

• 综 述 •

运动想象在脊髓损伤患者运动功能康复中的研究进展

陈柏茹 综述, 刘小琴[△] 审校

(重庆医科大学附属第二医院骨科-脊柱外科, 重庆 400010)

[摘要] 脊髓损伤是一种高发病率、高致残率、高经济负担的中枢神经疾病, 为家庭和社会带来沉重的经济负担。早期运动功能康复治疗对脊髓损伤患者十分重要, 大量数据证实, 运动想象疗法在脊髓损伤患者早期功能康复中有显著效果。因此, 该文对运动想象在脊髓损伤患者运动功能康复中的可能机制及研究进展进行综述, 以期对脊髓损伤患者运动功能康复实践提供理论指导依据。

[关键词] 运动想象; 脊髓损伤; 运动功能障碍; 综述

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2024.06.025 中图法分类号:R744.9

文章编号:1009-5519(2024)06-1022-05

文献标识码:A

Research progress of motor imagery in motor function rehabilitation in patients with spinal cord injury

CHEN Bairu, LIU Xiaoqin[△]

(Department of Orthopedics-Spine Surgery, the Second Affiliated Hospital of
Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China)

[Abstract] Spinal cord injury is a central nervous system disease with high incidence, high disability rate and high economic burden, which brings a heavy economic burden to families and society. Early motor function rehabilitation therapy is very important for patients with spinal cord injury. A large number of data confirm that motor imaging therapy has a significant effect in early functional rehabilitation of patients with spinal cord injury. Therefore, this article reviewed the possible mechanisms and research progress of motor imagery in the rehabilitation of motor function in patients with spinal cord injury, in order to provide theoretical guidance for the rehabilitation of motor function in patients with spinal cord injury.

[Key words] Motor imagery; Spinal cord injury; Motor dysfunction; Review

脊髓损伤(SCI)是一种破坏性的神经系统状态, 由于创伤性或疾病因素导致神经损伤水平以下的运动、感觉和自主功能受损, 使患者产生身体依赖、心理压力和经济负担^[1]。SCI通常为创伤性, 最常见原因为车辆事故(48.0%)、跌倒(21.0%)、运动伤害(14.6%)等, 由于脊椎的突然创伤而导致骨折和脊椎脱位, 并引起继发性损伤, 对脊髓组织造成进一步的化学和机械损伤, 其损伤程度和严重程度的主要决定因素是脊髓组织受压迫的初始破坏程度和持续时间^[2-3]。目前, 全球SCI发病率处于持续上升阶段。在过去30年, SCI患者从每百万人口236例增加到1298例^[4]。运动功能障碍作为SCI最主要的功能障碍之一, 患者早期肢体运动功能康复是当前研究的热点及临床治疗的难点。目前研究发现, 运动想象疗法可改善SCI患者的运动功能, 且针对性强, 可贯穿SCI患者康复始终, 是一种具有较大发展潜力的康复治疗

技术。现将其研究进展综述如下。

1 运动想象概述

运动想象是指一个动作的心理执行, 而不产生实际的动作, 其本质是一种认知过程^[5]。运动想象类型可分为动觉运动想象和视觉运动想象, 即执行运动想象可以从2个角度进行: 动觉运动想象(以第一人称角度)要求人们想象“在他/她身体里体验这种感觉, 就像他/她自己在做这个动作一样”, 被认为是视觉和动觉的性质; 视觉运动想象(以第三人称角度)是一种意象, 即以观察者的角度去看他/她执行想象的动作, 被认为是视觉性质^[6]。由于个体之间运动想象能力的差异性, 特别是神经功能缺陷的患者, 因此在实施运动想象干预前, 应进行运动想象能力测试^[6]。目前有几种工具可以评估运动想象能力, 其中一种是动觉和视觉想象问卷(KVIQ), 由于评估时不要求评估对象完成实际的运动执行, 因此适用于肢体功能障碍患

者,如脑卒中、帕金森病、SCI 或残疾人^[7-8]。

2 SCI 患者脑结构及功能改变

发生 SCI 时,由于中枢和周围神经系统的相互通信受到损害,这种情况通常由于传入或传出神经通路的创伤而导致残疾。以往研究倾向于 SCI 患者的通路是受损的,但大脑结构及功能仍然保持完整性。随着对 SCI 研究的深入和检查手段技术水平的提高,越来越多证据表明,SCI 后脑结构及功能会发生重塑,除脑部感觉运动皮层神经元会发生萎缩或丢失外,还存在大脑其他区域结构异常^[9-10]。GUSTIN 等^[11]采用弥散张量成像技术对 23 例慢性胸髓受损的患者和健康受试者进行全脑扫描,发现患者内侧前额叶和丘脑的结构或功能与正常人存在显著差异性。国内学者侯景明^[12]运用多模态磁共振技术观察发现,SCI 患者早期就已经存在脑结构和功能改变,验证了 SCI 患者脑运动感觉皮层(大脑双侧初级运动皮层、初级感觉皮层、辅助运动区、丘脑和皮质脊髓束大脑脚区域)存在结构性萎缩,导致初级感觉运动皮层自发神经活动功能降低,同时揭示了大脑运动感觉皮层萎缩程度与 SCI 程度、损伤水平高度呈正相关。此外,有研究表明,患者大脑运动感觉皮层萎缩速度越快,其运动功能预后越差^[13]。因此,如何减少或恢复大脑结构性损害对患者的运动功能康复有重要作用。SCI 后,大脑也会对发生的损害做出应对。JURKIEWICZ 等^[14]观察发现,SCI 患者的双侧小脑及右侧眶额叶的自发神经活动增强,可利于进一步产生自发性运动;初级感觉运动皮层与相应大脑半球内其余运动脑区(运动前区、辅助运动区、丘脑、小脑)会生成新的连接纤维,这些新生的连接纤维可构建新的神经传导通路,从而有利于功能的恢复,这可能是大脑对 SCI 后的代偿性反应。这些发现对为 SCI 患者制定当前和未来的康复干预措施具有重要意义。

3 运动想象应用于 SCI 的作用机制

运动想象一直是许多领域感兴趣的课题,这种兴趣在很大程度上源于运动想象可以促进学习运动技能及运动功能康复。大量证据表明,运动想象训练对运动员、健康人和神经系统疾病患者的运动表现有积极影响^[15-16]。有研究对 10 例完全四肢瘫痪或截瘫的 SCI 患者和 10 名健康对照受试者进行舌头和脚的运动想象训练,结果表明,SCI 患者大脑皮层网络的激活与特定的运动想象内容一致,说明大脑运动系统功能可以独立于自主运动控制和外周反馈进行调节,证实运动想象训练对 SCI 患者的运动功能康复有益^[17]。但运动想象治疗 SCI 的机制仍需要进一步阐明。

目前,运动想象疗法的核心理论主要有运动模拟理论、运动认知模型、感知-认知模型和效果想象模型。

运动模拟理论提出,运动想象和运动执行使用相同的神经过程,即共享运动准备与执行的神经网络,直到实际运动点产生分路,下游对肌肉的运动命令在运动想象中通过某种过程(亚阈值激活、活跃的抑制性神经元或动作阈值提高)被抑制执行^[18]。因此,执行一个动作和执行一个动作的想象在功能上是等同的,运动想象是运动执行内部阶段的体验,仅仅是没有可见的显性运动^[19],该理论也得到了较大范围的支持^[20]。运动认知模型是 GLOVER 等^[21]提出的一种新的运动想象理论,其摒弃了运动模拟理论提出的“功能对等”观点,认为运动想象和执行使用相同的运动规划机制,但执行点有所不同,产生的想象具有不同的认知需求。在运动缺乏外部感觉输入的情况下,运动想象被认为使用不同的认知路径来主动地创建、阐述、控制内部产生多感觉图像。感知-认知模型认为,简单动作的运动计划(如弯曲手指)及其感官结果(如弯曲手指的外形和感受)是紧密关联的,并作为单元存储在神经中,因此选择运动计划同样会激活其相关感觉,这些运动及感觉单元被称为基本动作组件,被认为是创建所有复杂运动计划的基础,运动想象被视为检索基本动作组件并将其组织为运动计划的有意识体验^[22]。另一个由 BACH 等^[23]提出的效果想象模型颠覆了关于运动想象的传统思维:先前的理论认为运动想象发生在运动计划过程之后或过程中,效果想象模型认为想象也是运动计划之前目标选择过程的重要组成部分。与传统的运动想象概念不同,传统的运动想象涉及在心理上模拟运动计划的经历,效果想象模型认为的想象涉及通过联想来唤醒行动的预期效果,以激活相关的运动计划。例如,要拿起一个东西,你首先想到拿着东西的形象,这会激活去拿东西的一个运动计划。

4 运动想象在 SCI 患者运动功能康复中的应用

4.1 对神经、肌肉功能的影响

SCI 后,脑与周围效应器之间的神经通路受到破坏,患者肢体常处于无法自主活动状态,不能够参与到传统康复训练中去,运动想象可以通过激活运动相关的大脑区域,刺激神经功能可塑,帮助保持神经通路的活跃性,从而有助于保持或恢复运动功能。JEANNEROD 等^[24]回顾了 15 项功能磁共振成像研究,发现运动想象增加了中央和扣带回、辅助运动区和顶下小叶的激活,证实了运动想象可促进中枢神经可塑性发展和功能重组,从而促进患者运动功能康复。一项对 6 例 C6~7 四肢瘫痪患者和健康对照者的研究中^[25],参与者进行每次 45 min,每周 3 次,持续 5 周的几何形状想象训练,记录下所有参与者伸手抓握时的运动学记录和伸腕时的脑磁图。最终结果显示,SCI 患者在感觉运动皮质

活动中表现出比对照组更高的体素数量,同时相较于干预前,SCI 患者的伸腕角度也得到增加,表明运动想象训练可以改善 SCI 患者的上肢抓握能力,并导致感觉运动皮质的可塑性变化。此外,SCI 后,患者肌肉可能会面临萎缩和失去功能。运动想象可以在一定程度上通过增加皮质脊髓的兴奋性来增加肌肉力量,帮助患者维持肌肉功能,减缓肌肉萎缩的进程。1 例 C6 颈髓损伤患者接受了肱二头肌肌腱转移到肱三头肌肌腱的手术,并且在 2 周的运动想象训练中表现出肘部屈肌和伸肌的力量增加^[16]。这些结果均表明,运动想象对 SCI 患者的神经、肌肉功能具有积极效益,将运动想象纳入 SCI 运动功能康复中具有潜在的价值。

4.2 对疼痛的影响 疼痛是 SCI 后的常见并发症,最常见的疼痛类型是伤害性和神经性疼痛。疼痛是抑制患者功能恢复的主要风险因素之一,其治疗也具有一定的挑战性。有学者提出,由于 SCI 导致运动输出和感觉反馈之间的不匹配,参与运动控制的皮质结构可能会重组,这些变化反过来导致疼痛体验^[26]。纠正精神身体表征、感觉-运动整合和伤害性感觉之间的这种不协调可能有助于疼痛的治疗^[27]。运动想象期间活跃的大脑区域(包括刺激运动皮质)和运动本身在很大程度上是重叠的,因此这一技术可以用作治疗疼痛的非药物方法之一^[6]。OPSOMMER 等^[6]对 18 项研究(10 项随机对照试验、8 项观察性研究)进行了系统评价,结果显示,虽然运动想象干预的方案是不同的,但进行 8~20 min 的运动想象训练可用于改善疼痛,30~60 min 可用于改善运动功能。由于 SCI 人群、干预措施和测量结果的高度异质性,使得很难总结出最佳的、具体的运动想象训练方案。此外,目前运动想象干预对疼痛的影响仍具有一定争议:有的研究显示疼痛减轻^[28],有的研究显示疼痛增加^[29],有的研究显示对疼痛没有影响^[30]。这些差异的背后可能有许多原因,例如患者对疼痛的感知能力强弱、社会压力源、患者对治疗的期望大小或运动想象训练方法本身存在差异等。因此,有必要开展进一步的临床试验,评价运动想象干预作为 SCI 患者疼痛辅助治疗的有效性。

4.3 脑机接口(BCI) BCI 技术通过记录和解码用户大脑皮层活动产生的神经生理信号,对其进行处理并将其转换为计算机等外部设备识别的信号,实现交互和控制^[31]。在一些情况下,运动想象可以与 BCI 技术相结合,使患者能够通过想象运动来控制外部设备或假肢,实现部分运动恢复。一项研究中,患有 C4 和 C5 颈髓损伤导致四肢瘫痪的患者已经逐渐能够通过不能完成的动作进行运动想象训练来控制抓握 BCI 设备,通过 5 个月的训练后,想象的足部运动感

觉节律与健康对照组参与者一致^[32]。运动想象-BCI 的发展无疑是运动功能障碍患者的福音,但由于进行运动想象心理活动的患者为控制 BCI 设备的关键,患者运动想象能力水平的高低决定着是否可以有效实施运动想象-BCI 功能^[33],因此,还需要对患者进行运动想象能力的训练。

4.4 虚拟现实技术(VR) VR 是一种由计算机生成的三维沉浸式环境,将运动想象与 VR 相结合的一种新型辅助康复技术,近年来发展迅速,目前被逐步运用于神经系统疾病的康复治疗中^[34]。基于 VR 的运动想象疗法能够逐渐增加任务的复杂性,可提供视觉、听觉、运动和认知康复方面的刺激和训练,同时保持任务训练的吸引力和娱乐性,并提供积极的、基于奖励的反馈,这对于提高患者的注意力和参与积极性,防止患者沮丧至关重要^[35]。持续的运动想象训练会导致患者训练期间疲劳,进而使患者失去注意力和兴趣,影响训练效果,因此,VR 可以改善运动想象疗法的不足之处。此外,VR 还可缓解患者焦虑、抑郁等负面情绪。MARESCA 等^[36]报道了 1 例 60 岁的不完全性颈 SCI 患者接受 VR 康复系统训练后,对患者的认知领域和运动功能康复、平衡改善及焦虑、抑郁的减少均产生了积极影响。VR 还可以为运动想象训练提供视觉、听觉引导,使患者沉浸在运动想象之中,解决患者难以将想象训练扩展到其他身体部位或难以完成目标想象运动的难题。JEONG 等^[37]对 11 例受试者采用 VR 引导其运动想象并对运动想象的情况进行了评估,结果显示,与单纯运动想象相比,基于 VR 的运动想象方法更利于受试者产生脑皮层信号,运动想象效果增强。

5 小 结

运动想象疗法可积极发挥患者的主观能动性,促进 SCI 患者脑功能及运动功能恢复,是一种具有较大潜力和价值的康复治疗方法。随着技术的发展,运动想象与 BCI、VR 等相结合,可弥补传统运动想象疗法的不足,能够加强运动想象的效果,进一步丰富了目前的康复手段。但对于运动想象治疗 SCI 运动功能的作用机制仍需要更多高质量的研究来进一步解答。且目前大多数临床研究中的运动想象训练方案内容不尽一致,没有确切的最佳干预时间、频率和强度,缺乏高质量的研究及制定规范的训练方案来提高运动想象疗法有效性的可信度,以及缺乏后续的随访,运动想象疗法的运动康复效果是否会随着时间的推移而保持,仍不清楚,也需要未来的研究中加入长期的随访进行进一步的评估。

参考文献

[1] PERROUIN-VERBE B, LEFEVRE C, KIENY

- P, et al. Spinal cord injury: A multisystem physiological impairment/dysfunction[J]. *Rev Neurol(Paris)*, 2021, 177(5):594-605.
- [2] VAN DEN HAUWE L, SUNDGREN P C, FL-ANDERS A E. Spinal trauma and spinal cord injury(SCI)//[M/OL]. *Diseases of the Brain, Head and Neck, Spine 2020 — 2023; Diagnostic Imaging, Cham(CH)*: Springer, 2020: 231-240. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32119240/>.
- [3] ANJUM A, YAZID M D, FAUZI DAUD M, et al. Spinal cord injury: Pathophysiology, multi-molecular interactions, and underlying recovery mechanisms[J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(20): 7533.
- [4] TSIVELEKAS K, EVANGELOPOULOS D S, PALLIS D, et al. Angiogenesis in spinal cord injury: Progress and treatment[J]. *Cureus*, 2022, 14(5):e25475.
- [5] SILVA S, BORGES L R, SANTIAGO L, et al. Motor imagery for gait rehabilitation after stroke[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2020, 9(9):D13019.
- [6] OPSOMMER E, CHEVALLEY O, KOROGOD N. Motor imagery for pain and motor function after spinal cord injury: A systematic review[J]. *Spinal Cord*, 2020, 58(3):262-274.
- [7] MALOUIN F, RICHARDS C L, JACKSON P L, et al. The kinesthetic and visual imagery questionnaire(KVIQ) for assessing motor imagery in persons with physical disabilities: A reliability and construct validity study[J]. *J Neurol Phys Ther*, 2007, 31(1):20-29.
- [8] 付晨, 李薇, 刘晓莹. 运动想象疗法联合视觉反馈训练在脑卒中偏瘫病人早期康复中的应用[J]. *护理研究*, 2022, 36(1):143-149.
- [9] HAINS B C, BLACK J A, WAXMAN S G. Primary cortical motor neurons undergo apoptosis after axotomizing spinal cord injury[J]. *J Comp Neurol*, 2003, 462(3):328-341.
- [10] KIM B G, DAI H N, MCATEE M, et al. Remodeling of synaptic structures in the motor cortex following spinal cord injury[J]. *Exp Neurol*, 2006, 198(2):401-415.
- [11] GUSTIN S M, WRIGLEY P J, SIDDALL P J, et al. Brain anatomy changes associated with persistent neuropathic pain following spinal cord injury[J]. *Cereb Cortex*, 2010, 20(6): 1409-1419.
- [12] 侯景明. 脊髓损伤后脑结构和功能改变的多模态磁共振研究[D]. 重庆:第三军医大学, 2015.
- [13] FREUND P, WEISKOPF N, ASHBURNER J, et al. MRI investigation of the sensorimotor cortex and the corticospinal tract after acute spinal cord injury: A prospective longitudinal study[J]. *Lancet Neurol*, 2013, 12(9):873-881.
- [14] JURKIEWICZ M T, MIKULIS D J, MCILROY W E, et al. Sensorimotor cortical plasticity during recovery following spinal cord injury: A longitudinal fMRI study[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2007, 21(6):527-538.
- [15] BRAUN S, KLEYNEN M, VAN HEEL T, et al. The effects of mental practice in neurological rehabilitation: A systematic review and meta-analysis[J]. *Front Hum Neurosci*, 2013, 7:390.
- [16] GRANGEON M, GUILLOT A, SANCHO P O, et al. Rehabilitation of the elbow extension with motor imagery in a patient with quadriplegia after tendon transfer[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2010, 91(7):1143-1146.
- [17] CRAMER S C, ORR E L R, COHEN M J, et al. Effects of motor imagery training after chronic, complete spinal cord injury[J]. *Exp Brain Res*, 2007, 177(2):233-242.
- [18] HURST A J, BOE S G. Imagining the way forward: A review of contemporary motor imagery theory[J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 1033493.
- [19] O'SHEA H, MORAN A. Does motor simulation theory explain the cognitive mechanisms underlying motor imagery? A critical review[J]. *Front Hum Neurosci*, 2017, 11:72.
- [20] WANG L, LI X J, ZHENG W M, et al. Motor imagery evokes strengthened activation in sensorimotor areas and its effective connectivity related to cognitive regions in patients with complete spinal cord injury[J]. *Brain Imaging Behav*, 2022, 16(5):2049-2060.
- [21] GLOVER S, BARAN M. The motor-cognitive model of motor imagery: Evidence from timing errors in simulated reaching and grasping[J]. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 2017, 43(7):1359-1375.
- [22] FRANK C, SCHACK T. The representation of motor(inter)action, states of action, and learning: Three perspectives on motor learning by

- way of imagery and execution[J]. *Front Psychol*, 2017, 8:678.
- [23] BACH P, FRANK C, KUNDE W. Why motor imagery is not really motoric: Towards a reconceptualization in terms of effect-based action control[J/OL]. *Psychol Res*, 2022-12-14 [2023-05-01]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36515699/>.
- [24] JEANNEROD M. Neural simulation of action: A unifying mechanism for motor cognition[J]. *Neuroimage*, 2001, 14(1 Pt 2):S103-S109.
- [25] MATEO S, DI RIENZO F, REILLY K T, et al. Improvement of grasping after motor imagery in C6-C7 tetraplegia: A kinematic and MEG pilot study[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2015, 33(4):543-555.
- [26] DI RIENZO F, COLLET C, HOYEK N, et al. Impact of neurologic deficits on motor imagery: A systematic review of clinical evaluations[J]. *Neuropsychol Rev*, 2014, 24(2):116-147.
- [27] OPSOMMER E, KOROGOD N. Mental practice for chronic pain in People with spinal cord injury: A systematic review protocol[J]. *JBIR Database System Rev Implement Rep*, 2017, 15(8):2004-2012.
- [28] SOLER M D, KUMRU H, PELAYO R, et al. Effectiveness of transcranial direct current stimulation and visual illusion on neuropathic pain in spinal cord injury[J]. *Brain*, 2010, 133(9):2565-2577.
- [29] GUSTIN S M, WRIGLEY P J, GANDEVIA S C, et al. Movement imagery increases pain in people with neuropathic pain following complete thoracic spinal cord injury[J]. *Pain*, 2008, 137(2):237-244.
- [30] ROOSINK M, ROBITAILLE N, JACKSON P L, et al. Interactive virtual feedback improves gait motor imagery after spinal cord injury: An exploratory study[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2016, 34(2):227-235.
- [31] 蔡楚杰, 李四楠, 刘天, 等. 运动想象脑机接口在脑卒中后上肢康复中的研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2023, 38(6):851-857.
- [32] MATEO S, DI RIENZO F, BERGERON V, et al. Motor imagery reinforces brain compensation of reach-to-grasp movement after cervical spinal cord injury[J]. *Front Behav Neurosci*, 2015, 9:234.
- [33] 田贵鑫, 陈俊杰, 丁鹏, 等. 脑机接口中运动想象的执行与能力的评估和提高方法[J]. *生物医学工程学杂志*, 2021, 38(3):434-446.
- [34] 张松, 袁媛, 徐义君, 等. 虚拟现实技术在神经系统疾病功能康复中的应用现状[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2022, 44(3):278-281.
- [35] MISHRA R, NARAYANAN M D K, UMANA G E, et al. Virtual reality in neurosurgery: Beyond neurosurgical planning[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(3):1719.
- [36] MARESCA G, MAGGIO M G, BUDA A, et al. A novel use of virtual reality in the treatment of cognitive and motor deficit in spinal cord injury: A case report[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97(50):e13559.
- [37] JEONG H, KIM J. Development of a guidance system for motor imagery enhancement using the virtual hand illusion[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(6):2197.

(收稿日期:2023-07-22 修回日期:2023-12-21)

(上接第 1021 页)

- [29] KASHANGURA R, JULLIEN S, GARNER P, et al. MVA85A vaccine to enhance BCG for preventing tuberculosis[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2019, 4(4):CD012915.
- [30] MU J Y, JEYANATHAN M, SMALL C L, et al. Immunization with a bivalent adenovirus-vectored tuberculosis vaccine provides markedly improved protection over its monovalent counterpart against pulmonary tuberculosis[J]. *Mol Ther*, 2009, 17(6):1093-1100.
- [31] SHURYGINA A P, ZABOLOTNYKH N, VI-NOGRADOVA T, et al. Preclinical evaluation of TB/FLU-04L-An intranasal influenza vector-based boost vaccine against tuberculosis[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(8):7439.
- [32] GANDOTRA S, SCHNAPPINGER D, MONTELEONE M, et al. In vivo gene silencing identifies the Mycobacterium tuberculosis proteasome as essential for the bacteria to persist in mice[J]. *Nat Med*, 2007, 13(12):1515-1520.

(收稿日期:2023-08-20 修回日期:2024-01-06)