

· 吞咽障碍的评估与治疗专题 · 综述 ·

DOI: 10.12464/j.issn.0253-9802.2025-0128

多模态镜像神经元干预策略对脑卒中后吞咽功能网络重塑的机制研究

高娟梅, 朱美红[✉], 赵剑平, 朱玮敏, 胡晨洁
(嘉兴大学附属第二医院康复科, 浙江 嘉兴 314000)

【摘要】 镜像神经元系统 (MNS) 是一种特殊类型的神经群, 其在个体执行特定动作或观察他人执行相似动作行为时均能被激活。近年来, 基于镜像神经元理论的康复干预方法在脑卒中后吞咽功能障碍的临床治疗中展现出潜在的应用价值。文章主要通过阐述镜像神经元的作用机制, 重点探讨动作观察疗法、运动想象疗法、镜像疗法、虚拟现实疗法、脑机接口技术等基于镜像神经元理论的康复技术在吞咽障碍治疗中的作用机制及应用效果, 以期优化脑卒中后吞咽障碍的康复治疗方案提供循证医学依据。

【关键词】 镜像神经元; 脑卒中; 吞咽障碍; 神经康复

Mechanistic study of network remodeling of swallowing function after stroke by multimodal mirror neuron intervention strategy

GAO Juanmei, ZHU Meihong[✉], ZHAO Jianping, ZHU Weimin, HU Chenjie
(Department of Rehabilitation, the Second Affiliated Hospital of Jiaxing University, Jiaxing 314000, China)
Corresponding author: ZHU Meihong, E-mail: zmeihong2007@126.com

【Abstract】 Mirror neuron system (MNS) is a specialized group of neurons that can be activated both when an individual performs a specific action and when observing others perform similar actions. In recent years, rehabilitation interventions based on mirror neuron theory have demonstrated promising clinical potential in treating post-stroke dysphagia. In this article, the mechanisms of mirror neurons were systematically reviewed, with an emphasis upon exploring the therapeutic mechanisms and clinical efficacy of various MNS-based rehabilitation techniques including action observation therapy, motor imagery therapy, mirror therapy, virtual reality therapy, and brain-computer interface technology in the management of dysphagia. These findings aim to provide evidence-based medical support for optimizing rehabilitation protocols for post-stroke dysphagia.

【Key words】 Mirror neuron; Stroke; Dysphagia; Neural rehabilitation

脑卒中是一种影响大脑各个区域的神经系统疾病, 是导致成年人残疾的主要原因, 而吞咽障碍是脑卒中后常见的并发症之一^[1], 可增加脱水、营养不良、吸入性肺炎和死亡的风险^[2]。因而吞咽障碍的康复治疗对于降低死亡率和改善脑卒中后患者的生活质量至关重要。目前的吞咽障碍治疗主要包括吞咽器官功能训练、神经肌肉电刺激、针刺疗法等外周干预手段。而脑卒中后吞咽功能障碍是由广泛的皮质和皮质下吞咽网络破坏所引起的^[3]。因此, 脑损伤的部位及吞咽过程中相关神经元网络的激活等均影响着脑卒中后患者吞咽功

能的恢复^[4]。近年来, 随着镜像神经元临床研究的不深入, 基于镜像神经元理论的中枢干预方法也逐渐得到学者们的关注。本文旨在对其相关作用机制、不同康复方法在吞咽障碍患者中的应用等进行综述, 为脑卒中后患者的吞咽功能康复治疗提供依据。

1 镜像神经元理论在脑卒中后吞咽障碍康复中的相关作用机制

镜像神经元系统 (mirror neuron system, MNS)

收稿日期: 2025-04-09

基金项目: 浙江省医药卫生科技项目 (2023KY1213, 2024KY1688, 2025KY360); 嘉兴市科技计划项目 (2025CGZ062)

作者简介: 高娟梅, 护师, 研究方向: 吞咽障碍, E-mail: 932010936@qq.com; 朱美红, 通信作者, 主任护师, 研究方向: 吞咽障碍, E-mail: zmeihong2007@126.com

是一种特殊类型的神经元,其能像镜子一样映射其他同类个体的动作,当个体执行给定的一个动作或观察到另一个个体以类似的目标形成动作行为时它就会被触发^[5],因而被命名为镜像神经元。而脑卒中后吞咽障碍的发病机制是脑血管异常引发的神经通路损害,涉及大脑皮层吞咽中枢、下行传导通路、延髓运动核团以及基底节等调控网络的损伤^[6]。基于神经可塑性原理,即神经系统为适应内部因素或外界刺激而重新组织其功能、结构和连接的能力。相关研究表明,中枢脑刺激可直接诱导皮层或小脑的可塑性变化^[7]。而脑卒中导致神经性吞咽障碍的康复被认为主要是由神经可塑性所驱动的。因此,可以利用神经的可塑性来改善由脑卒中引起的吞咽功能障碍。相关研究表明,镜像神经元系统是一种感觉运动连接通路,具有高度的可塑性,参与对动作和语言的理解^[8]。吞咽动作会激发相应的镜像神经元活动^[7],而镜像系统的“观察-执行机制”在动作观察、动作模仿、运动想象中起到非常重要的作用,其很好地统一了动作感知和动作执行^[5]。这种通过直接作用于中枢神经系统改善吞咽功能的观点具有神经生理学基础,而近年来应用于吞咽障碍康复治疗的动作观察疗法、运动想象疗法、镜像疗法、虚拟现实技术及脑机接口技术等皆基于该机制。

2 多模态镜像神经元干预策略在脑卒中后吞咽障碍中的应用研究

2.1 动作观察疗法

动作观察疗法是基于镜像神经元理论提出的新型康复方法,该方法要求患者认真观看示范视频,边观看边模仿练习,以激活镜像神经元的运动区和前运动区,促进动作再学习,建立动作记忆模式,从而促进其功能的恢复^[9]。神经生理学研究表明^[10],观察一种新的动作和执行该动作具有相同的功能性大脑网络,即观察他人的行为与执行该行为所激活的大脑区域及运动神经元是相似的,从而可以诱导出所观察到的相同行为。近年来,动作观察疗法被广泛应用于脑卒中后吞咽及肢体功能障碍的康复治疗^[11]。有研究纳入29名健康志愿者观看吞咽动作的视频时,其双侧中央前回(BA6)和右侧辅助前运动区SMA(BA6)被强烈激活,在这项研究中,动作观察激活了健康参

与者的镜像神经元和吞咽网络,表明日常生活中吞咽的动作观察可以激活参与吞咽动作执行所需的大脑区域,即观察进食行为可以诱导观察者执行吞咽相关的动作^[12]。Zeng等^[13]还通过功能磁共振成像发现观察吞咽行为可以激活镜像神经元系统,被激活的神经元与支配吞咽动作相关的大脑区域形成了有效的脑功能网络连接,从而使吞咽功能得到恢复,而吞咽功能的恢复可以再次激活镜像神经元系统,并促进大脑吞咽相关网络的重建,即吞咽动作观察疗法可有效改善脑卒中后患者的吞咽障碍。

2.2 运动想象疗法

运动想象被定义为动作的动态心理执行,而没有实际的运动执行^[14],即患者主动想象自己在执行某一个动作,而没有实际动作输出^[15]。在这个特殊的动态过程中,可以激活内在运动记忆中枢。而近年来吞咽运动想象疗法已被逐渐运用到吞咽障碍的康复治疗中。该疗法采用吞咽动作观察视频,结合视听刺激引导患者认知食物特性(如色、香、质地),并将信息传递至中枢神经系统整合分析。而运动想象是一种认知过程,在2022年的一项研究中,研究者们比较了运动想象和动作执行过程中被激活的大脑区域,发现运动想象中被激活区域(运动前皮层、初级运动皮层、初级和次级体感皮层、辅助运动区、尾状核、小脑外侧半球、小脑前半部、顶上叶、顶下叶和左背外侧前额叶皮层)的重要部分与动作执行相似^[16]。Kober等^[17]通过功能性磁共振成像扫描,研究11名健康成年人实施吞咽动作时结合动作想象训练。结果显示吞咽动作执行与想象均激活相似脑区网络,涉及双侧中央前回和中央后回等,与未执行运动想象任务相比,参与者能够增加反馈区域(左侧中央前回)以及其他大脑区域的活动,这些区域在吞咽过程中较为活跃。Wang等^[18]将37名参与者分为对照组和研究组,研究组在常规治疗的基础上增加观看事先录制好的视频环节,内容包括唇舌肌肉放松练习、健康人群进食、咀嚼、吞咽、饮水等图像。要求患者集中注意力观看视频,并利用所有感官充分想象视频中的食物和进食图像。最后得出运动想象疗法可作为辅助治疗改善患者的吞咽功能。也有相关研究,通过近红外光谱直接比较了吞咽动作的运动想象和运动执行期间的大脑激活模式^[19]。这些研究揭示了吞咽障碍患者在吞咽时伴随运动想象和吞咽动作执行的血流动

力学是相似的,从而得出吞咽的运动想象和执行吞咽动作期间的大脑激活模式在很大程度上也是相似的。这些研究结果表明,吞咽的运动想象是激活全脑吞咽网络的适当心理策略,这可能对将来吞咽障碍的治疗有积极作用。

动作观察和运动想象被认为能有效激活吞咽相关的大脑区域。而近年来,一些研究证明,动作观察和运动想象训练的结合比单独使用动作观察或运动想象疗法更有效^[20]。动作观察联合运动想象治疗本质上包括在训练中灵活整合运动想象过程,与观察阶段同步或交替进行^[21]。Xiong等^[22]将12名参与者分成3组,在脑磁图扫描期间进行了吞咽运动成像,研究证实了在动作观察诱导下的吞咽动作想象比单独进行吞咽想象更有效。这些研究表明动作观察疗法结合运动想象疗法可能对吞咽障碍的康复更加有效。最后得出动作观察疗法结合运动想象疗法对脑卒中后吞咽障碍的康复具有促进作用。然而,关于运动治疗前是否要求患者具备高水平的运动想象能力,目前尚无定论。现阶段主要依据患者的主观感受来判断,常用的评估工具包括动觉和视觉意象问卷(Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire, KVIQ)、运动意象问卷(Movement Imagery Questionnaire, MIQ)以及运动意象生动性问卷(the Vividness of Motor Imagery Questionnaire, VMIQ)^[23]。为了确保治疗效果,建议医务人员在患者接受运动想象治疗前,对其认知功能和运动能力进行评估。然而,目前几种常用的意象量表主要关注身体运动的意象,缺乏对吞咽意象的评估,因此需要开发包含吞咽运动意象的量表来全面评估患者。

2.3 镜像疗法

传统的镜像疗法是通过在患者双侧肢体正中矢状面放置一面镜子,通过镜子反映健侧肢体的活动,利用“镜像视错觉”诱导患者在活动过程中产生双侧肢体正常活动^[24]。而相关研究表明,视频镜像疗法对大脑皮层的激活相比传统镜像疗法更广泛^[25]。胡军等^[26]也通过实验证明,创新式的镜像疗法更优于传统镜像疗法。近年来,“镜像”视频或计算机图形系统已被逐渐应用于改善脑卒中后吞咽功能。该方法将视觉信息转换为动作行为,通过激活镜像神经元系统,促使患侧大脑神经网络连接部分修复,从而促进大脑重塑^[27]。其神经机制主要包括促进运动网络连接和激活大脑中的初级运动皮层^[28]。Mohan等^[29]使用功能性磁

共振成像的研究表明,吞咽相关的视听刺激可激活辅助运动区、运动前区、初级运动皮层及扣带回等皮质区域。关穗莲等^[30]将40例脑卒中后吞咽障碍患者平均分成2组,其中观察组在每日进餐前30 min进行视频学习,包括模拟进食3D视频、进食视频、饮水视频、吞咽器官训练视频,每日2次,7 d/周,共8周。该研究采用进食视频观察结合吞咽动作想象训练,促进大脑形成吞咽动作预演模式,实验证明,镜像视频疗法能有效促进脑卒中后吞咽障碍的康复。全爽等^[31]通过实验得出实施多感觉刺激联合镜像疗法可有效促进脑卒中后患者吞咽康复。而He等^[32]也通过meta分析得出镜像疗法在治疗脑卒中后吞咽障碍中发挥积极作用,且在脑卒中急性期的效果更优于恢复期。

2.4 虚拟现实疗法

近年来,虚拟现实疗法也成为脑卒中康复的一种新型治疗方法,该方法主要通过计算机模拟现实生活中的物体和活动的锻炼程序^[33],通过“游戏”等方式让患者参与治疗计划,使整个康复治疗更有趣味性,使患者更容易接受^[34]。与传统的动作观察方法相比,虚拟现实技术的优势在于其身临其境的视觉体验,采用第一人称视角模拟主观动作场景,使用户获得虚拟动作体验。这种虚拟现实环境下的视觉动作感知不仅能重塑神经活动模式,还可增强镜像神经元系统与感觉运动皮层的功能整合^[35]。该方法通过影响患者的视觉和本体感觉反馈机制,从而促进治疗效果^[36]。近年来,国内外研究显示,基于虚拟现实的生物反馈疗法将肌电反馈与虚拟情景训练相结合,可提高脑卒中后患者的舌骨移位,改善吞咽的节律性和时序性,从而有效地促进脑卒中后吞咽功能的恢复^[37-38]。王冉等^[39]将80例脑卒中后吞咽障碍患者分为对照组、磁刺激组、生物反馈组、联合治疗组,每组20例,联合治疗组额外增加使用蓝牙连接主机和平板电脑,让参与者完成相应的吞咽游戏训练。研究发现虚拟现实生物反馈联合重复经颅磁刺激可显著改善脑卒中后吞咽障碍,且效果优于只进行经颅磁刺激治疗者。另外有研究表明,虚拟现实疗法较常规训练更能有效改善脑卒中后认知及吞咽障碍。而认知功能的提升又可促进吞咽康复,帮助患者掌握吞咽技巧并执行治疗指令,从而增强康复效果^[40]。在其他康复疗法的基础上,结合虚拟现实技术可以有效提高患者康复的效率。因此,虚拟现实疗法可作为脑卒中后吞咽障碍的

辅助方法,更有效地促进吞咽功能的恢复。另外,相关研究表明^[41],虚拟现实疗法联合运动想象能更有效激活脑卒中后患者的运动皮层,也为脑卒中后患者的康复提供了新思路。

2.5 脑机接口技术

脑机接口作为一种新兴的神经康复手段,近年来在吞咽障碍治疗领域展现出良好的应用前景。脑机接口旨在不通过患者的神经和肌肉,由大脑信号实现大脑与外部设备之间的直接交互^[42],其通过捕捉中枢神经系统产生的脑信号转换成感觉反馈。而神经反馈是一种基于中枢神经活动的生物反馈技术,是脑机接口系统的关键环节之一。它形成一个闭环双向脑机接口系统,通过视觉、听觉或触觉反馈形式将神经活动实时反馈给患者,并利用操作性条件反射原理使患者学会自主增强或抑制神经活动。通过神经反馈训练实现大脑活动的内源性调节。脑机接口技术可准确解析大脑信号,识别患者的意图及大脑状态,实现大脑与外部设备的直接交流与控制,如用于精确控制假肢、恢复语言能力和改善认知功能等^[43]。Yang等^[44]通过对10名健康志愿者和1例脑卒中后吞咽障碍患者在安静环境且不执行任何动作的情况下,让其想象吞咽一杯水或食物等,通过双树复小波变换和自适应模型选择的吞咽脑电信号运动图像检测得出,基于吞咽运动想象的吞咽康复模型可以与合适的端部执行器耦合,激发吞咽动作。目前对于脑机接口在康复上的治疗主要用于脑卒中后的肢体康复,对于脑卒中后吞咽障碍、语言、意识恢复的研究相对较少,未来希望脑机接口能更广泛地运用于吞咽康复及其他领域。

3 总结与展望

本研究系统探讨了基于镜像神经元理论的多模态康复技术(如动作观察疗法、运动想象疗法、镜像疗法、虚拟现实疗法及脑机接口技术)在脑卒中后吞咽障碍中的应用机制及临床疗效。现有证据表明,镜像神经元通过“观察-执行”神经环路激活,促进吞咽相关皮层(如运动前区、辅助运动区及岛叶)的功能重组,进而改善吞咽协调性和安全性。与传统外周干预相比,镜像神经元调控的中枢干预策略具有神经可塑性靶向性强、患者依从性高、不良反应少等优势,尤其对恢复期患者的吞咽功能重建表现出显著疗效。

但是,现有研究仍存在若干待解决的问题:①吞咽障碍患者误吸风险较高,如在观察吞咽镜像视频时,可能会诱发与自身实际功能水平不匹配、不协调的吞咽动作,增加误吸风险;②部分患者因难以模仿视频标准动作而产生挫败感,从而降低其依从性;③研究对象局限性,现有研究样本主要集中于脑卒中后恢复期患者群体,该人群在注意力水平、认知功能及神经可塑性方面存在显著的个体异质性;④方法学标准化不足,尚未建立基于循证医学的标准化治疗参数体系(包括刺激强度、频率及疗程等),各研究中心采用的评估工具[如电视透视吞咽检查(video fluoroscopic swallowing study, VFSS)、纤维内镜吞咽评估(fibreoptic endoscopic evaluation of swallowing, FEES)]和干预方案缺乏统一性,且多数随机对照试验研究样本量不足,影响证据等级。基于上述问题,建议训练前需严格评估患者的吞咽功能(如VFSS/FEES筛查)。初期患者应在医护人员监护下进行,可先行运动想象吞咽训练,避免直接使用真实食物。同时采用渐进式训练,从简单动作开始,及时给予正向反馈,增强其信心,提高依从性。

未来研究应开展多中心、大样本的临床随机对照试验,建立基于患者分层的个体化治疗方案,制定标准化的操作规范。同时,基于镜像神经元系统的中枢性康复干预(如动作观察疗法)应与外周干预手段形成协同治疗方案,与传统吞咽功能训练(如Shaker训练)、物理因子治疗(如经颅直流电刺激/重复经颅磁刺激)生物反馈技术(如表面肌电监测)相结合。这种多模态联合干预策略有望通过中枢-外周协同作用机制,最大化促进吞咽神经网络的功能重组,为临床实践提供更可靠的循证依据。

利益冲突声明:本研究未受到企业、公司等第三方资助,不存在潜在利益冲突。

参考文献

- [1] LABEIT B, MUHLE P, DZRIEWAS R, et al. Diagnostics and treatment of post-stroke dysphagia[J]. *Der Nervenarzt*, 2023, 94(8): 676-68. DOI: 10.1007/s00115-023-01483-7.
- [2] MARCHINA S, PISEGNA J M, MASSARO J M, et al. Transcranial direct current stimulation for post-stroke dysphagia: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *J Neurol*, 2021, 268(1): 293-304. DOI: 10.1007/

- s00415-020-10142-9.
- [3] LABEIT B, MICHOU E, HAMDY S, et al. The assessment of dysphagia after stroke: state of the art and future directions [J]. *Lancet Neurol*, 2023, 22 (9): 858-870. DOI: 10.1016/S1474-4422 (23) 00153-9.
 - [4] SASEGBON A, CHENG I, LABEIT B, et al. New and evolving treatments for neurologic dysphagia [J]. *Drugs*, 2024, 84 (8): 909-932. DOI: 10.1007/s40265-024-02064-x.
 - [5] RIZZOLATTI G, SINIGAGLIA C. The mirror mechanism: a basic principle of brain function [J]. *Nat Rev Neurosci*, 2016, 17 (12): 757-765. DOI: 10.1038/nrn.2016.135.
 - [6] 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.
CHEN L L, ZHU M H, TAO J P. Clinical research progress of aspiration in patients with dysphagia after stroke [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2023, 45 (12): 1144-1148.
 - [7] CHENG I, HAMDY S. Metaplasticity in the human swallowing system: clinical implications for dysphagia rehabilitation [J]. *Neurol Sci*, 2011, 43 (1): 199-209. DOI: 10.1007/s10072-021-05654-9.
 - [8] ZHOU Z, CHEN X, LI Y, et al. Effects of integrated action and sensory observation therapy based on mirror neuron and embodied cognition theory on upper limb sensorimotor function in chronic stroke: a study protocol for a randomised controlled trial [J]. *BMJ Open*, 2023, 13 (3): e069126. DOI: 10.1136/bmjopen-2022-069126.
 - [9] SÁNCHEZ S V, ABUÍN P V, RODRÍGUEZ C I, et al. Effects of action observation training on the walking ability of patients post stroke: a systematic review [J]. *Disabil Rehabil*, 2022, 44 (24): 7339-7348. DOI: 10.1080/09638288.2021.1989502.
 - [10] UÇAR A T, ÇINAR B P, ALİCİOĞLU B, et al. Application of action observation therapy in swallowing rehabilitation: a randomised controlled study [J]. *J Oral Rehabil*, 2025, 52 (3): 320-331. DOI: 10.1111/joor.13902.
 - [11] SHAMILI A, HASSANI M A, AZAD A, et al. Effects of meaningful action observation therapy on occupational performance, upper limb function, and corticospinal excitability poststroke: a double-blind randomized control trial [J]. *Neural Plast*, 2022, 2022: 5284044. DOI: 10.1155/2022/5284044.
 - [12] JING Y H, LIN T, LI W Q, et al. Comparison of activation patterns in mirror neurons and the swallowing network during action observation and execution: a task-based fMRI study [J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 867. DOI: 10.3389/fnins.2020.00867.
 - [13] ZENG M, WANG Z, CHEN X, et al. The effect of swallowing action observation therapy on resting fMRI in stroke patients with dysphagia [J]. *Neural Plast*, 2023, 2023: 2382980. DOI: 10.1155/2023/2382980.
 - [14] TOUCHE R L, HERRANZ-GÓMEZ A, DESTENAY L, et al. Effect of brain training through visual mirror feedback, action observation and motor imagery on orofacial sensorimotor variables: a single-blind randomized controlled trial [J]. *J Oral Rehabil*, 2020, 47 (5): 620-635. DOI: 10.1111/joor.12942.
 - [15] BRUTON A M, HOLMES P S, EAVES D L, et al. Neurophysiological markers discriminate different forms of motor imagery during action observation [J]. *Cortex*, 2020, 124: 119-136. DOI: 10.1016/j.cortex.2019.10.016.
 - [16] CHEPUROVA A, HRAMOV A, KURKIN S. Motor imagery: how to assess, improve its performance, and apply it for psychosis diagnostics [J]. *Diagnostics*, 2022, 12 (4): 494. DOI: 10.3390/diagnostics12040949.
 - [17] KOBER S E, GRÖSSINGER 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. DOI: 10.1007/s00455-019-09985-w.
 - [18] WANG L, LI Y, LIU R, et al. The effect and mechanism of motor imagery based on action observation treatment on dysphagia in Wallenberg Syndrome: a randomized controlled trial [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2024, 60 (6): 938-948. DOI: 10.23736/S1973-9087.24.08471-5.
 - [19] KOBER S E, GRESSENBERGER B, KURZMANN J, et al. Voluntary modulation of hemodynamic responses in swallowing related motor areas: a near-infrared spectroscopy-based neurofeedback study [J]. *PLoS One*, 2015, 10 (11): e0143314. DOI: 10.1371/journal.pone.0143314.
 - [20] RANNAUD M D, PAPAXANTHIS C, GUILLOT A, et al. Motor imagery and action observation following immobilization-induced hypoactivity: a narrative review [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2022, 65 (4): 101541. DOI: 10.1016/j.rehab.2021.101541.
 - [21] EAVES D L, HODGES N J, BUCKINGHAM G, et al. Enhancing motor imagery practice using synchronous action observation [J]. *Psychol Res*, 2024, 88 (6): 1891-1907. DOI: 10.1007/s00426-022-01768-7.
 - [22] XIONG H, CHEN J J, GIKARO J M, et al. Activation patterns of functional brain network in response to action observation-induced and non-induced motor imagery of swallowing: a pilot study [J]. *Brain Sci*, 2022, 12 (10): DOI: 10.3390/brainsci12101420.
 - [23] WANG L, LI Y, LIU R, et al. The basic theory and application of the mirror neuron system in dysphagia after stroke [J]. *Behav Brain Res*, 2025, 481: 115430. DOI: 10.1016/j.bbr.2025.115430.
 - [24] 庄金阳, 贾杰. 镜像疗法在偏瘫型脑瘫患儿上肢功能康复中的应用研究进展 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2023, 45 (11): 1043-1047. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.11.021.
ZHUANG J Y, JIA J. Research progress on the application of mirror therapy in upper limb rehabilitation for children with hemiplegic cerebral palsy [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2023, 45 (11): 1043-1047. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.11.021.
 - [25] BONNAL J, OZSANCAK C, PRIEUR F, et al. Video mirror feedback induces more extensive brain activation compared to the mirror box: an fNIRS study in healthy adults [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21 (1): 78. DOI: 10.1186/s12984-024-

- 01374-1.
- [26] 胡军, 林源绍, 徐超群, 等. 镜像疗法联合神经肌肉电刺激对脑卒中偏瘫患者下肢功能恢复的影响[J]. 中华全科医学, 2022, 20(7): 1131-1134. DOI: 10.16766/j.cnki.issn.1674-4152.002540.
- HU J, LIN Y S, XU C Q, et al. Effect of mirror therapy combined with neuromuscular electrical stimulation on functional recovery of lower limbs in stroke patients with hemiplegia[J]. Chin J Gen Pract, 2022, 20(7): 1131-1134. DOI: 10.16766/j.cnki.issn.1674-4152.002540.
- [27] ZHOU Z, CHEN S, LI Y, et al. Comparison of sensory observation and somatosensory stimulation in mirror neurons and the sensorimotor network: a task-based fMRI study[J]. Front Neurol, 2022, 13: 916990. DOI: 10.3389/fneur.2022.916990.
- [28] BELLO U M, WINSER S J, CHAN C C H. Role of kinaesthetic motor imagery in mirror-induced visual illusion as intervention in post-stroke rehabilitation[J]. Rev Neurosci, 2020, 31(6): 659-674. DOI: 10.1515/revneuro-2019-0106.
- [29] MOHAN U, BABU S K, KUMAR K V, et al. Effectiveness of mirror therapy on lower extremity motor recovery, balance and mobility in patients with acute stroke: a randomized sham-controlled pilot trial[J]. Ann Indian Acad Neurol, 2013, 16(4): 634-639. DOI: 10.4103/0972-2327.120496.
- [30] 关穗莲, 曹全荣, 刘春龙, 等. 镜像视频疗法对脑卒中后吞咽障碍的疗效观察[J]. 中国康复, 2021, 36(11): 669-672. DOI: 10.3870/zgkf.2021.11.007.
- GUAN S L, CAO Q R, LIU C L, et al. Effect of mirror video therapy on dysphagia after stroke[J]. Chin J Rehabil, 2021, 36(11): 669-672. DOI: 10.3870/zgkf.2021.11.007.
- [31] 全爽, 邵秀芹, 陈盼, 等. 多感觉刺激联合镜像疗法在脑卒中吞咽障碍患者中的应用研究[J]. 实用临床医学, 2021, 22(5): 47-51. DOI: 10.13764/j.cnki.lcsy.2021.05.014.
- QUAN S, SHAO X Q, CHEN P, et al. Application of multi-sensory stimulation combined with mirror therapy in stroke patients with dysphagia[J]. Pract Clin Med, 2021, 22(5): 47-51. DOI: 10.13764/j.cnki.lcsy.2021.05.014.
- [32] HE K, WU L, NI F, et al. Efficacy and safety of mirror therapy for post-stroke dysphagia: a systematic review and meta-analysis[J]. Front Neurol, 2022, 13: 874994. DOI: 10.3389/fneur.2022.874994.
- [33] LUO Z, ZHOU Y, HE H, et al. Synergistic effect of combined mirror therapy on upper extremity in patients with stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. Front Neurol, 2020, 11: 155. DOI: 10.3389/fneur.2020.00155.
- [34] CHEN C H, KREIDLER T, Ochsenfahrt A. Rehago-a home-based training app using virtual reality to improve functional performance of stroke patients with mirror therapy and gamification concept: a pilot study[J]. Stud Health Technol Inform, 2020, 292: 91-95. DOI: 10.3233/shti220330.
- [35] FAN H, LUO Z. Functional integration of mirror neuron system and sensorimotor cortex under virtual self-actions visual perception[J]. Behav Brain Res, 2022, 423: 113784. DOI: 10.1016/j.bbr.2022.113784.
- [36] CHANG W K, LIM H, PARK S H, et al. Effect of immersive virtual mirror visual feedback on Mu suppression and coherence in motor and parietal cortex in stroke[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 12514. DOI: 10.1038/s41598-023-38749-8.
- [37] 张耀文, 万桂芳, 卫小梅, 等. 表面肌电生物反馈游戏训练治疗脑干损伤吞咽障碍患者的疗效观察[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2017, 39(12): 922-925. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2017.12.009.
- ZHANG Y W, WAN G F, WEI X M, et al. Effects of game-based surface electromyographic biofeedback training on dysphagia caused by brainstem injury[J]. Chin J Phys Med Rehabil, 2017, 39(12): 922-925. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2017.12.009.
- [38] LI C M, WANG T G, LEE H Y, et al. Swallowing training combined with game-based biofeedback in poststroke dysphagia[J]. PM R, 2016, 8(8): 773-779. DOI: 10.1016/j.pmrj.2016.01.003.
- [39] 王冉, 胡川, 王欣, 等. 基于虚拟现实的生物反馈联合重复经颅磁刺激对脑卒中恢复期患者吞咽障碍的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2022, 44(5): 407-411. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.05.005.
- WANG R, HU C, WANG X, et al. Effect of virtual reality-based biofeedback combined with repetitive transcranial magnetic stimulation on dysphagia in stroke patients during recovery phase[J]. Chin J Phys Med Rehabil, 2022, 44(5): 407-411. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.05.005.
- [40] 张方方, 孙洁, 许德慧, 等. 虚拟情景训练对卒中后认知障碍伴摄食吞咽困难患者的疗效观察[J]. 中国康复, 2022, 37(7): 392-395. DOI: 10.3870/zgkf.2022.07.002.
- ZHANG F F, SUN J, XU D H, et al. Therapeutic effect of virtual scenario training on post-stroke cognitive impairment patients with feeding and swallowing difficulties[J]. Chin J Rehabil, 2022, 37(7): 392-395. DOI: 10.3870/zgkf.2022.07.002.
- [41] CHOY C S, FANG Q, NEVILLE K, et al. Virtual reality and motor imagery for early post-stroke rehabilitation[J]. Biomed Eng Online, 2023, 22(1): 66. DOI: 10.1186/s12938-023-01124-9.
- [42] MRIDHA M F, DAS S C, KABIR M M, et al. Brain-computer interface: advancement and challenges[J]. Sensors, 2021, 21(17): 5746. DOI: 10.3390/s21175746.
- [43] 陈衍肖, 张喆, 王帆, 等. 一个新兴学科: 脑机接口医学[J]. 生物医学工程学杂志, 2024, 41(4): 641-649. DOI: 10.7507/1001-5515.202310028.
- CHEN Y, ZHANG Z, WANG F, et al. An emerging discipline: brain-computer interfaces medicine[J]. Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi, 2024, 41(4): 641-649. DOI: 10.7507/1001-5515.202310028.
- [44] YANG H, GUAN C, CHUA K S G, et al. Detection of motor imagery of swallow EEG signals based on the dual-tree complex wavelet transform and adaptive model selection[J]. J Neural Eng, 2014, 11(3): 035016. DOI: 10.1088/1741-2560/11/3/035016.

(责任编辑: 洪悦民 井思源)