

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2021.11.023

脑科学与神经物理

## 运动想象重塑脑功能的研究进展

吴拾瑶, 随力, 杨兰, 刘亮  
上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093

**【摘要】**运动想象(MI)指脑演练或模仿特定动作但不伴随实际动作执行的心理过程,MI训练时脑内的一些区域得以激活,脑功能改变类似于实际运动执行时,因此,MI具有重塑脑功能的作用。本研究总结MI重塑脑功能的心理神经肌肉理论模式和镜像神经元理论模式、自主MI和基于脑机接口的MI实现方式以及MI重塑脑功能的定性评估和定量评估;进一步归纳近年来MI重塑脑功能在健康人群和患者康复治疗中的研究进展,并提出MI的类别;最后就MI重塑脑功能的未来发展趋势和研究方向进行展望。

**【关键词】**运动想象;脑功能;脑机接口;康复治疗

**【中图分类号】**R318;R49

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2021)11-1449-04

## Research advances in motor imagery for remodeling brain functions

WU Shiyao, SUI Li, YANG Lan, LIU Liang

School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract:** Motor imagery (MI) is the psychological processes in which the brain exercises or imitates a specific motion, but it is not accompanied by the actual motor execution. During MI training, some brain areas can be activated, and the changes in brain functions are similar to those occurred at the actual motor execution. Therefore, MI has the role of remodeling brain functions. Herein the psychoneuromuscular theoretical model and mirror neuron theoretical model of MI for remodeling brain functions, the implementations of autonomous MI and MI based on brain-computer interface, and the qualitative and quantitative evaluation methods of MI for remodeling brain functions are summarized. Furthermore, the recent research advances in MI for remodeling brain functions in healthy people and the rehabilitation therapy for patients are reviewed, and the categories of MI are put forward. Finally, the future development trend and research direction of MI for remodeling brain functions are discussed.

**Keywords:** motor imagery; brain function; brain-computer interface; rehabilitation therapy

### 前言

中枢神经系统中的脑具有高度可塑性,其可塑性和脑内的突触增强、细胞与血管再生、神经网络重新连接及脑皮层重组与代偿等密不可分,脑结构与功能会随着学习与训练,如电子竞技游戏、音乐训练、语言学习、运动技能学习等发生变化<sup>[1]</sup>。在这些学习和训练过程中,单纯的运动想象(Motor Imagery, MI)训练具有脑功能重塑的作用。MI指脑演练或模仿一个指定动作且

不伴随实际动作执行的心理过程,MI训练及实际运动执行时,脑内的一些区域,如初级运动区、基底核和小脑都被激活了<sup>[2]</sup>。目前,MI训练不仅广泛应用于脑损伤后的康复训练中,也广泛应用于运动员和艺术家的动作灵活度训练<sup>[3-4]</sup>。本研究就近年来MI重塑脑功能相关研究进行归纳和总结。

### 1 MI重塑脑功能的理论模式

MI的执行方式分为动觉想象(Kinesthetic Imagery, KI)与视觉想象(Visual Imagery, VI)两种<sup>[5]</sup>,KI指以第一人称想象自己实际完成动作,自身是执行者,想象肢体运动过程中的肌肉、肌腱以及关节运动的感觉;VI指以第三人称或旁观者的角度观察自己或者别人的肢体运动<sup>[6]</sup>。不论是KI还是VI都改善了运动表现<sup>[7]</sup>。MI引起的活动量虽然没有产生实际运动,但MI过程兴奋的脑区和实际运动兴奋的脑区有很大程度的重叠,两者

**【收稿日期】**2021-07-07

**【基金项目】**国家自然科学基金(11179015, 51173108);上海理工大学科技发展项目(2019KJFZ239, 2020KJFZ232)

**【作者简介】**吴拾瑶,硕士研究生,研究方向:生物医学工程, E-mail: wushiyao0629@163.com

**【通信作者】**随力,博士, E-mail: lsui@usst.edu.cn

都可以兴奋皮质运动前区、辅助运动区、扣带回和顶叶皮质等<sup>[8]</sup>,MI具有重塑脑功能的作用。

MI重塑脑功能的理论模式有多种,较为公认的是心理神经肌肉理论模式和镜像神经元理论模式。心理神经肌肉理论模式指人在进行运动计划或实际运动时有“流程图”产生并存储于脑内,如果实际活动中所涉及的运动流程图与MI时所涉及的流程图相同,就可通过MI强化完善这一流程图,即MI训练可诱发出与实际运动类似的神经生理反应。程欣欣等<sup>[9]</sup>研究表明MI时,机体虽然并未执行实际动作,但外周相关肌肉出现了电活动,即出现了心理神经肌肉反应。MI的另一种理论模式为镜像神经元理论模式,镜像神经元是一类特殊的视觉运动神经元,人类的镜像神经元存在于中央前回的下部、额下回的后部、顶下小叶和顶内沟内部,这些区域构成了人类镜像神经元系统的核心<sup>[10]</sup>。有研究发现在人进行MI时,初级和次级体感皮层有激活现象,推测是镜像神经元触发导致的,并且刺激镜像神经元可用于康复训练中<sup>[11]</sup>。

目前MI重塑脑功能的几种理论模式一致认为,MI在大脑中反复想象某种动作或情境,诱发和增强了来自外周感受器的感觉信息输入以及来自大脑的冲动信息传出,促进潜伏神经传导通路及休眠突触的活化,加速脑功能重组。

## 2 MI重塑脑功能的实现方式

早前的自主MI训练属于纯粹的心理训练,虽然操作方便,但训练期间完全依赖被试者的主观感受,因此MI训练期间易受到外界条件的干扰,不利于后续的结果分析与验证。随着技术的发展,MI训练开始和脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)技术结合起来,使得在训练过程中的信号能被即时测量与反馈。BCI是在大脑和计算机或其他电子设备之间建立的不依赖于常规大脑信息输出通路技术。BCI作为近年来发展迅速的一种新型智能交互方式,可将MI的心理活动转换为可分析处理的脑信号,这些脑信号转化为输出信号,以控制外部设备实现一定的功能,将MI转变为行动和反馈<sup>[12]</sup>。多种脑功能测量技术,如脑电、功能性核磁共振(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)和功能性近红外光谱技术<sup>[13]</sup>,获取的脑信号都已被报道可以成功应用到基于BCI的MI(BCI-MI)训练中。BCI-MI训练可有效地进行脑功能重塑,在脑功能增强和康复中起到重要作用。Ethan等<sup>[12]</sup>的研究表明在脑卒中患者中,采用BCI-MI训练后,病灶侧病灶区以外的运动区功能恢复并替代病灶区功能,颞、额、枕、顶叶多个脑区间功能连接增强,表明BCI-MI具有重塑脑功能的作用。

BCI-MI使神经生理及脑代谢活动得到实时捕捉与量化,实验进行中能随时了解被试者的状态,在数据准确性与实验可控性方面优于自主MI。特别是近年来随着脑功能信号人工智能算法的改进和BCI信息传输速率的提高,BCI-MI有了较大的发展空间。因此,BCI-MI是MI发展的必然趋势。

## 3 MI重塑脑功能的评估

MI是在不产生实际动作的情况下促进脑功能重塑的心理训练,其评估方法大体可划分为定性评估和定量评估。定性评估是在MI训练结束后使用主观问卷调查来评估MI的作用效果,主要采用MI量表进行评估。MI量表有多种,目前临床上广泛应用的是运动觉及视觉想象问卷-20(Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire-20, KVIQ-20)及精简版视觉想象问卷-10(Visual Imagery Questionnaire-10, KVIQ-10),这两种想象问卷量表将运动觉、视觉成分分为5级来评估MI能力的精准度,两种量表不过分依赖被试者,适用于健康和患病人群。

定量评估是采用神经影像及神经电生理方法,如脑电图(Electroencephalography, EEG)和fMRI等,评估MI对脑功能的重塑程度。拥有较高时间分辨率的EEG是使用频率最高的一项技术,EEG中事件相关去同步化(Event-Related Desynchronization, ERD)与事件相关同步化(Event-Related Synchronization, ERS)信号是最常使用的指标。运动的准备、执行与想象都会在感觉运动区产生局限性的ERD或ERS,最大值集中在 $\alpha$ 频段和 $\beta$ 频段。具有较高空间分辨率的fMRI也广泛应用于MI重塑脑功能的评估中。相关研究显示,MI能激活包括前运动皮层、初级运动皮层、前扣带皮层以及小脑等区域<sup>[6]</sup>,其中初级运动皮层在实际运动中也同样被激活,只是MI的激活程度较弱,这证明了MI能激活运动功能区。Nierhaus等<sup>[14]</sup>通过fMRI测量可知左感觉运动区、顶叶内侧区和左枕叶区的 $T_1$ 加权强度增加,表明MI对fMRI中脑功能重塑性参数的影响。

MI重塑脑功能的定性评估和定量评估中,定性评估过于主观,定量评估中的神经影像学 and 神经电生理学评估方法也需结合被试者的主观感受进行具体分析,因此,目前较理想的MI重塑脑功能的评估方法应该是定性评估和定量评估的有机结合。

## 4 MI重塑脑功能的应用

MI训练中感觉运动区激活能调节运动过程,促进运动学习<sup>[8]</sup>。Pascual-Leone等<sup>[15]</sup>最早研究了MI的脑功能重塑作用,提出皮层重组可由心理练习引起,

MI 和实际运动产生了相似的脑功能重塑作用。MI 的脑功能重塑目前可应用于健康人群的脑功能增强及疾病状态下的脑功能康复。表 1 归纳了近年来对几类健康人群进行 MI 训练的脑功能重塑结果。

表 1 健康人群 MI 训练重塑脑功能的研究  
Tab.1 Studies of MI training for remodeling brain functions in healthy people

研究对象	MI 训练	脑功能重塑的内在变化	脑功能重塑的外在表现
跳水运动员 <sup>[16]</sup> vs 普通人	跳水 MI 训练	副海马区和前额叶区域随运动技能水平的提高而显著激活	跳水运动员 MI 训练时熟练度和准确度更高
篮球运动员 <sup>[17]</sup> vs 普通人	篮球投掷 MI 反馈训练	中央后回、左额中回激活程度增加,左侧辅助运动区激活减少	篮球运动员 MI 训练时投掷命中率更高、出球速度更快
音乐表演者 <sup>[18]</sup>	5 d 钢琴演奏 MI 与实际运动结合训练	初级运动皮层区域大小增加	演奏熟练度增加
芭蕾舞者 <sup>[3]</sup>	芭蕾舞动作 MI 训练	前部负波分量相比新手更大	相比新手,芭蕾舞者想象相同动作用时更短
年轻人(平均年龄为 27 岁) <sup>[14]</sup>	BCI-MI 训练	左感觉运动区、顶叶内侧区和左枕叶区的 T <sub>1</sub> 加权强度增加	执行 MI 训练的速度与准确率有提升
老人(60 岁以上) <sup>[19]</sup>	5 次手部 BCI-MI 训练	感觉运动节律显示出特征性的 ERD 或 ERS,手部运动的 ERD 在对侧感觉运动区更突出	视觉空间、口语、记忆与智力这 4 种认知功能得到显著改善

MI 也广泛应用于康复领域,作为一种康复疗法参与到患者的康复训练中。有研究指出,结合 MI 的康复疗法可促进脑内激活区向患侧扩散,使脑内激活趋于正常,患侧运动功能改善<sup>[20]</sup>。脑卒中患者进行 MI 训练,采用磁共振弥散张量成像测量发现患者各向异性分数提高了,表明 MI 训练有助于脑卒中患者受损白质纤维的恢复<sup>[21]</sup>。同样,对脑出血患者进行偏瘫侧上肢功能 MI 训练,fMRI 结果显示,训练后患者被激活的脑区由初级躯体感觉运动区(SM1)和

双侧辅助运动区(SMA)转变为对侧 SM1 及少量同侧初级运动皮层(M1),表明了 MI 训练能使患者脑区功能逐步接近于正常状态<sup>[22]</sup>。

上述健康人群和疾病状态下进行 MI 训练的研究结果显示在整个 MI 期间,顶叶皮层与壳核相比实际运动过程中更活跃<sup>[23]</sup>,但是执行不同 MI 训练时激活的脑区有所不同。依据近年来有关执行 MI 的方式和激活脑区之间的对应关系研究结果,可将 MI 归纳为 BCI-MI<sup>[14]</sup>、上下肢 MI<sup>[24]</sup>与情景 MI<sup>[8]</sup>这 3 种类别,详见表 2。

表 2 基于 MI 方式和激活脑区对应关系的 MI 类别  
Tab.2 MI categories based on MI methods and the corresponding activated brain regions

MI 类别	激活脑区
BCI-MI(包括运动控制与运动反馈)	SM1、顶叶内侧区、枕叶区
上下肢 MI(包括四肢的转动抬起等一系列动作)	SMA、运动前区
情景 MI(包括对物体、空间、流程等事物的认知与想象)	前额叶区、M1

MI 类别和激活脑区之间的对应关系在针对不同人群、不同功能需求而制定个性化的 MI 训练中具有较重要的借鉴意义。虽然不同类型的 MI 训练和激活脑区之间存在上述的对应关系,但并不意味着进行相应的 MI 训练就能激活该训练方式所对应的所有脑区,脑区的激活除与 MI 的类别有关外,还与被试在 MI 训练中的集中度、完成任务的能力有关,甚至和脑功能的监测设备有关系,如采用 fMRI 能够检测到 MI 中 M1 脑区的激活,但采用正电子发射断层扫描往往检测不到 M1 脑区的激活,这可能和 PET 的低时间、低空间分辨率性能有关。

5 总结和展望

MI 训练方便易行、材料简单,不仅是健康人群提高技能的常用训练方式,也是患者进行运动功能康复的有效途径,MI 不仅有利于四肢功能与步态恢复,更有利于脑功能重塑,且这些有益的变化在训练结束后还可持续。

在 MI 重塑脑功能研究领域,未来的研究方向和发展趋势可能在以下几个方面:(1)在机制研究方面,脑功能重塑可以表现在神经元、突触、局部神经环路、脑网络连接及功能表现等各个方面,目前 MI 重塑脑功能的机制研究多是理论模式、激活脑区及功能表现<sup>[25]</sup>,未



来的研究将朝着更深更广的方向发展,微观和亚微观上将采用具有高时空分辨率的脑成像设备探索MI中的脑信息流向、交互与整合,揭示MI的脑网络模式;宏观上将进一步研究MI对健康人群脑功能的增强作用及脑损伤患者的脑康复作用。微观机制和宏观机制的融合将是MI重塑脑功能机制研究的趋势。(2)在MI的实现方式方面,BCI-MI训练和反馈是较好的MI的实现方式,这无疑是MI发展的必然趋势。增强脑内信号的监测精度,提高BCI技术的准确度和传导速率,使MI的反馈更及时,误差时延更少是BCI-MI实现方式需要达到的目标<sup>[26]</sup>。BCI-MI反馈交互界面的设计,如何针对不同年龄、不同专业技能训练、不同疾病种类和疾病进程等设计特异性的MI交互界面,使BCI-MI交互界面集专业性和趣味性于一体是未来的发展方向和趋势之一,是实现MI在健康人群中提高脑功能,在脑疾病患者中实现脑康复目标的必然要求。(3)在MI的脑功能评估方面,定性评估和定量评估相结合是MI的脑功能评估趋势。脑结构、脑高级功能的复杂性都决定了MI的脑功能评估方法上的多样性,现有的脑成像技术和电生理学技术在脑功能评估中起到了重要作用,但由于每一种技术手段都有其固有的局限性,如fMRI在时间分辨率上,EEG在空间分辨率上不够理想,因此,未来的MI重塑脑功能的评估将会朝着多种评价手段相结合、多模态评价方向发展。探索出最敏感的、最具普适性的评价参数也是发展趋势和发展方向之一。同时,MI重塑脑功能的系列、追踪评估也是MI的发展趋势之一,是判定MI的短效性和长效性的需求。

MI在脑功能重组与脑认知方面有很大的探索空间,MI重塑脑功能在很多领域,如康复医学、体育运动、艺术表演等方面具有较广阔的应用前景,MI重塑脑功能的发展必将随脑科学、BCI技术的发展及多学科交叉融合而进入一个新的发展阶段。

## 【参考文献】

- [1] 任占兵,胡琳琳,张远超,等.运动技能专家脑可塑性研究进展:来自磁共振成像的证据[J].中国体育科技,2019,55(2):3-18.  
REN Z B, HU L L, ZHANG Y C, et al. A review of brain plasticity of motor skill experts: evidence from magnetic resonance imaging[J]. China Sport Science and Technology, 2019, 55(2): 3-18.
- [2] BYRD E M, JABLONSKI R, VANCE D E. Understanding anosognosia for hemiplegia after stroke[J]. Rehabil Nurs, 2020, 45(1): 10-18.
- [3] ORLANDI A, ARNO E, PROVERBIO A M. The effect of expertise on kinesthetic motor imagery of complex actions[J]. Brain Topogr, 2020, 33(2): 238-254.
- [4] SAKAI K, IKEDA Y. Clinical assessment of motor imagery and physical function in mild stroke patients[J]. Phys Ther Sci, 2019, 31(12): 992-996.
- [5] 高家欢,胡昔权.运动想象在脑卒中上肢功能康复的应用进展[J].中国康复理论与实践,2017,23(9):1060-1063.  
GAO J H, HU X Q. Advance of motor imagery for upper limbs rehabilitation in patients after stroke (review)[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2017, 23(9): 1060-1063.
- [6] 奕伟波.复合运动想象诱发的脑电响应机制与解码技术研究[D].天津:天津大学,2017.
- YI W B. Research on response mechanism and decoding technology of EEG induced by compound motor imagery[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [7] PARK S W, KIM J H, YANG Y J. Mental practice for upper limb rehabilitation after stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. Int J Rehabil Res, 2018, 41(3): 197-203.
- [8] KWAN K Y, EUNHEE P, AHEE L, et al. Changes in network connectivity during motor imagery and execution[J]. PLoS One, 2018, 13(1): 60-65.
- [9] 程欣欣,高润,刘莉.基于运动想象疗法的神经机制在脑卒中后运动功能障碍中的研究进展[J].中国康复,2019,34(6):324-327.  
CHENG X X, GAO R, LIU L. Research progress of neural mechanism based on motor imagery therapy in motor dysfunction after stroke[J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2019, 34(6): 324-327.
- [10] SRINIVASAN N, BISHOP J, YEKOVIK R, et al. Differential activation and functional plasticity of multimodal areas associated with acquired musical skill[J]. Neuroscience, 2020, 446: 294-303.
- [11] ODETTE F, ROBERT S, DANIEL S, et al. White matter microstructure of the human mirror neuron system is related to symptom severity in adults with autism[J]. J Autism Dev Disord, 2018, 48(2): 36-42.
- [12] ETHAN B, CORNELIA W, CHRISTOPH B, et al. Think to move: a neuromagnetic brain-computer interface (BCI) system for chronic stroke[J]. Stroke, 2008, 39(3): 82-87.
- [13] ABIBULLAEV B, AN J, LEE S H, et al. Design and evaluation of action observation and motor imagery based BCIs using near-infrared spectroscopy[J]. Measurement, 2017, 98: 250-261.
- [14] NIERHAUS T, VIDAURRE C, SANNELLI C, et al. Immediate brain plasticity after one hour of brain-computer interface (BCI)[J]. J Physiol-London, 2019, 1: 10-15.
- [15] PASCUAL-LEONE A, NGUYET D, COHEN L G, et al. Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills[J]. J Neurophysiol, 1995, 74(3): 1037-1045.
- [16] KIM T, FRANK C, SCHACK T. The effect of alternate training of action observation and motor imagery on cognitive and skill performance[J]. Int J Sport Psychol, 2020, 51(2): 101-121.
- [17] ZHANG L L, PI Y L, SHEN C, et al. Expertise-level-dependent functionally plastic changes during motor imagery in basketball players[J]. Neuroscience, 2018, 380: 78-89.
- [18] RIQUELME-ROS J V, RODRIGUEZ-BERMEDEZ G, RODRIGUEZ-RODRIGUEZ I, et al. On the better performance of pianists with motor imagery-based brain-computer interface systems[J]. Sensors, 2020, 20(16): 17.
- [19] GOMEZ-PILAR J, CORRALEJO R, NICOLAS-ALONSO L F, et al. Neurofeedback training with a motor imagery-based BCI: neurocognitive improvements and EEG changes in the elderly[J]. Med Biol Eng Comput, 2016, 54(11): 63.
- [20] SEBASTIAN-ROMAGOSA M, CHO W, ORTNER R, et al. Brain computer interface treatment for motor rehabilitation of upper extremity of stroke patients-a feasibility study[J]. Front Neurosci, 2020, 14. DOI:10.3389/fnins.2020.591435.
- [21] BENZY V K, VINOD A P, SUBASREE R, et al. Motor imagery hand movement direction decoding using brain computer interface to aid stroke recovery and rehabilitation[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2020, 28(12): 3051-3062.
- [22] 谷鹏鹏,叶丽梅,李思思,等.分级运动想象训练对脑梗死上肢偏瘫患者脑功能局部一致性影响的研究[J].中国康复医学杂志,2020,35(6):662-669.  
GU P P, YE L M, LI S S, et al. The effect of graded motor imagery training on the local consistency of brain function in patients with cerebral infarction and hemiplegia [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2020, 35(6): 662-669.
- [23] KRAEUTNER S N, STRATAS A, MCARTHUR E L, et al. Neural and behavioral outcomes differ following equivalent bouts of motor imagery or physical practice[J]. J Cognitive Neurosci, 2020, 32(8): 1590-1606.
- [24] YANNA T, HUIZHAN D, TONG Z, et al. Motor imagery-based rehabilitation: potential neural correlates and clinical application for functional recovery of motor deficits after stroke[J]. Aging Dis, 2017, 8(3): 523.
- [25] MACINTYRE T E, MADAN C R, MORAN A P, et al. Motor imagery, performance and motor rehabilitation[J]. Prog Brain Res, 2018, 240: 141-159.
- [26] KRUSE A, SUICA Z, TAEYMANS J, et al. Effect of brain-computer interface training based on non-invasive electroencephalography using motor imagery on functional recovery after stroke-a systematic review and meta-analysis[J]. BMC Neurol, 2020, 20(1): 385.

(编辑:谭斯允)