康复治疗中的潜在应用价值。

1 吞咽障碍概述

吞咽是一个复杂的神经肌肉过程，涉及大脑皮层、脑干和多个颅神经的协调工作，包括三叉神经（第Ⅴ对颅神经）、面神经（第Ⅶ对颅神经）、舌咽神经（第Ⅸ对颅神经）、迷走神经（第Ⅹ对颅神经）和舌下神经（第Ⅻ对颅神经）等。脑卒中后吞咽障碍的发生与年龄和病情严重程度密切相关，研究指出年龄越大、病情越严重，其发生风险越高[6]。常见症状包括吞咽启动困难、食物滞留及误吸等，严重者甚至危及生命[7]。该疾病病理生理机制复杂，尚未完全明确，主要涉及吞咽相关神经通路的损伤和重组，包括皮质脑干束、脑干吞咽中枢及与吞咽相关的颅神经通路。研究表明，脑卒中可能导致吞咽中枢的功能抑制或兴奋失衡，破坏正常的吞咽神经网络[8-9]。

基金项目：浙江省医药卫生科技计划项目（2022KY378）；浙江省基础公益研究计划项目（LQ19H170001）
作者单位：314000 浙江省嘉兴，嘉兴市第二医院
通信作者：曾明，Email：zengming2012828@163.com

吞咽功能恢复进程中，神经可塑性扮演着关键角色，理解这些机制对于制定有效的康复策略至关重要。

2 脑卒中后吞咽障碍患者的fMRI成像特征

fMRI通过检测脑血流变化来反映神经活动[10]。其基本原理是血氧水平依赖（blood oxygen level dependent，BOLD）效应，即神经元活动增加会导致局部血流量和氧合血红蛋白浓度升高，从而引起MRI信号改变[11]。fMRI具有高空间分辨率、无辐射等优点，在吞咽这类复杂的神经过程研究中发挥重要作用[12]。在脑卒中后吞咽障碍研究中，任务态fMRI通过设计特定的吞咽任务，观察吞咽过程中大脑的激活模式[13]；静息态fMRI则用于研究吞咽相关脑区的功能连接和网络特性[14]。脑卒中后吞咽障碍的fMRI研究揭示多方面的神经影像学特征。静息态fMRI研究发现，吞咽障碍患者的功能连接出现异常，吞咽相关脑区之间的连接强度降低，而某些远隔脑区之间的连接可能增强，这些改变可能与吞咽功能的损伤和代偿有关[15]。此外，脑网络分析显示，吞咽障碍患者的默认模式网络、感觉运动网络等大尺度脑网络发生重组，这种重组可能与吞咽功能的恢复潜力相关。在任务态fMRI研究中，患者常表现出吞咽相关脑区的激活模式改变，包括初级感觉运动皮层、前扣带回、岛叶等区域的激活减弱或增强，反映脑卒中后吞咽神经网络的重组和代偿机制[16]。

2.1 静息态fMRI技术在脑卒中后吞咽障碍中的应用 静息态fMRI在脑卒中后吞咽障碍研究中的应用主要集中在功能连接分析、低频振幅（amplitude of low frequency fluctuatio，ALFF）和局部一致性（regional homogeneity，ReHo）分析等方面。通过整合多

种分析方法，临床研究得以深入探讨吞咽功能障碍患者脑功能活动的变化特征。

功能连接分析旨在借助计算不同脑区BOLD信号在时间维度上的相关性，揭示吞咽相关脑区之间的功能连接变化。脑卒中可能导致与吞咽功能相关的神经功能及解剖连接受损，进而使功能连接显著减弱，最终导致吞咽功能障碍[17]。研究发现，脑卒中后吞咽障碍常表现出吞咽相关脑区之间的连接强度降低，如初级感觉运动皮层、前扣带回、岛叶等区域之间的连接减弱[18]。Dai等[19]研究指出，在亚急性期，卒中后吞咽障碍患者的楔前叶、双侧中央前回以及右侧辅助运动区皮质与延髓之间的功能连接显著增强，这一现象可能反映了神经系统为弥补功能损伤而激活的代偿机制。

ALFF是依托静息态功能性磁共振成像（resting state functional magnetic resonance imaging，rs-fMRI）发展出的一种分析手段[20]。通过这种方法，能够探测大脑在静息状态下的自发神经活动，为脑功能研究输送关键信息。一般而言，患者脑神经元若自发活动减弱，体现为ALFF值降低；反之，若ALFF值升高，则意味着脑功能或许启动了代偿性机制。研究表明，脑卒中后吞咽障碍患者在不同脑区表现出显著的ALFF值变化，脑梗死后吞咽功能障碍患者吞咽相关脑区（如岛叶、前额叶皮层和延髓）的ALFF值显著降低，而部分非吞咽相关脑区（如视觉皮层）的ALFF值无明显变化[21]。ALFF值还可用于研究吞咽相关脑网络的特性和重组[22]。吞咽障碍患者的默认模式网络、感觉运动网络等大尺度脑网络发生重组，可能与吞咽功能的恢复潜力相关。患者表现出吞咽相关网络与其他认知网络之间的连接增强，表明吞咽障碍患者在脑功能恢复阶段，呈现出不同程度的代偿现象。

ReHo分析主要用于评估大脑局部区域神经活动的同步程度，若ReHo值降低，意味着神经元活动的一致性出现显著下滑。相关研究显示，脑卒中后吞咽障碍患者在左侧丘脑、左侧顶叶以及右侧颞叶部位的ReHo值有明显降低态势。与此同时，左侧顶叶和右侧颞叶的ReHo值与患者吞咽功能障碍的严重程度呈现出负相关，即ReHo值越低，吞咽困难程度越严重[23]。这一发现提示ReHo值可能作为一种潜在的神经影像学生物标志物，用于评估脑卒中后吞咽障碍的严重程度，并为临床诊断和康复干预提供重要参考依据。

2.2　任务态fMRI技术在脑卒中后吞咽障碍中的应用　卒中后患者发生吞咽障碍后，任务态fMRI技术可用于观察此类患者在执行吞咽任务时的大脑活动模式。相关研究此类患者的大脑激活模式与健康人存在差异，具体表现为吞咽相关脑区的激活减弱或异常[24]。研究指出，脑卒中患者在出现吞咽障碍后，进行吞咽时表现出较高的脑激活程度，相较于患侧，健侧脑激活程度更高[25]；但也有研究证实此类患者在吞咽时整个吞咽网络的脑激活程度均降低[26]。两项研究结果相反，推测与患者是否处于急性期及吞咽液体等因素相关。另有研究指出，脑卒中导致的吞咽障碍患者，在实施吞咽动作时，其患侧的运动功能区与前运动功能区激活程度有所下降；同时，健侧的运动功能区与前运动功能区激活程度则有所上升[27]。因此，任务态fMRI技术在脑卒中后吞咽障碍中的研究所得到的研究结论尚未完全统一，未来还需要更多途径对比的fMRI来分析此类患者的脑功能变化。此外任务态fMRI技术还可以与其他影像学方法相结合，如结构MRI、弥散张量成像（diffusion tensor imagine，DTI）等，以提供更全面的信息[28]。这些方法可以揭示脑结构的变化、功能连接的异常等，有助于更准确地了解吞咽障碍的神经机制。

3　应用fMRI成像特征观察不同治疗对脑卒中后吞咽障碍的影响

fMRI在脑卒中后吞咽障碍的评估和康复中展现出广阔的应用前景。在诊断和评估方面，fMRI可以提供客观的神经影像学指标，通过观察治疗前后大脑功能的患者，可分析不同治疗方式对脑卒中后吞咽障碍的影响。焦勇钢等[29]研究发现，对急性脑梗死吞咽障碍患者进行重复经颅磁刺激（repetitive transcranial magnetic stimulation，rTMS）治疗，患者双侧尾状核、双侧豆状核以及双侧额上回的脑区中ALFF值显著升高，同时临床吞咽困难量表（clinical dysphagia scale，CDS）和吞咽困难预后及严重程度量表（dysphagia prognosis and severity scale，DOSS）

评分也有所提升。此外，双侧尾状核、豆状核和额上回的ALFF值变化与CDS评分及DOSS评分的变化呈现显著相关性。这提示fMRI可用于评估患者rTMS治疗效果。陈栩铤等[30]研究表明，对健侧大脑半球舌骨上肌群皮质对应区施加高频rTMS后，fMRI显示其吞咽相关脑区的激活范围显著扩大，表现为在吞咽过程中，相关脑区的BOLD信号显著增强。这一研究成果表明，无论高频rTMS作用于患侧大脑半球，还是健侧大脑半球，高频rTMS均能有效增强吞咽相关脑区的神经活动，进而改善脑卒中后吞咽障碍患者的吞咽功能。另有一些研究报道针刺能激活此类患者的皮质吞咽中枢相关脑区，继而改善吞咽功能。郑雅思等[31]研究中，针对出现吞咽障碍的脑卒中患者，采取吞咽功能训练结合揿针埋针治疗后，患者在标准吞咽功能评估量表（SSA）的评分以及洼田饮水试验评分均有显著提升。同时，相较于治疗前，患者额叶、顶叶以及BA7区的激活频率大幅增加。曾明等[32]研究表明，基于镜像神经元理论的吞咽动作观察疗法，对改善脑卒中患者的吞咽功能障碍颇具成效。经该疗法治疗后，患者大脑中楔前叶、顶叶、中央后回、BA7区、BA5区、额叶及中央旁小叶等区域的激活范围明显扩大。此外，对吞咽障碍患者进行康复治疗后，多个与吞咽相关的脑功能区局部兴奋指标及功能连接改变[33]。提示康复治疗能够有效促进患侧脑区代偿区域的神经可塑性重塑，从而为吞咽功能的恢复提供支持。

4 总结与展望

近年来，fMRI技术因其无创、高时空分辨率等优势，在探索脑卒中后吞咽障碍的神经机制方面取得了显著进展。研究发现，脑卒中后吞咽障碍患者的fMRI成像特征表现为吞咽相关脑区的激活减弱或功能连接异常。这些发现为理解吞咽障碍的神经基础及制定针对性康复治疗方案提供了重要依据。通过fMRI技术，研究者能够观察到康复治疗对大脑活动的积极影响，进一步验证了康复治疗在促进吞咽功能恢复中的有效性。随着神经影像学技术的不断进步，fMRI在脑卒中后吞咽障碍领域的应用前景将更加广阔。未来研究可以进一步探索不同康复治疗方法对大脑活动模式的具体影响，以及大脑可塑性在吞咽功能恢复中的作用机制。此外，结合其他影像学技术，如弥散张量成像（diffusion tensor imaging，DTI）、近红外光谱成像（functional near-infrared spectroscopy，fNIRS）等，将能够更全面地揭示吞咽障碍的神经机制。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

[1] CHOY J, POURKAZEMI F, BOGAARDT H, et al. Factors influencing speech pathology practice in dysphagia after stroke: A qualitative focus group study[J]. Intl J Lang & Comm Disor, 2024, 59(4): 1599-1611.

[2] LIANG Y, DAI X, WEI B, et al. Development and validation of a GULP-based predictive model for dehydration in elderly patients with post-stroke dysphagia[J]. Br J Hosp Med, 2025, 86(1): 1-16.

[3] ZENG H J, CAI A, ZHAO W J, et al. Factors and predictive model for malnutrition in poststroke disabled patients: A multicenter cross-sectional study[J]. Nutrition, 2024, 123: 112423.

[4] ORTEGA O, GUIDOTTI L, YOSHIMATSU Y, et al. Swallowing and aspiration: How to evaluate and treat swallowing disorders associated with aspiration pneumonia in older persons[J]. Semin Respir Crit Care Med, 2024, 45(6): 678-693.

[5] KOBER S E, GROSSINGER D, WOOD G. Effects of motor imagery and visual neurofeedback on activation in the swallowing network: A real-time fMRI study[J]. Dysphagia, 2019, 34(6): 879-895.

[6] FAN Q X, ZHAO Y, ZHANG J R, et al. Factors influencing early diagnosis and poor prognosis of dysphagia after senile ischemic stroke[J]. J Mol Neurosci, 2024, 74(2): 31.

[7] KIM H H, PARK J S. Effects of effortful swallowing against kinesiology taping resistance on the swallowing function in patients with poststroke dysphagia: A randomized controlled trial[J]. Medicine, 2024, 103(21): e38344.

[8] LABEIT B, MICHOU E, TRAPL-GRUNDSCHOBER M, et al. Dysphagia after stroke: Research advances in treatment interventions[J]. Lancet Neurol, 2024, 23(4): 418-428.

[9] CHEN L, GAO H, WANG Z, et al. Vagus nerve electrical stimulation in the recovery of upper limb motor functional impairment after ischemic stroke[J].Cogn Neurodyn,2024,18(5):3107-3124.

[10] BALLER E B, VALCARCEL A M, ADEBIMPE A, et al. Developmental coupling of cerebral blood flow and fMRI fluctuations in youth[J]. Cell Rep, 2022, 38(13): 110576.

[11] CHAUDHARY S, AKTER N, PATHOUR T, et al. Development and characterization of hemoglobin microbubbles for acoustic blood oxygen level dependent imaging[J]. ACS Sens, 2024, 9(6): 2826-2835.

[12] WANG J, ZHANG M Q, WEN H M, et al. Correlation between swallowing and cognitive brain networks in older adults via functional MRI[J]. J Oral Rehabil, 2024, 51(12): 2588-2599.

[13] LIU W, GE W Y, ZHAO Q, et al. The neural plasticity and efficacy

of acupuncture for post-stroke dysphagia: Protocol for a randomized controlled trial with fMRI and DTI[J]. BMC Complementary Med Ther, 2024, 24(1): 357.

[14] DONG L H, MA W S, WANG Q, et al. The effect of repetitive transcranial magnetic stimulation of cerebellar swallowing cortex on brain neural activities: A resting-state fMRI study[J]. Front Hum Neurosci, 2022, 16: 802996.

[15] WANG J, YANG C, WEI X M, et al. Videofluoroscopic swallowing study features and resting-state functional MRI brain activity for assessing swallowing differences in patients with mild cognitive impairment and risk of dysphagia[J]. Dysphagia, 2023, 38(1): 236-246.

[16] ZENG M, WANG Z L, CHEN X T, et al. The effect of swallowing action observation therapy on resting fMRI in stroke patients with dysphagia[J]. Neural Plast, 2023, 2023: 2382980.

[17] QIN Y, TANG Y T, LIU X Y, et al. Neural basis of dysphagia in stroke: A systematic review and meta-analysis[J]. Front Hum Neurosci, 2023, 17: 1077234.

[18] QIAO J, WU Z M, CHENG X, et al. Effects of insular cortex on post-stroke dysphagia: A systematic review and meta analysis[J]. Brain Sci, 2022, 12(10): 1334.

[19] DAI M, QIAO J, WEI X M, et al. Increased cortical-medulla functional connectivity is correlated with swallowing in dysphagia patients with subacute infratentorial stroke[J]. NeuroImage Clin, 2022, 35: 103104.

[20] CHEN J, ZHAO M Q, HUANG L N, et al. Amplitude of low-frequency fluctuation after taste exposure revealed by resting-state fMRI[J]. Physiol Behav, 2023, 261: 114091.

[21] XU S, CHEN S, CHEN N, et al. Immediate neuroplastic changes in the cortex after iTBS on the cerebellum of stroke patients: a pre liminary fNIRS study[J]. Neural Plasticity, 2025, 2025(1): 1362222.

[22] TAE W S, LEE S, CHOI S, et al. Effects of aging on brain networks during swallowing: General linear model and independent component analyses[J]. Sci Rep, 2021, 11: 1069.

[23] LI L, LIU J Y, LIANG F X, et al. Altered brain function activity in patients with dysphagia after cerebral infarction: A resting-state functional magnetic resonance imaging study[J]. Front Neurol, 2022, 13: 782732.

[24] FU X F, LI H, YANG W, et al. Electroacupuncture at HT5+GB20 promotes brain remodeling and significantly improves swallowing function in patients with stroke[J]. Front Neurosci, 2023, 17: 1274419.

[25] LI S, LUO C, YU B, et al. Functional magnetic resonance imaging study on dysphagia after unilateral hemispheric stroke: A preliminary study[J]. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 2009, 80(12): 1320-1329.

[26] MIHAI P G, OTTO M, DOMIN M, et al. Brain imaging correlates of recovered swallowing after dysphagic stroke: A fMRI and DWI study[J]. NeuroImage Clin, 2016, 12: 1013-1021.

[27] SHEN M, ZHANG L L, LI C J, et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation as a therapy for post-stroke dysphagia: An overview of systematic reviews and meta-analysis[J]. Clin Rehabil, 2024, 38 (10): 1289-1305.

[28] BAILEY P D, ZACA D, BASHA M M, et al. Presurgical fMRI and DTI for the prediction of perioperative motor and language deficits in primary or metastatic brain lesions[J]. J Neuroimaging, 2015, 25 (5): 776-784.

[29] 焦勇钢,戴颖仪,胡芳芳,等. 重复经颅磁刺激对急性脑梗死后吞咽障碍的影响及与其功能磁共振成像变化的关系[J]. 实用医学杂志,2020,36(3):385-389,394.

[30] 陈栩铤,顾旭东,姚云海,等.单侧高频重复经颅磁刺激对脑卒中吞咽障碍及功能性磁共振成像的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志,2021, 43(12): 1105-1109.

[31] 郑雅思,杨婷,章晓峰,等. 揿针对脑卒中后吞咽功能障碍的改善作用及对功能性磁共振成像的影响[J]. 中国现代医生,2022,60 (16):93-96.

[32] 曾明,马静梅,顾旭东,等. 吞咽动作观察疗法对脑卒中患者吞咽功能和功能性磁共振成像的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2021,43(2):116-121.

[33] CHEN M Y, HUANG Z Y, CHEN Y, et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation on individualized spots based on task functional magnetic resonance imaging improves swallowing function in poststroke dysphagia[J]. Brain Connect, 2024, 14(10): 513-526.

收稿日期:2025-02-20

(本文编辑:吴迪汉)