

运动想象疗法在脑卒中患者上肢康复中的应用及其神经作用机制研究进展

王鹤玮 贾杰 孙莉敏

复旦大学附属华山医院康复医学科,上海 200040

通信作者:孙莉敏,Email:tracy611@sina.com

【摘要】 运动想象疗法是在不伴有明显躯体活动情况下,通过内心反复模拟、排演特定动作,从而促进肢体功能恢复的一种康复治疗技术。本文简要陈述了运动想象疗法的核心概念,梳理了运动想象疗法在脑卒中上肢康复中的临床研究现状,并依据当前神经影像学研究进展,围绕运动想象疗法神经作用机制,着重讨论了“心理神经肌肉理论”和“强化运动准备的前导理论”这两个主要理论。

【关键词】 脑卒中; 运动想象; 上肢康复; 心理神经肌肉理论

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(81401859);国家重点研发计划(2018YFC2002301);上海市卫生和计划生育委员会科研课题面上项目(201540197)

Fund program: Natural Science Foundation of China(81401859); National Key R&D Program of China(2018YFC2002301); Shanghai Commission for Health and Family Planning(201540197)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.06.019

世界卫生组织指出脑卒中后有 80% 患者会遗留不同程度肢体活动障碍,其中超过 60% 的患者在进入慢性期后仍存在上肢或手功能障碍,是临床上较为棘手的问题之一^[1-2]。人体手及上肢的生物复杂度较高,其在大脑皮质中的投影占据了很大区域,因此针对手及上肢的康复往往从外周、中枢两个层面进行干预^[3-4]。中枢干预指直接作用于中枢神经系统本身的治疗手段,如经颅磁刺激、经颅直流电刺激、运动想象、脑机接口等^[2,4];其中运动想象作为一种主动式中枢干预方法,越来越受到广泛关注^[5]。诸多国内、外临床研究发现运动想象作为常规干预的补充具有一定疗效^[6-8],但关于运动想象的神经作用机制目前尚不明确。本文主要结合各类运动想象的神经影像研究,对现有理论框架及证据进行梳理,以期为临床应用提供理论基础参考。

运动想象疗法的基本概念

早在 1950 年 Hossack 就提出即使人体感官不受到相应刺激,中枢神经系统也能产生类似于感觉输入体验,并将其命名为心理想象(mental imagery, MI)^[9]。到了 20 世纪六七十年代,很多研究表明运动想象训练可以促进记忆力、学习能力和运动功能改善,运动想象训练被广泛应用于教育及体育领域。从 90 年代开始,运动想象疗法被逐渐应用于脑卒中患者功能恢复^[10-11]。

运动想象可分成两类:一类是视觉运动想象,又称外在运动想象,要求受试者以旁观者角度想象在一定距离外观察某些特定动作;另一类叫动觉运动想象,又称内在运动想象,此时受试者以第一人视角想象自己正在做某个特定动作^[12-13]。Fery^[14]发现当人们在学习新运动任务时,视觉运动想象训练更适合那些注重形式的活动,例如描画一个图案,而动觉运动想象训练则更适合用于提高运动时间精准度和双侧协调性。还有研究表明,动觉运动想象能引起受试者呼吸频率及心跳频率

加快,而这种生理变化与实际运动时非常相似,表明动觉运动想象与实际运动可能拥有相似的神经生理基础^[15-16]。

运动想象疗法的临床疗效

现有的运动想象疗法临床研究大多关注其对脑卒中后遗症期上肢运动功能及日常生活活动能力的改善作用^[17-19]。近年来相关研究发现将运动想象疗法与任务导向性训练、限制性诱导训练、传统中医疗法等结合起来往往能取得更好疗效^[8,20-21]。Sun 等^[22]通过小样本研究发现运动想象与运动观察联合运用能促进脑卒中患者手灵巧度和手部握力改善,此外运动想象与运动观察同步训练的效果优于非同步训练,能显著增加损伤侧大脑运动皮质兴奋性。Kim 等^[23]将 24 例后遗症期脑卒中患者随机分成两组,实验组给予运动想象结合常规物理治疗,对照组给予单纯物理治疗,采用 Fugl-Meyer 量表上肢部分(the upper-extremity portion of the Fugl-Meyer motor assessment, FMA-UE)和 Wolf 运动功能量表(Wolf motor function testing, WMFT)作为评价指标;结果显示患者经运动想象及常规物理治疗后,其 FMA-UE 评分(尤其是肩部、手腕部运动功能)改善幅度明显优于对照组。Park 等^[24]对 26 例后遗症期脑卒中患者进行前瞻性研究后发现,运动想象联合改良限制性诱导疗法的治疗效果明显优于单纯运动想象训练。Liu 等^[25]研究也发现运动想象疗法与常规物理治疗联用能更好地促进脑卒中患者手功能恢复。Carrasco 等^[26]在一篇系统综述中很好地总结了运动想象与其他康复治疗手段联用的进展情况,例如联合传统物理治疗和作业疗法^[27-28]、任务导向性训练^[29]、限制性诱导疗法^[30]等。运动想象联合其他疗法往往能更好地促进脑卒中患者上肢运动功能恢复,且疗效在干预结束后通常能维持 3 个月以上,可见运动想象疗法是临床现有常规康复手段的有效补充。

研究运动想象疗法神经作用机制的常用工具

运动想象训练是一种心理训练,可从机体内部诱发运动感觉产生,从而在不产生实际外在运动情况下促进中枢神经系统运动网络重塑^[8,20],因此借助飞速发展的各类脑功能成像技术能研究运动想象疗法在中枢神经系统中的作用机制。目前广泛应用的神经影像、电生理类工具主要包括功能性磁共振(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)、脑电图(electroencephalography, EEG)、正电子发射断层显像(positron emission tomography, PET)等。由于运动想象涉及的脑区繁多,对空间分辨率要求较高,而 fMRI 凭借其良好的空间分辨率及无创、无放射性等优点,被广泛应用于研究运动想象疗法的相关作用机制^[7,31]。此外 TMS 也是运动想象研究领域的常用工具,可用来评定受试者进行运动想象时皮质脊髓束兴奋性改变,或对特定脑区进行兴奋或抑制性刺激并观察受试者相应行为学改变^[32]。

运动想象疗法的神经作用机制研究进展

一、心理神经肌肉理论

心理神经肌肉理论(psychoneuromuscular theory, PM 理论)认为中枢神经系统储存有运动计划或流程图(schema);且对于特定的运动任务目标而言,实际运动和运动想象的流程图相同或相近。脑卒中患者虽然中枢受到不同程度损伤,运动输出通路受阻,但其大脑中关于运动想象的流程图可能部分或完整保留^[21]。以此为基础,相关研究发现患者在接受特定运动想象任务时会激发与实际运动时相似的神经肌肉冲动,区别在于运动想象是阈下刺激而实际运动是阈上刺激^[33]。

根据 PM 理论,运动想象与实际运动的流程图相似,并可追溯到运动起始阶段,即感觉运动皮质激活。很多神经影像学研究结果都提示运动想象与实际运动所激活的感觉运动皮质模式非常接近。Kutz 等^[34]通过 fMRI 研究 12 例健康受试者在进行运动想象或实际手部运动时脑区激活情况,结果显示运动想象、实际手部运动都激活了包括辅助运动区(supplementary motor area, SMA)、运动前皮质(premotor cortex, PMC)、顶叶皮质和小脑等与运动功能密切相关脑区;该研究还表明,想象复杂运动(如序列对指运动)相比于想象简单运动(如握拳运动)能更强地激活后顶叶皮质和小脑。Sharma 等^[35]则进一步深入比较了脑卒中患者运动想象、运动执行时相关脑区激活情况,该研究采用任务态 fMRI 监测 20 例恢复较好脑卒中患者和 17 例健康志愿者在进行运动想象和运动执行(序列对指运动)时皮质激活情况,结果显示 2 组受试者激活的运动相关皮质区域有很大重叠,包括 PMC、内侧额上回、顶上小叶(superior parietal lobule, SPL)、小脑、额叶和顶叶颞盖区等。Page 等^[7]通过任务态 fMRI 研究发现,后遗症期脑卒中患者在进行运动想象训练后,伴随着上肢运动功能恢复,其患侧腕关节屈伸活动时所激活脑区(如损伤同侧 M1 和损伤对侧 M1、PMC 等)显著增强。Wang 等^[31]、Zhang 等^[36]通过静息态 fMRI 研究也发现,经运动想象干预后,脑卒中患者双侧大脑半球初级运动皮层间功能连接明显增强,并且与运动功能恢复程度密切相关。Hardwick 等^[37]于 2018 年发表的 1 篇 Meta 分析详细比较了运动想象、运

动观察和运动执行时所涉及脑区,结果显示尽管不同研究采用的影像学工具不同、研究范式不同、受试者人群差异也很大,但运动想象与运动执行时所激活皮质区域、皮质下结构和不同脑区间网络连接模式都有非常多的相似之处。因此无论是健康人或是脑卒中患者在进行运动想象时都可以激活与实际运动时非常相似的感觉运动网络,这也成为运动想象训练最初被用于脑卒中患者肢体功能恢复的脑神经功能基础^[33]。

运动想象除了可激活感觉运动皮质兴奋外,PM 理论还认为运动想象任务能激发与实际运动相似的神经肌肉冲动及生理反应。Kasai 等^[38]研究了运动想象时肌体皮质脊髓束兴奋性改变,受试者被要求将注意力集中在屈曲腕关节肌肉上,同时努力想象腕关节屈曲运动,为避免肌肉收缩影响,在刺激受试者运动皮质前,对侧上肢桡侧腕屈肌表面肌电至少需维持 5~10 s 静息电位。该研究结果显示,运动想象能显著提高运动诱发电位波幅(motor evoked potentials, MEPs),表明运动想象可提高皮质脊髓束兴奋性。Lebon 等^[39]进一步研究发现,当受试者在进行运动想象时,其 MEPs 波幅增加具有特异性,即只有当想象动作与监测肌肉直接相关时其 MEPs 波幅才会显著上升。此外受试者运动想象能力强弱与运动想象时 MEPs 波幅具有正相关性,且运动想象能力越强其靶肌特异性及时间特异性就越强。除了皮质脊髓束兴奋性改变外,运动想象还可诱发与实际运动时相似的生理改变。Oishi 等^[40]研究了运动想象时人体生理指标的变化,该研究筛选 8 位年轻短道速滑男性运动员作为受试者,要求受试者想象自身进行短道速滑比赛,监测指标包括皮肤阻抗、心率和呼吸频率等。结果显示受试者可在 35~38 s 内完成 500 m 速滑运动想象,该成绩与实际运动时间非常接近;并且受试者经运动想象后其皮肤阻抗显著下降(提示受试者皮肤表面有出汗现象),其心率及呼吸频率也显著增快。Jacobsen 等^[41]则研究了运动想象时机体外周肌肉肌电反应,当受试者上肢支撑一定重量物体时,上肢相关肌肉自然出现了相应肌电活动;而当参与者想象上肢负重时,虽然并未执行实际动作,但研究人员发现其相关肌肉也出现电活动。该研究显示运动想象与肌肉活动紧密关联,运动想象所带来的不仅仅是中枢层面兴奋,也包含了从中枢到外周运动信号传递,即“心理神经肌肉”反应。

总而言之,运动想象训练的 PM 理论认为运动想象之所以能改善脑卒中患者肢体运动控制功能,是因为从运动皮质产生运动信号到运动指令沿脊髓传递,再到运动指令传递到靶肌引起肌肉兴奋收缩各个运动控制环节,运动想象训练都可诱发出与实际运动类似的神经生理反应,而这些证据也为 PM 理论成为运动想象干预机制的主流观点提供了有力依据。

二、强化“运动准备”的前导理论

虽然大量神经影像学研究揭示运动想象与实际运动输出有着非常多共同激活的脑区和皮质下神经通路,但运动想象与运动执行脑区激活模式到底相似到何种程度还不得而知。很多研究探讨了运动想象与运动执行时脑区激活差异,并得出了与 PM 理论不同的结论;如初级运动皮质(M1)和初级感觉皮质(S1)在进行动作运动想象时都可能会有轻度激活^[42],但这些脑区在实际运动时其激活程度明显强于运动想象时激活程度^[43-44]。实际上虽然运动想象与实际运动激活的运动网络大部分重叠,但运动想象更多涉及与运动准备相关的次级运动

区,例如 PMC、SMA 以及后顶叶皮质等^[45]。由此有学者提出了另一个理论,即运动想象时脑区激活模式更加接近于运动准备的激活模式,运动想象训练发挥作用的方式很有可能是基于大脑反复模拟和强化运动准备相关成分,这就是所谓的“前导理论”。在临床实践中,运动想象训练加强了患者与运动准备相关的脑网络机能,再结合实际运动执行训练,就可以发挥中枢刺激结合外周运动训练效果^[3-4],从而显著改善患者肢体功能。

Deiber 等^[45]通过正电子发射断层扫描技术监测受试者完成实际手指运动或视觉想象手指运动时脑区激活位置,结果显示运动想象时更多激活的是下顶叶皮质、SMA、前扣带回皮质和背外侧前额叶皮质,因此认为视觉运动想象更多募集的是额顶联合皮质等次级运动皮质区域,而非初级感觉运动皮质。Hanakawa 等^[46]研究发现运动想象激活了包括内侧额上回、前扣带回皮质、中央前沟、缘上回、梭状回以及小脑后外侧等脑区;这些区域很有可能与运动指令产生和感觉信号分析有关,在运动准备中发挥重要作用。Kraft 等^[47]利用 fMRI 研究 17 例亚急性期脑梗患者和 12 例健康志愿者在进行等长收缩握拳和运动想象握拳时双侧大脑半球皮质激活的偏侧性,结果表明脑卒中患者和健康志愿者在进行运动想象时其双侧运动皮质前区偏侧化指数相似,而执行运动时脑卒中患者运动皮质前区偏侧化指数显著低于健康志愿者。运动皮质前区包括 PMC 和 SMA,这两个脑区对于运动准备、计划和运动次序有着重要作用^[48]。脑卒中患者该区域功能相对保留,提示运动想象训练可通过强化以上脑区改善患者运动功能。

综上所述,从运动想象和运动执行激活的脑区差异出发,运动想象实际更多对应的是次级运动区域,其主要功能与运动准备更接近;运动想象训练通过强化感觉信息整合、运动记忆提取和运动程序编码,为运动执行做准备;强化“运动准备”的前导理论作为 PM 理论的有力补充,为后续研究提供了新思路。

结语

目前,国内有很多研究比较了运动想象结合现有康复手段的临床疗效,其研究内容虽然广泛但欠深度,尤其是对运动想象干预方式、干预强度和干预时机的细致讨论较为缺乏。同时由于样本量小、样本同质性差及缺乏规范的疗效评价指标使得现有研究结论说服力不足。再者脑卒中患者可能伴有运动想象能力损伤,为了保证运动想象训练的有效性,治疗前必须通过量表评估等手段筛查出运动想象功能障碍患者^[49]。关于运动想象训练的作用机制,目前的主流理论包括 PM 理论和强化“运动准备”的前导理论,二者互相补充、相辅相成。未来研究可能更多需要采用前瞻性运动想象干预设计,通过纵向分析比较运动想象训练后脑网络直接变化,从而为研究运动想象干预机制提供更直接证据。

参考文献

[1] Nam HU, Huh JS, Yoo JN, et al. Effect of dominant hand paralysis on quality of life in patients with subacute stroke [J]. *Ann Rehabil Med*, 2014, 38(4): 450-457. DOI: 10.5535/arm.2014.38.4.450.

[2] 贾杰. 脑卒中后手功能康复现状 [J]. *老年医学与保健*, 2015, 21(3): 129-131. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8296.2015-01.

[3] Ludemann-Podubecka J, Nowak DA. Mapping cortical hand motor rep-

resentation using TMS: A method to assess brain plasticity and a surrogate marker for recovery of function after stroke? [J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2016, 69: 239-251. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2016.07.006.

[4] 贾杰. “中枢-外周-中枢”闭环康复——脑卒中后手功能康复新理念 [J]. *中国康复医学杂志*, 2016(11): 1180-1182. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2016.11.001.

[5] Sharma N, Pomeroy VM, Baron JC. Motor imagery: a backdoor to the motor system after stroke? [J]. *Stroke*, 2006, 37(7): 1941-1952. DOI: 10.1161/01.STR.0000226902.43357.fc.

[6] Sun L, Yin D, Zhu Y, et al. Cortical reorganization after motor imagery training in chronic stroke patients with severe motor impairment: a longitudinal fMRI study [J]. *Neuroradiology*, 2013, 55(7): 913-925. DOI: 10.1007/s00234-013-1188-z.

[7] Page SJ, Szaflarski JP, Eliassen JC, et al. Cortical plasticity following motor skill learning during mental practice in stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2009, 23(4): 382-388. DOI: 10.1177/1545968308326427.

[8] 唐朝正, 赵智勇, 孙莉敏, 等. 运动想象结合任务导向训练在脑卒中后手功能康复中作用的 fMRI 研究 [J]. *中国运动医学杂志*, 2015, 34(5): 495-499. DOI: 10.16038/j.1000-6710.2015.05.013.

[9] Hossack JC. Mental imagery [J]. *Manit Med Rev*, 1950, 30(8): 543-545.

[10] Garcia CD, Aboitiz CJ. Effectiveness of motor imagery or mental practice in functional recovery after stroke: a systematic review [J]. *Neurologia*, 2016, 31(1): 43-52. DOI: 10.1016/j.nrl.2013.02.003.

[11] Dickstein R, Deutsch JE. Motor imagery in physical therapist practice [J]. *Phys Ther*, 2007, 87(7): 942-953. DOI: 10.2522/ptj.20060331.

[12] Ridderinkhof KR, Brass M. How kinesthetic motor imagery works: a predictive-processing theory of visualization in sports and motor expertise [J]. *J Physiol Paris*, 2015, 109(1-3): 53-63. DOI: 10.1016/j.jphysparis.2015.02.003.

[13] Callow N, Hardy L. The relationship between the use of kinaesthetic imagery and different visual imagery perspectives [J]. *J Sports Sci*, 2004, 22(2): 167-177. DOI: 10.1080/02640410310001641449.

[14] Fery YA. Differentiating visual and kinesthetic imagery in mental practice [J]. *Can J Exp Psychol*, 2003, 57(1): 1-10. DOI: 10.1037/h0087408.

[15] Holler Y, Bergmann J, Kronbichler M, et al. Real movement vs motor imagery in healthy subjects [J]. *Int J Psychophysiol*, 2013, 87(1): 35-41. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2012.10.015.

[16] Ueno T, Inoue M, Matsuoka T, et al. Comparison between a real sequential finger and imagery movements: an fMRI study revisited [J]. *Brain Imaging Behav*, 2010, 4(1): 80-85. DOI: 10.1007/s11682-009-9087-y.

[17] Page SJ, Levine P, Leonard AC. Effects of mental practice on affected limb use and function in chronic stroke [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86(3): 399-402. DOI: 10.1016/j.apmr.2004.10.002.

[18] Stevens JA, Stoykov ME. Using motor imagery in the rehabilitation of hemiparesis [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2003, 84(7): 1090-1092. DOI: 10.1016/S0003-9993(03)00042-X.

[19] Johnson SH, Sprehn G, Saykin AJ. Intact motor imagery in chronic upper limb hemiplegics: evidence for activity-independent action representations [J]. *J Cogn Neurosci*, 2002, 14(6): 841-852. DOI: 10.1162/089892902760191072.

[20] 孙莉敏, 吴毅, 尹大志, 等. 运动想象训练促进脑卒中患者上肢运动功能恢复的功能磁共振研究 [J]. *中国康复医学杂志*, 2015, 30

- (12):1217-1222,1242.DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2015.12.004.
- [21] Tong Y, Pandy JJ, Li WA, 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): 364-371. DOI:10.14336/AD.2016.1012.
- [22] Sun Y, Wei W, Luo Z, et al. Improving motor imagery practice with synchronous action observation in stroke patients [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2016, 23(4): 245-253. DOI:10.1080/10749357.2016.1141472.
- [23] Kim SS, Lee BH. Motor imagery training improves upper extremity performance in stroke patients [J]. *J Phys Ther Sci*, 2015, 27(7): 2289-2291. DOI:10.1589/jpts.27.2289.
- [24] Park JH. The effects of modified constraint-induced therapy combined with mental practice on patients with chronic stroke [J]. *J Phys Ther Sci*, 2015, 27(5): 1585-1588. DOI:10.1589/jpts.27.1585.
- [25] Liu H, Song LP, Zhang T. Mental practice combined with physical practice to enhance hand recovery in stroke patients [J]. *Behav Neurol*, 2014, 2014(8): 876416. DOI:10.1155/2014/876416.
- [26] Garcia CD, Aboitiz CJ. Effectiveness of motor imagery or mental practice in functional recovery after stroke: a systematic review [J]. *Neurologia*, 2016, 31(1): 43-52. DOI:10.1016/j.nrl.2013.02.003.
- [27] Page SJ, Levine P, Leonard AC. Effects of mental practice on affected limb use and function in chronic stroke [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86(3): 399-402. DOI:10.1016/j.apmr.2004.10.002.
- [28] Page SJ, Levine P, Sisto SA, et al. Mental practice combined with physical practice for upper-limb motor deficit in subacute stroke [J]. *Phys Ther*, 2001, 81(8): 1455-1462. DOI:10.1352/0047-6765(2001)039.
- [29] Page SJ, Murray C, Hermann V, et al. Retention of motor changes in chronic stroke survivors who were administered mental practice [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2011, 92(11): 1741-1745. DOI:10.1016/j.apmr.2011.06.009.
- [30] Page SJ, Levine P, Khoury JC. Modified constraint-induced therapy combined with mental practice: thinking through better motor outcomes [J]. *Stroke*, 2009, 40(2): 551-554. DOI:10.1161/STROKEAHA.108.528760.
- [31] Wang H, Sun L, Jia J. The plasticity of resting-state brain networks associated with motor imagery training in chronic stroke patients [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2018, 61: e20. DOI:10.1016/j.rehab.2018.05.043.
- [32] Ruffino C, Papaxanthis C, Lebon F. Neural plasticity during motor learning with motor imagery practice: review and perspectives [J]. *Neuroscience*, 2017, 341(1): 61-78. DOI:10.1016/j.neuroscience.2016.11.023.
- [33] Guillot A, Collet C. The neurophysiological foundations of mental and motor imagery [M]. New York: Oxford University Press, 2011: 111-113.
- [34] Kuhtz-Buschbeck JP, Mahnkopf C, Holzknecht C, et al. Effector-independent representations of simple and complex imagined finger movements: a combined fMRI and TMS study [J]. *Eur J Neurosci*, 2003, 18(12): 3375-3387. DOI:10.1111/j.1460-9568.2003.03066.x.
- [35] Sharma N, Simmons LH, Jones PS, et al. Motor imagery after subcortical stroke: a functional magnetic resonance imaging study [J]. *Stroke*, 2009, 40(4): 1315-1324. DOI:10.1161/STROKEAHA.108.525766.
- [36] Zhang Y, Liu H, Wang L, et al. Relationship between functional connectivity and motor function assessment in stroke patients with hemiplegia: a resting-state functional MRI study [J]. *Neuroradiology*, 2016, 58(5): 503-511. DOI:10.1007/s00234-016-1646-5.
- [37] Hardwick RM, Caspers S, Eickhoff SB, et al. Neural correlates of action: Comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution [J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2018, 94: 31-44. DOI:10.1016/j.neubiorev.2018.08.003.
- [38] Kasai T, Kawai S, Kawanishi M, et al. Evidence for facilitation of motor evoked potentials (MEPs) induced by motor imagery [J]. *Brain Res*, 1997, 744(1): 147-150. DOI:10.1016/S0006-8993(96)01101-8.
- [39] Lebon F, Byblow WD, Collet C, et al. The modulation of motor cortex excitability during motor imagery depends on imagery quality [J]. *Eur J Neurosci*, 2012, 35(2): 323-331. DOI:10.1111/j.1460-9568.2011.07938.x.
- [40] Oishi K, Kasai T, Maeshima T. Autonomic response specificity during motor imagery [J]. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 2000, 19(6): 255-261. DOI:10.2114/jpa.19.255.
- [41] 王茂斌. 脑卒中的康复医疗 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 483-484.
- [42] Ehrsson HH, Geyer S, Naito E. Imagery of voluntary movement of fingers, toes, and tongue activates corresponding body-part-specific motor representations [J]. *J Neurophysiol*, 2003, 90(5): 3304-3316. DOI:10.1152/jn.01113.2002.
- [43] Dechent P, Merboldt KD, Frahm J. Is the human primary motor cortex involved in motor imagery? [J]. *Brain Res Cogn Brain Res*, 2004, 19(2): 138-144. DOI:10.1016/j.cogbrainres.2003.11.012.
- [44] Gerardin E, Sirigu A, Lehericy S, et al. Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements [J]. *Cereb Cortex*, 2000, 10(11): 1093-1104. DOI:10.1093/cercor/10.11.1093.
- [45] Deiber MP, Ibanez V, Honda M, et al. Cerebral processes related to visuomotor imagery and generation of simple finger movements studied with positron emission tomography [J]. *Neuroimage*, 1998, 7(2): 73-85. DOI:10.1006/nimg.1997.0314.
- [46] Hanakawa T, Dimyan MA, Hallett M. Motor planning, imagery, and execution in the distributed motor network: a time-course study with functional MRI [J]. *Cereb Cortex*, 2008, 18(12): 2775-2788. DOI:10.1093/cercor/bhn036.
- [47] Kraft E, Schaal MC, Lule D, et al. The functional anatomy of motor imagery after sub-acute stroke [J]. *NeuroRehabilitation*, 2015, 36(3): 329-337. DOI:10.3233/NRE-151221.
- [48] Cramer SC, Seitz RJ. Imaging functional recovery from stroke [J]. *Handb Clin Neurol*, 2009, 94: 1097-1117. DOI:10.1016/S0072-9752(08)94054-9.
- [49] 夏秋蓉, 顾志娥, 凡国华. 运动想象训练对脑卒中偏瘫患者上肢促分离运动的影响 [J]. *中国康复*, 2016, 31(1): 35-38. DOI:10.3870/zgkf.2016.01.010.

(修回日期:2019-02-24)

(本文编辑:易浩)