·综述·

小脑重复经颅磁刺激促进脑卒中康复的神经网络机制研究进展

朱永欣[1,2]，付连慧[1]，凌佳晖[1,2]，杨俊聪[1,3]，李贤文[1]，彭艳[1]，许飒菲[1,2]，祁奇[1,2]

【摘要】 重复经颅磁刺激(rTMS)是一项无创神经调控技术，已广泛应用于脑卒中患者的康复治疗。小脑在人体的运动、吞咽和认知功能中发挥着关键作用，已成为rTMS干预的重要靶点。本文综述了小脑rTMS促进脑卒中后运动、吞咽及认知康复的神经网络机制。小脑rTMS通过“小脑-丘脑-大脑”环路对远端皮层及皮层下功能区实现远程调控。在运动控制方面，小脑rTMS通过调控“小脑-额顶叶网络”和“小脑-丘脑-基底节网络”，改善脑卒中患者的运动控制及肌张力。在吞咽功能方面，小脑rTMS通过调控“小脑-齿状核-丘脑-大脑网络”和“小脑顶核-延髓网络”增强吞咽的前馈控制与肌肉协调性。在认知功能方面，小脑rTMS通过与前额叶、边缘系统的交互，提升工作记忆、执行功能、情绪处理及奖励强化学习能力。综上，小脑rTMS通过多环路、网络化的调控机制，在脑卒中后运动、吞咽与认知康复中发挥重要作用。未来研究可进一步结合多模态神经调控与闭环反馈技术，推动小脑rTMS向个体化、精准化治疗方向发展。

【关键词】 脑卒中；小脑；重复经颅磁刺激；神经网络

【中图分类号】 R49；R743.3 **【DOI】** 10.3870/zgkf.2026.10.007

Advances in neural network mechanisms of cerebellar repetitive transcranial magnetic stimulation in stroke rehabilitation

Zhu Yongxin[1,2], *Fu Lianhui*[1], *Ling Jiahui*[1,2], *Yang Juncong*[1,3], *Li Xianwen*[1], *Peng Yan*[1], *Xu Safei*[1,2], *Qi Qi*[1,2]

1. *Shanghai Yangzhi Rehabilitation Hospital, Shanghai Disabled Persons' Federation Key Laboratory of Intelligent Rehabilitation Assistive Devices and Technologies, School of Medicine, Tongji University, Shanghai 201619, China*; 2. *School of Kinesiology and Health, Shanghai University of Sport*; 3. *Department of Rehabilitation Medicine, Zhangzhou Affiliated Hospital of Fujian Medical University*

【Abstract】 Repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) is a non-invasive neuromodulation technique that has been widely used in the rehabilitation of stroke patients. The cerebellum plays a key role in motor, swallowing, and cognitive functions, and has become an important target for rTMS intervention. This article systematically reviews the neural network mechanisms through which cerebellar rTMS promotes motor, swallowing, and cognitive recovery after stroke. Cerebellar rTMS achieves remote modulation of distal cortical and subcortical functional areas via the "cerebellum-thalamus-cerebral cortex" loop. Specifically, in terms of motor control, cerebellar rTMS modulates the "cerebello-frontoparietal network" and the "cerebello-thalamo-basal ganglia network" helping to improve motor control and muscle tone disorders in stroke patients. In swallowing function, it enhances feedforward control and muscular coordination by regulating the "cerebello-dentato-thalamo-cortical network" and the "cerebellar fastigial nucleus-medullary network". For cognitive rehabilitation, cerebellar rTMS interacts with the prefrontal cortex and limbic system to improve working memory, executive function, emotional processing, and reward-based reinforcement learning. In summary, cerebellar rTMS plays a significant role in post-stroke motor, swallowing, and cognitive recovery through multi-circuit, network-based regulatory mechanisms. Future research should further integrate multimodal neuromodulation and closed-loop feedback technologies to promote the development of cerebellar rTMS toward individualized and precision-based therapeutic applications.

【Key words】 stroke; cerebellar; repetitive transcranial magnetic stimulation; neural networks

基金项目：国家重点研发计划(2023YFC3604500)；国家临床重点专科建设项目(Z155080000004)；上海市卫生健康委员会面上项目(202340118)；上海市松江松江区科技攻关(医药卫生类)项目(2024SJKJGG108)

收稿日期：2025-10-13

作者单位：1.同济大学附属养志康复医院，上海市残联智能康复辅助器具与技术重点实验室，上海 201619；2.上海体育大学运动健康学院；3.福建医科大学附属漳州市医院康复医学科

作者简介：朱永欣(2001-)女，硕士研究生，主要从事神经康复方面的研究。

通讯作者：祁奇，qibuqi133@163.com

脑卒中是全球第二大死亡原因，我国脑卒中患者人数居世界首位，且患病率呈现持续上升的趋势[1]。脑卒中可能导致患者出现运动、吞咽、认知等功能障碍。脑卒中后功能恢复的基础在于神经可塑性，即脑组织为适应损伤而进行功能重组与连接重塑的内在能力[2]。虽然以传统运动疗法为代表的外周干预可通过肢体重复训练产生外周感知觉输入，但这种输入需经多级神经传导，其诱导中枢神经可塑性的信号强度、特异性和效率可能有限[3]。因此，联合中枢直接调控与外周感知觉输入，可能产生协同效应，更有效地促进神经可塑性，这已成为当前脑卒中康复研究的重要方向。重复经颅磁刺激（repetitive transcranial magnetic stimulation，rTMS）作为一种成熟的非侵入性神经调控技术，除调节皮层兴奋性外，还具有改善局部血流及促进神经可塑性蛋白代谢等多重效应[4]。神经影像学及动物模型研究表明，小脑与大脑皮层存在紧密联系，在运动控制、吞咽和认知过程中发挥重要作用[5]。rTMS 刺激小脑不仅可以影响小脑皮质，还可以调节大脑皮层相关功能区[6-7]。因此，小脑是目前脑功能调控的热门靶点，已广泛用于改善脑卒中患者的运动、吞咽和认知功能障碍。本文综述小脑 rTMS 促进脑卒中患者康复的神经网络机制研究进展，以期为制定精准调控方案提供参考。

1 rTMS 的理论模型

脑卒中后神经调控主要遵循大脑半球间竞争、代偿及双相平衡三种模型[8]。其中，大脑半球间竞争模型仍是当前临床应用的核心[9]。该模型指出，生理状态下双侧大脑半球通过胼胝体相互制约以维护平衡。然而，脑卒中后一侧大脑半球损伤则会打破这一平衡，导致患侧对健侧的抑制减弱，而健侧对患侧的抑制代偿性增强[8]。临床常采用低频刺激健侧或高频刺激患侧的策略重塑半球平衡。

2 小脑环路

小脑 rTMS 主要通过“小脑-丘脑-大脑”环路发挥调控作用。该环路信息传递主要由传出的齿状核-丘脑-皮质束和传入的皮质-脑桥-小脑束共同介导[10]。其中，齿状核-丘脑-皮质束是小脑向额叶、颞叶、顶叶传输信息最关键的一条通路[11]。小脑浦肯野细胞通过释放 γ-氨基丁酸（γ-aminobutyricacid，GABA）抑制小脑深部核团（如齿状核），进而减弱齿状核对对侧大脑皮层的兴奋性输出，即“小脑-大脑抑制”效应（cerebellar-brain-inhibition，CBI）[12]。rTMS 能够通过调节 GABA 能神经元活动，改变 CBI 强度。研究显示，连续性 θ 短阵脉冲刺激（continuous theta-burst stimulation，cTBS）可降低 CBI，增强大脑皮层兴奋性，而间歇性 θ 短阵脉冲刺激（intermittent theta-burst stimulation，iTBS）则产生相反效应[13]。在临床应用中，可通过调节刺激模式来评估和改善小脑-大脑通路的完整性，调控大脑半球兴奋性。例如，病变对侧小脑 iTBS 可诱发非病变侧初级运动皮层（primary motor cortex，M1）运动诱发电位（motor evoked potential，MEP）波幅增加[12]，同时减少病变侧皮层 MEP 波幅[14]。小脑不仅能向上位中枢（例如大脑皮层、基底节）传送和接收信号，还能直接调控皮质下行传导纤维以调节外周传出，可能影响的通路包括皮质脊髓束、网状脊髓束、红核脊髓束、前庭脊髓束和顶盖脊髓束[10]。Liao 等[6]发现，尽管小脑 iTBS 提升 MEP 振幅的效果不及刺激 M1 显著，但其改善下肢运动功能的效果优于刺激 M1，提示小脑 rTMS 不仅依赖上位中枢调节，还涉及对下行通路的干预，发挥更广泛的调控效能。

3 小脑 rTMS 促进脑卒中患者运动功能康复的神经网络机制

精确、稳定的运动控制依赖中枢神经系统构建的“内部前向模型”，以抵消感觉反馈的延迟。该模型根据运动指令预测动作将引发的感觉结果，从而在实际感觉反馈到达前预先调整运动输出，以补偿神经传导延迟[15]。小脑是构建与持续优化该模型的重要脑区。浦肯野细胞通过对比高频简单峰电位传递的运动预测信号与低频复杂峰电位传入的实际感觉反馈，计算预测误差，实时调整当前动作并更新内部模型，从而持续提升运动准确性[15-17]。脑卒中引起的小脑-皮层连接受损会导致运动预测与实际反馈之间匹配失调，引发平衡及协调功能障碍[18]。研究发现，抑制小脑活动会直接损害运动误差处理与预期性姿势调整能力[19-21]，而小脑 rTMS 能改善脑卒中后运动功能障碍[6, 7, 12, 22-24]。其机制可能与 rTMS 诱导小脑浦肯野细胞产生长时程增强样可塑性有关。刺激强化了浦肯野细胞对深部核团的抑制，进而提升小脑-丘脑-皮层通路中误差信号的传递效率，促进内部模型的重校准[15, 17]。从神经环路角度，小脑实现上述“预测-对比-更新”功能主要依赖以下两大核心网络：

3.1 小脑-丘脑-额顶叶网络 该网络涵盖小脑以及 M1[25]、初级躯体感觉皮层（primary somatosensory cortex，S1）[26]、后顶叶皮层（posterior parietal cortex，PPC）[7, 27-28]、前额叶皮层（prefrontal cortex，PFC）[29]和前外侧运动皮层（anterolateral motor cortex，ALM）等脑区[30]。其中，PPC 整合感觉信息与运动意

图，参与运动规划与认知控制，M1为运动指令的最终输出节点。研究发现，小脑在简单运动学习早期通过误差校准促进动作习得[25,27]，随后神经活动重心向PFC转移[31]。小脑对额叶皮层运动规划具有调控作用。短时记忆运动规划任务中额叶皮层的准备活动依赖小脑，抑制小脑顶核可损害规划准确性而不影响动作执行[32]。Zhu等[30]进一步发现额叶的ALM与小脑通过发散性、非闭环的连接共同编码运动控制，依托信息压缩机制生成低维误差信号反馈至皮层，使神经活动聚焦于任务相关模式[33]。小脑rTMS调节该网络的机制主要包括：①调节关键脑区兴奋性。研究发现，小脑iTBS能改善脑卒中后共济失调患者的姿势与步态，其机制可能与降低CBI、增强小脑半球与对侧M1的功能连接有关，进而提高M1的皮质内易化，该变化与步速等运动指标的改善相关[34]。此外，小脑iTBS可下调患侧M1兴奋性，有助于恢复受损的半球间平衡[14]。②增强低频振荡与环路耦合。研究发现，小脑iTBS在改善平衡功能的同时，可提高PPC电场强度、增强θ振荡活动，提示其可能通过强化低频段的脑桥-丘脑-皮层相互作用，促进空间运动学习[7]。③促进网络重组与提升神经信息处理效率。小脑iTBS可诱导长时程增强样可塑性，增强相互连接的运动网络中皮层活动，提高神经信息整合与处理效率[35]。有研究发现小脑刺激后双侧大脑半球间的功能连接呈现适应性抑制，有助于为必要的神经活动提供更多神经资源[36]。

3.2 小脑-丘脑-基底节网络 肌张力的调节依赖于小脑、基底节、脑干及大脑皮层之间的协同作用。近年研究证实，小脑与基底节之间通过齿状核、丘脑中央外侧核形成多突触、短潜伏期通路，协同参与肌张力调控[37]。在共济失调小鼠模型中，手术切除小脑可消除肌张力障碍发作；而使用神经毒素(6-羟多巴胺或喹啉酸)特异性损伤纹状体则加重症状[38]。微透析研究进一步发现，在小脑药理刺激诱发肌张力障碍的同时，纹状体多巴胺释放显著减少，提示肌张力障碍源于小脑-基底节网络的整体功能失调，而非单一结构病变[38]。多项临床研究表明，小脑rTMS可以改善脑卒中患者的肌张力异常[12,23-24]。刺激可能诱导相关神经环路的长时程可塑性改变，从而增强小脑与基底节之间的功能耦合。Chen等[12]发现小脑iTBS显著改善脑卒中患者上肢痉挛，然而并未显著改变皮质脊髓兴奋性，提示其疗效可能源于小脑对皮层下结构的调控。

基于上述机制，小脑神经调控呈现两大趋势：其一，小脑-大脑多靶点联合刺激，加强内部信息交流。小脑与M1的联合刺激有助于改善脑卒中患者的上肢运动功能障碍[39-40]。小脑联合辅助运动皮层(supplementary motor area，SMA)刺激则有助于改善平衡功能障碍[36]。其二，小脑rTMS与人机交互技术协同应用，例如脑机接口技术(brain-machine interface，BCI)，实现内部与外部信息交互。Abbasi等[41]探究了M1和小脑在BCI任务中的时间协调活动，发现两者局部场电位之间存在显著的3～6Hz相干性，并表明随着神经假肢学习，M1任务相关神经元与小脑之间的时间协调活动不断增强，且小脑活动对M1任务相关神经元活动的预测能力更佳。这项研究为未来BCI功能的优化提供了新方向。在BCI范式中融入小脑刺激或反馈信号，有望进一步优化BCI控制器，提升动作的协调性和精准度。

4 小脑rTMS促进脑卒中患者吞咽功能康复的神经网络机制

吞咽由包括大脑皮层、脑干和小脑在内的复杂双侧网络调节。与运动皮层的启动作用和延髓中枢模式发生器(central pattern generator，CPG)的反射调控不同，小脑主要参与吞咽的前馈控制与肌肉协调。研究表明，小脑可以介导吞咽相关的神经元，并在吞咽过程中协调肌肉活动[42]。Bina等[43]通过记录小鼠在舔水行为中的小脑浦肯野细胞活动发现，其简单峰电位可编码节律性舌部伸出运动，而复杂峰电位则响应运动轨迹的误差，并实时调整动作。基于上述研究，小脑rTMS已被多项临床研究证实可有效改善脑卒中患者的吞咽功能[44-46]。近年来研究发现小脑通过特定神经网络调节吞咽中枢，主要包括以下两个网络：

4.1 小脑-齿状核-丘脑-大脑网络 小脑皮层的信息首先传递至小脑齿状核，随后通过小脑上脚交叉投射至对侧大脑运动皮层[10]。rTMS可能通过增强齿状核-丘脑-皮层通路的兴奋性，从而提升皮层吞咽区对下行运动指令的精确度。Dong等[47]通过静息态功能磁共振成像发现，对小脑的单侧高频rTMS可增强脑桥、延髓和小脑的自发神经活动，并增加双侧大脑吞咽运动皮层的兴奋性，表明该刺激可同时影响脑干和皮层吞咽中枢。Sasegbon等[48]证实双侧小脑rTMS诱导皮层兴奋和逆转皮质“虚拟病变”比单侧更有效，可能归因于相关的神经核受双侧皮质延髓束的支配，使得双侧刺激能更有效地平衡与同步化整个皮层-脑干网络的兴奋状态，从而为解释小脑rTMS对伴有皮层下传导通路损伤的脑卒中患者具有显著疗效提供了机制依据[44]。

4.2 小脑顶核-延髓网络 双侧小脑半球的顶核与吞咽的脑干核团之间存在密切的解剖连接，其中孤束核

和疑核均是 CPG 的重要组成部分[49]。Hajipour 等[50]观察到，单纯性小脑受损常伴随咽反射的普遍缺失，提示咽反射与小脑之间可能存在潜在联系。小脑 rTMS(特别是针对顶核区)可能通过增强顶核对延髓 CPG 的输出，从而改善吞咽功能。这对于皮层性脑卒中患者具有特殊意义：当大脑皮层下行的随意控制通路受损时，强化小脑-脑干这一相对保留的反射调控环路，可作为重要的功能代偿途径。该机制为 rTMS 改善以协调障碍与安全性风险为特征的皮质性卒中后吞咽困难提供了理论支撑。

近年来，小脑 rTMS 在脑卒中患者吞咽恢复的临床研究仍在深入进行。研究发现，小脑控制吞咽的皮层改变可能存在偏侧化现象，且刺激位点可能存在特异性。例如，刺激优势小脑半球主要增加同侧小脑的自发神经活动，而同侧颞中回和对侧楔前叶的自发神经活动强度降低。非优势小脑半球的刺激则主要增加同侧额上回、距状沟和周围皮层以及对侧顶下小叶的兴奋性，这可能有助于吞咽过程中感觉的接收和处理以及感觉运动信息的整合[51]。然而，刺激小脑蚓部则可能抑制患者咽部大脑运动皮层区域及破坏吞咽行为，这种抑制作用类似于 CBI 效应[52]。以上研究提示小脑调控吞咽功能可能仍有未明确的神经通路，需依托高分辨率功能成像技术进一步解析。

5 小脑 rTMS 促进脑卒中患者认知功能康复的神经网络机制

传统观点认为大脑皮层是高阶认知功能(如注意力、记忆、决策等)的核心中枢。但近年研究表明，小脑在多种认知过程中发挥关键作用[10,53]。小脑参与了情绪感知、语言记忆、执行功能、注意力、社会认知及奖励强化学习等多种认知过程[54]。研究证实小脑 rTMS 有助于改善脑卒中患者的认知障碍[55]，其调控效应主要依托于以下四大核心网络：

5.1 小脑-丘脑-前额叶网络 该网络在工作记忆、执行功能、注意力及视觉运动学习等认知功能中起关键作用。小脑 rTMS 可经小脑-丘脑-前额叶皮层回路增强 PFC 的同步性。Du 等[56]发现小脑 rTMS 能显著增强 PFC θ 波段与 γ 波段的相位-振幅耦合，且耦合增强与工作记忆任务表现正相关。这种跨频率耦合增强了 PFC 在工作记忆刷新与维持中的信息存储精度。Yao 等[57]通过小脑 rTMS 改善患者认知功能，同时发现小脑 CrusII 与背外侧前额叶皮层、内侧额叶皮层的功能连接增强。这一现象可能源于小脑输出同步化了 PFC 等脑区间的低频振荡，从而优化了认知任务中不同脑区间的信息传输效率。在动态学习过程中，小脑的这种调节作用同样关键。Fong 等[58]通过脑电图研究发现，视觉运动适应性学习的保留程度与前额叶 P80 峰值振幅的变化有关，证实了学习过程中小脑-前额叶网络活动的动态增加。

5.2 小脑-边缘系统-额顶叶网络 该网络在情绪感知和动机处理中起重要作用。小脑参与情绪调控依赖于与边缘系统直接而丰富的解剖连接。病毒示踪研究发现，浦肯野细胞直接和广泛地连接到许多臂旁核神经元，这些神经元与杏仁核、隔核、基底前脑、扣带回建立广泛的单突触连接[59]。这意味着小脑不仅能处理身体状态，还能将这些内感受信息与外部情境整合，直接投射至情绪中枢。小脑 rTMS 可能通过调节该通路，改变边缘系统对情绪刺激的反应阈值。Zhang 等[60]的研究进一步证实了该网络在临床应用中的潜力。他们发现，对小脑外侧的 iTBS 能显著改善亚急性脑卒中患者的情绪与认知功能，且与边缘系统扣带回、额下皮层及额顶叶注意力网络的功能连接增强相关，其深层机制可能涉及小脑的兴奋性输出影响了边缘系统-皮层环路的神经振荡同步性，调节前扣带回与杏仁核之间的 θ 频段同步活动，进而缓解脑卒中后的抑郁与焦虑情绪[61]。

5.3 小脑-基底节网络与小脑-腹侧被盖区网络 小脑影响奖励强化学习可以通过两条独立于大脑皮层的直接通路实现，这挑战了仅通过皮层中转的传统观点。小脑齿状核通过双突触方式投射到纹状体，直接影响基底节处理的输入阶段，也可直接向腹侧被盖区发送兴奋性投射，从而有效处理和编码奖励强化学习[62-63]。临床研究发现，小脑-基底节网络(特别是小脑与尾状核头部的功能连接)在基底节梗死后呈现代偿性增强，且该网络的连接强度增强与认知功能恢复呈正相关[64]。损伤破坏了原有的皮层-基底节学习环路，而小脑通过上述直接通路，部分接管了奖励学习和习惯形成的功能，通过神经可塑性重组实现了功能代偿。

5.4 小脑内部网络 小脑具备平行于皮层的独立层级处理系统。Mello 等[65]采用层级认知控制任务范式，结合功能性磁共振技术和 PFC 神经活动控制，发现小脑仍能保持显著的层级中介效应。小脑功能性连接组通过小世界、模块化和分层方式进行组织，可明确区分出 3 个内在模块，即注意力/执行模块、默认模式模块和任务积极模块[66]。这意味着小脑的不同功能域能并行处理来自大脑不同认知专区的信息(如空间注意、语言序列、社会认知)，在其内部进行基于时序和错误校正的优化计算，再将优化后的结果反馈回相应大脑区域。因此，小脑内部网络并非简单的信息中继

站，而是一个高效的分布式专用处理器，对各种认知子成分进行“质量管控”与效率提升。

小脑的认知调控具有显著的解剖特异性。小脑内侧（主要包括蚓部和内侧半球）主要参与基础的情绪感知，而小脑外侧半球（尤其是Crus I/II区）涉及更高级的社会推理[66-67]。这种内外侧分化可能反映了小脑从感觉运动整合到高级认知调控的功能层级。此外，左右小脑半球也存在与大脑半球相似的功能偏侧化，主要表现为语言任务激活右后外侧小脑半球，空间任务激活左后外侧小脑半球[53]。小脑上下半区在工作记忆处理中也表现出功能分离。右小脑上部和下部参与不同的语言工作记忆，其中右小脑下部参与语音存储，右上部参与语音复述[68]。左小脑半球主要调控视觉工作记忆，左小脑上部影响视觉目标的整体加工效率，而左小脑下部则影响视觉信息的存储精度[68]。这种小脑认知调控的高度特异性可能解释rTMS疗效中产生的部分个体差异性[69]，未来的研究需结合精准定位以优化临床疗效。

6 总结与展望

本文深入总结了小脑rTMS在脑卒中康复中的神经网络机制。小脑通过与大脑皮层及皮层下结构构建的复杂神经网络，在脑卒中后运动、吞咽及认知功能重塑中发挥核心调控作用。未来研究需聚焦于个体化精准靶向与多模态技术整合，通过结合功能影像与闭环刺激技术，实现从传统静态干预向动态神经反馈调控的范式转变，从而构建更加高效、精准的脑卒中康复策略。

【参考文献】

[1] Tu WJ, Zhao Z, Yin P, et al. Estimated burden of stroke in china in 2020 [J]. JAMA Netw Open, 2023, 6(3): e231455.

[2] Murphy TH, Corbett D. Plasticity during stroke recovery: from synapse to behaviour [J]. Nat Rev Neurosci, 2009, 10(12): 861-872.

[3] Sheng R, Chen C, Chen H, et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation for stroke rehabilitation: insights into the molecular and cellular mechanisms of neuroinflammation [J]. Front Immunol, 2023, 14: 1197422.

[4] Sharbafshaaer M, Cirillo G, Esposito F, et al. Harnessing brain plasticity: the therapeutic power of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) and theta burst stimulation (TBS) in neurotransmitter modulation, receptor dynamics, and neuroimaging for neurological innovations [J]. Biomedicines, 2024, 12(11): 2506.

[5] Carey MR. The cerebellum [J]. Curr Biol, 2024, 34(1): R7-R11.

[6] Liao LY, Zhu Y, Peng QY, et al. Intermittent theta-burst stimulation for stroke: primary motor cortex versus cerebellar stimulation: a randomized sham-controlled trial [J]. Stroke, 2024, 55(1): 156-165.

[7] Koch G, Bonnì S, Casula EP, et al. Effect of cerebellar stimulation on gait and balance recovery in patients with hemiparetic stroke: a randomized clinical trial [J]. JAMA Neurol, 2019, 76(2): 170-178.

[8] Di Pino G, Pellegrino G, Assenza G, et al. Modulation of brain plasticity in stroke: a novel model for neurorehabilitation [J]. Nat Rev Neurol, 2014, 10(10): 597-608.

[9] Ntakou EA, Nasios G, Nousia A, et al. Targeting cerebellum with non-invasive transcranial magnetic or current stimulation after cerebral hemispheric stroke-insights for corticocerebellar network reorganization: a comprehensive review [J]. Healthcare (Basel), 2022, 10(12): 2401.

[10] Boonstra JT. The cerebellar connectome [J]. Behav Brain Res, 2025, 482: 115457.

[11] França C, de Andrade DC, Teixeira MJ, et al. Effects of cerebellar neuromodulation in movement disorders: A systematic review [J]. Brain Stimul, 2018, 11(2): 249-260.

[12] Chen Y, Wei QC, Zhang MZ, et al. Cerebellar intermittent theta-burst stimulation reduces upper limb spasticity after subacute stroke: a randomized controlled trial [J]. Front Neural Circuits, 2021, 15: 655502.

[13] Casula EP, Pellicciari MC, Ponzo V, et al. Cerebellar theta burst stimulation modulates the neural activity of interconnected parietal and motor areas [J]. Sci Rep, 2016, 6: 36191.

[14] Liao LY, Xie YJ, Chen Y, et al. Cerebellar theta-burst stimulation combined with physiotherapy in subacute and chronic stroke patients: A pilot randomized controlled trial [J]. Neurorehabil Neural Repair, 2021, 35(1): 23-32.

[15] Cullen KE. Internal models of self-motion: neural computations by the vestibular cerebellum [J]. Trends Neurosci, 2023, 46(11): 986-1002.

[16] Herzfeld DJ, Kojima Y, Soetedjo R, et al. Encoding of error and learning to correct that error by the Purkinje cells of the cerebellum [J]. Nat Neurosci, 2018, 21(5): 736-743.

[17] Kim LH, Heck DH, Sillitoe RV. Cerebellar functions beyond movement and learning [J]. Annu Rev Neurosci, 2024, 47(1): 145-166.

[18] 杨雅雯，王继先，潘文秀，等. 重复经颅磁刺激促进脑卒中后上肢运动功能恢复的影响因素分析 [J]. 中国康复，2021，36(1)：50-55.

[19] Huvermann DM, Berlijn AM, Groiss SJ, et al. Cerebellar single-pulse TMS differentially affects early and late error processing in reinforcement learning [J]. Psychophysiology, 2025, 62(11): e70178.

[20] Colnaghi S, Honeine JL, Sozzi S, et al. Body sway increases after functional inactivation of the cerebellar vermis by cTBS [J]. Cerebellum, 2017, 16(1): 1-14.

[21] Avanzino L, Ravaschio A, Lagravinese G, et al. Adaptation of feedforward movement control is abnormal in patients with cervical dystonia and tremor [J]. Clin Neurophysiol, 2018, 129(1):

319-326.

[22] Zeng Y, Ye Z, Zheng W, et al. Efficacy of cerebellar transcranial magnetic stimulation for post-stroke balance and limb motor function impairments: meta-analyses of random controlled trials and resting-state fMRI studies [J]. Cerebellum, 2024, 23(4):1678-1696.

[23] 翁雅婧，丰金香，谢丽娜，等. 芍药甘草汤联合小脑cTBS刺激调控对卒中后肌张力障碍及运动功能的影响 [J]. 按摩与康复医学，2023，14(10)：15-18.

[24] Li D, Cheng A, Zhang Z, et al. Effects of low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation combined with cerebellar continuous theta burst stimulation on spasticity and limb dyskinesia in patients with stroke [J]. BMC Neurol, 2021, 21(1): 369.

[25] Spampinato D, Celnik P. Multiple motor learning processes in humans: defining their neurophysiological bases [J]. Neuroscientist, 2021, 27(3): 246-267.

[26] Lindeman S, Hong S, Kros L, et al. Cerebellar Purkinje cells can differentially modulate coherence between sensory and motor cortex depending on region and behavior [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2021, 118(2): e2015292118.

[27] Babadi S, Vahdat S, Milner TE. Neural substrates of muscle co-contraction during dynamic motor adaptation [J]. J Neurosci, 2021, 41(26): 5667-5676.

[28] Prati JM, Pontes-Silva A, Gianlorenço ACL. The cerebellum and its connections to other brain structures involved in motor and non-motor functions: A comprehensive review [J]. Behav Brain Res, 2024, 465: 114933.

[29] Takakusaki K. Functional neuroanatomy for posture and gait control [J]. J Mov Disord, 2017, 10(1): 1-17.

[30] Zhu J, Hasanbegovi ćH, Liu LD, et al. Activity map of a cortico-cerebellar loop underlying motor planning [J]. Nat Neurosci, 2023, 26(11): 1916-1928.

[31] Fernandez L, Rogasch NC, Do M, et al. Cerebral cortical activity following non-invasive cerebellar stimulation-a systematic review of combined TMS and EEG studies [J]. Cerebellum, 2020, 19(2): 309-335.

[32] Gao Z, Davis C, Thomas AM, et al. A cortico-cerebellar loop for motor planning [J]. Nature, 2018, 563(7729): 113-116.

[33] Israely S, Ninou H, Rajchert O, et al. Cerebellar output shapes cortical preparatory activity during motor adaptation [J]. Nat Commun, 2025, 16(1): 2574.

[34] Bonnì S, Ponzo V, Caltagirone C, et al. Cerebellar theta burst stimulation in stroke patients with ataxia [J]. Funct Neurol, 2014, 29(1): 41-45.

[35] Koch G, Esposito R, Motta C, et al. Improving visuo-motor learning with cerebellar theta burst stimulation: Behavioral and neurophysiological evidence [J]. Neuroimage, 2020, 208: 116424.

[36] Xia Y, Tang X, Hu R, et al. Cerebellum-cerebrum paired target magnetic stimulation on balance function and brain network of patients with stroke: a functional near-infrared spectroscopy pilot study [J]. Front Neurol, 2022, 13: 1071328.

[37] Tewari A, Fremont R, Khodakhah K. It's not just the basal ganglia: Cerebellum as a target for dystonia therapeutics [J]. Mov Disord, 2017, 32(11): 1537-1545.

[38] Neychev VK, Fan X, Mitev VI, et al. The basal ganglia and cerebellum interact in the expression of dystonic movement [J]. Brain, 2008, 131(Pt 9): 2499-2509

[39] 曹志刚，冯海霞，李亚斌，等. 基于大脑半球之间多靶区间歇性θ爆发式磁刺激对脑卒中患者上肢功能的影响 [J]. 中国康复理论与实践，2022，28(5)：502-507.

[40] Rosso C, Moulton EJ, Kemlin C, et al. Cerebello-motor paired associative stimulation and motor recovery in stroke: a randomized, sham-controlled, double-blind pilot trial [J]. Neurotherapeutics, 2022, 19(2): 491-500.

[41] Abbasi A, Rangwani R, Bowen DW, et al. Cortico-cerebellar coordination facilitates neuroprosthetic control [J]. Sci Adv, 2024, 10(15): eadm8246.

[42] Schaefer JH, Luft F, Seiler A, et al. Prevalence, recovery and phenotype of dysphagia in patients with ischaemic cerebellar stroke [J]. Eur J Neurol, 2024, 31(7): e16303.

[43] Bina L, Ciapponi C, Yu SY, et al. Cerebellar control of targeted tongue movements [J]. J Physiol, 2025, 603(5): 1141-1169.

[44] Dai M, Qiao J, Shi Z, et al. Effect of cerebellar transcranial magnetic stimulation with double-cone coil on dysphagia after subacute infratentorial stroke: A randomized, single-blinded, controlled trial [J]. Brain Stimul, 2023, 16(4): 1012-1020.

[45] Liu Y, Yin S, Yang X, et al. Effects of cerebellar repetitive transcranial magnetic stimulation in the treatment of post-stroke dysphagia: a meta-analysis and systematic review of randomized controlled trials [J]. Eur Neurol, 2024, 87(2): 67-78.

[46] 钟立达，刘惠宇，鲍晓，等. 小脑重复经颅磁刺激治疗脑卒中后吞咽障碍的疗效观察 [J]. 中国康复，2021，36(2)：106-108.

[47] Dong L, Ma W, 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.

[48] Sasegbon A, Smith CJ, Bath P, et al. The effects of unilateral and bilateral cerebellar rTMS on human pharyngeal motor cortical activity and swallowing behavior [J]. Exp Brain Res, 2020, 238(7-8): 1719-1733.

[49] Reed MD, English M, English C, et al. The role of the cerebellum in control of swallow: evidence of inspiratory activity during swallow [J]. Lung, 2019, 197(2): 235-240.

[50] Hajipour M, Sobhani-Rad D, Zainaee S, et al. Dysphagia following cerebellar stroke: analyzing the contribution of the cerebellum to swallowing function [J]. Front Neurol, 2023, 14: 1276243.

[51] Wang B, Sun H, Pan X, et al. The effects of intermittent theta burst stimulation of the unilateral cerebellar hemisphere on swallowing-related brain regions in healthy subjects [J]. Front Hum Neurosci, 2023, 17: 1100320.

[52] Sasegbon A, Niziolek N, Zhang M, et al. The effects of midline cerebellar rTMS on human pharyngeal cortical activity in the intact swallowing motor system [J]. Cerebellum, 2021, 20(1): 101-115.

[53] Jacobi H, Faber J, Timmann D, et al. Update cerebellum and

cognition [J]. J Neurol, 2021, 268(10): 3921-3925.
[54] Reumers SFI, Bongaerts FLP, de Leeuw FE, et al. Cognition in cerebellar disorders: What's in the profile? A systematic review and meta-analysis [J]. J Neurol, 2025, 272(3): 250.
[55] Bonnì S, Motta C, Pellicciari MC, et al. Intermittent cerebellar theta burst stimulation improves visuo-motor learning in stroke patients: a pilot study [J]. Cerebellum, 2020, 19(5): 739-743.
[56] Du X, Rowland LM, Summerfelt A, et al. Cerebellar-stimulation evoked prefrontal electrical synchrony is modulated by GABA [J]. Cerebellum, 2018, 17(5): 550-563.
[57] Yao Q, Tang F, Wang Y, et al. Effect of cerebellum stimulation on cognitive recovery in patients with Alzheimer disease: A randomized clinical trial [J]. Brain Stimul, 2022, 15(4): 910-920.
[58] Fong PY, Spampinato D, Michell K, et al. EEG responses induced by cerebellar TMS at rest and during visuomotor adaptation [J]. Neuroimage, 2023, 275: 120188.
[59] Chen CH, Newman LN, Stark AP, et al. A Purkinje cell to parabrachial nucleus pathway enables broad cerebellar influence over the forebrain [J]. Nat Neurosci, 2023, 26(11): 1929-1941.
[60] Zhang H, Yang X, Yao L, et al. EEG microstates analysis after TMS in patients with subacute stroke during the resting state [J]. Cereb Cortex, 2024, 34(1): bhad480.
[61] Halverson HE, Kim J, Freeman JH. Dynamic changes in local activity and network interactions among the anterior cingulate, amygdala, and cerebellum during associative learning [J]. J Neurosci, 2023, 43(49): 8385-8402.
[62] Carta I, Chen CH, Schott AL, et al. Cerebellar modulation of the reward circuitry and social behavior [J]. Science, 2019, 363(6424): eaav0581.
[63] Yoshida J, Oñate M, Khatam L, et al. Cerebellar contributions to the basal ganglia influence motor coordination, reward processing, and movement vigor [J]. J Neurosci, 2022, 42(45): 8406-8415.
[64] Zuo L, Lan X, Zhou Y, et al. Cerebellar-cerebral circuits functional connectivity in patients with cognitive impairment after basal ganglia stroke: a pilot study [J]. Front Aging Neurosci, 2025, 17: 1478891.
[65] D'Mello AM, Gabrieli JDE, Nee DE. Evidence for hierarchical cognitive control in the human cerebellum [J]. Curr Biol, 2020, 30(10): 1881-1892.e3.
[66] Chen Z, Zhang R, Huo H, et al. Functional connectome of human cerebellum [J]. Neuroimage, 2022, 251: 119015.
[67] Ferrari C, Ciricugno A, Arioli M, et al. Functional segregation of the human cerebellum in social cognitive tasks revealed by TMS [J]. J Neurosci, 2023, 43(20): 3708-3717.
[68] Viñas-Guasch N, Ng THB, Heng JG, et al. Cerebellar transcranial magnetic stimulation (TMS) impairs visual working memory [J]. Cerebellum, 2023, 22(3): 332-347.
[69] Hong-Yu L, Zhi-Jie Z, Juan L, et al. Effects of cerebellar transcranial direct current stimulation in patients with stroke: a systematic review [J]. Cerebellum, 2023, 22(5): 973-984.

·外刊拾粹·

44岁以后肩痛和肩关节僵硬的风险因素

肩痛在西方国家的普通人群中是一个常见问题。先前的研究已经确定了肩痛的几个决定因素，尽管人群估计值仍不确定。本研究旨在更好地了解44岁及以上普通人群样本中肩痛或肩关节僵硬或两者兼有的风险因素。该研究样本由1645名个体组成，这些个体来自"健康2000"调查，这是芬兰44岁及以上成年人的全国代表性样本，在基线时没有肩部疼痛和僵硬症状。根据以往的研究，自变量包括年龄、性别、体重指数、教育水平、糖尿病、体力劳动暴露情况以及贝克抑郁量表得分。在整个队列中，在11年的随访中，2011年有23.2%的人报告有肩部疼痛但无僵硬，6.4%的人报告有肩部僵硬但无疼痛，6.3%的人报告同时有肩部疼痛和僵硬。有趣的是，年龄较大与肩部疼痛风险较低相关，但与有或无疼痛的肩部僵硬风险较高相关。患有糖尿病的人仅肩部僵硬风险较高。体力劳动因素预示着肩部疼痛和僵硬的综合风险增加。完全调整后的模型显示，独立风险因素包括体重超标和抑郁。结论：这项芬兰的纵向研究发现，肩部疼痛和僵硬的风险因素包括体重指数增加和抑郁。（李淑娴 韩璇 译）

Lahti V, et al. Risk factors for shoulder pain and stiffness in adults aged 44 and older: 11-year, longitudinal, population based study. Scand J Rheum, 2024:00:1-7: published ahead of print.

中文翻译 由WHO康复培训与研究合作中心(武汉)组织
本期由中国医科大学附属盛京医院 张志强教授主译编