

·临床研究·

手运动想象对脑卒中患者脑电信号的影响*

郭冬菊¹ 胡静璐¹ 王德正¹ 徐舫舟² 张 杨¹ 岳寿伟^{1,3}

摘要

目的:分析脑卒中患者健患侧手运动想象(motor imagery, MI)时大脑前运动区(premotor area, PMA)及初级运动皮质(primary motor cortex, M1)的脑电信号特征,明确手运动想象对双侧大脑激活的影响。

方法:选取2020年1月—2021年12月于山东大学齐鲁医院康复科住院治疗的脑卒中左侧肢体偏瘫患者18例,采用左右手MI训练,随机想象左右手运动,其中,想象左手运动30次,想象右手运动30次。记录随机MI时,M1区(导联25/26/27/29/30/31)及PMA(导联16/17/18/20/21/22)脑电信号,比较MI时不同脑区激活特点。

结果:无论患手或健手MI时,随着PMA脑电信号的增强,同侧M1区相应导联的脑电信号随之增强,呈现明显正相关性(均 $P<0.05$)。患手MI时,PMA激活明显高于M1区($P<0.05$),而健手MI对PMA和M1区激活的作用相类似(均 $P>0.05$)。患手或健手MI时,均明显激活健侧M1区($P<0.05$),余双侧大脑对应导联之间无显著性差异($P>0.05$)。

结论:本研究证明MI可同时激活PMA和M1区,而且无论是健侧或患侧MI,均明显激活健侧M1区。

关键词 脑卒中;运动想象;脑电信号;前运动区

中图分类号:R493,R563.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2023)-08-1044-006

Effects of hand motor imagery on the EEG signal in stroke patients/GUO Dongju, HU Jinglu, WANG Dezheng, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine,2023,38(8):1044—1049

Abstract

Objective: To investigate the effect of hand motor imagery (MI) by analyzing the electroencephalogram (EEG) characteristics of the premotor area (PMA) and primary motor cortex (M1) in stroke patients.

Method: A total of 18 stroke patients with left hemiplegia who were hospitalized in the Rehabilitation Department of Qilu Hospital of Shandong University from January 2020 to December 2021 were selected. The MI on left and right hand was randomly given 30 times on each side. The EEG signals in M1(channel 25/26/27/29/30/31) and PMA (channel 16/17/18/20/21/22) were recorded during the MI on each side of the hand, and the activation characteristics on different brain regions were compared in MI.

Result: With the enhancement of the PMA EEG signal in either the affected hand or the healthy hand MI, the EEG signals in the corresponding channel of the ipsilateral M1 were subsequently enhanced, showing a significant positive correlation (all $P<0.05$). The activation of PMA was significantly higher than M1 activation in the affected hand MI ($P<0.05$); while the activation of PMA and M1 was similar in the unaffected hand MI (all $P>0.05$). The M1 of the unaffected brain was significantly activated during MI on both sides ($P<0.05$), but there was no statistical difference between the remaining corresponding channels of the remaining bilateral brains ($P>0.05$).

Conclusion: MI can activate both PMA and M1. The M1 area in the unaffected brain was obviously activated by either the unaffected or affected side MI.

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.08.003

*基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR202102200383);2019年山东省高等学校青创科技计划(2019KJN010);国家自然科学基金面上项目(82172535);山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY011112)

1 山东大学齐鲁医院康复科,山东省济南市,250012; 2 齐鲁工业大学(山东省科学院)光电工程国际化学院; 3 通讯作者
第一作者简介:郭冬菊,女,住院医师;收稿日期:2022-04-16

Author's address Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Qilu Hospital, Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan, Shandong, 250012

Key word stroke; motor imagery; electroencephalogram; premotor area

脑卒中是一种高发病率、高致残率的疾病,通常会遗留不同程度的运动功能障碍,严重影响患者的生活质量。卒中后康复治疗效果总体上是主动运动优于被动运动。运动想象(motor imagery, MI)作为一种特殊的主动运动,因操作简单、疗效突出,在康复治疗中越来越受到大家的青睐。它是一种无任何动作输出,根据运动记忆在大脑中激活某一活动的特定区域而进行的反复运动想象,可适用于卒中后的任何阶段^[1]。

目前对MI的神经机制研究多采用功能性磁共振或近红外分析大脑皮层的功能定位、治疗前后脑区激活的对比^[2-3]。近年来脑电(electroencephalogram, EEG)记录技术快速发展,具有高时间分辨率、实时记录、成本低且便携性较好等优点^[4]。在MI过程中,通过分析MI时不同运动脑区、左右大脑半球之间的脑电信号特征,可为探究MI治疗促进卒中中患者运动功能恢复的中枢机制提供理论支持。

本研究的目的是比较卒中偏瘫患者健/患侧手MI时运动控制脑区和双侧大脑激活的脑电特征,明确运动想象对双侧大脑激活的影响。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2020年1月—2021年12月于山东大学齐鲁医院康复科住院治疗的脑卒中左侧肢体偏瘫患者18例,其中,男性16例,女性2例,平均年龄为 53.89 ± 12.81 岁,脑梗死患者11例,脑出血患者7例,均为右利手。

纳入标准:①符合《中国各类主要脑血管病诊断要点2019》^[5],并经头颅CT或MRI检查证实者;②生命体征平稳,无严重心、肝、肾等重要脏器功能不全者;③首次发病,左侧肢体偏瘫者;④病程<1年者;⑤神志清楚,具有想象能力,无认知功能障碍,简易精神状态检查评分>25分者;⑥患者或家属签署治疗知情同意书者。

排除标准:①病情不稳定,处于急性进展期或并发严重心、肝、肾疾病及感染者;②严重认知功能障

碍、精神障碍、不配合者;③存在偏侧忽略、失用症者;④文盲、视力下降或失明者;⑤头部有金属植入物者。本研究经山东大学齐鲁医院伦理审查委员会批准[批号:KLY-2020(KS)-477]。

1.2 方法

1.2.1 EEG信号采集:根据国际10-20标准的脑电采集定位系统,采用64导联的脑电电极进行信号采集。研究了2个感兴趣区域:前运动区(pre-motor area, PMA)和初级运动皮质(M1区)。PMA(L-PMA/R-PMA)的激活分别由16、17、18导联和20、21、22导联组成,而M1区(L-M1/R-M1)的激活分别由25、26、27和29、30、31导联组成(图1—2)。

1.2.2 记录范式:本试验由3个试验模块组成。测试前训练患者,直到能够正确完成运动想象。每个模块包括20次随机的左手或右手MI,每次试验记录6s,间隔4s,每个模块完成后休息90s,共进行60次试验,包括30次左手MI、30次右手MI。整个试验大约需要20min,所有阻抗保持在100k Ω 以下。

图1 EEG信号采集过程

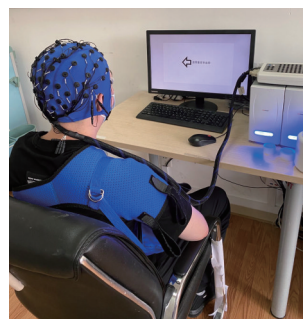
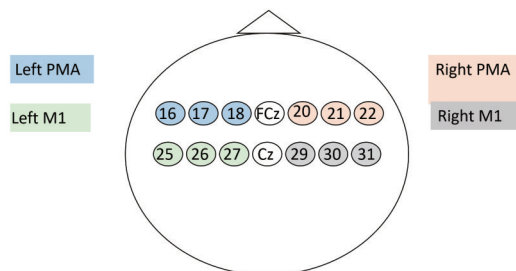


图2 双侧PMA和M1区导联组成



1.2.3 脑电数据处理:通过滤波(8Hz—30Hz)降采样到100Hz,独立成分分析对数据进行预处理,以提高EEG信号的质量。然后使用改进的S变换(S-transform, MST),计算出功率谱密度(power spectral density, PSD;脑电信号在一个单位频带上的功率,表明信号功率随着频率而变化),并对每个通道上的PSD进行归一化求和。计算公式如下:

$$MST(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(\tau - t, f)e^{(-j2\pi ft)} dt$$

$$x_n = \frac{x - \min}{\max - \min}$$

1.3 统计学分析

采用SPSS 25.0统计软件分析数据,计量资料采用均数±标准差表示。各类计量满足正态分布和方差齐性,采用配对样本 t 检验比较组间差异。采用Pearson相关分析分析PMA和相应M1区脑电信号特征的相关性。 $P < 0.05$ 被认为具有显著性意义。

2 结果

2.1 运动想象时PMA区与同侧M1区激活之间的相关性

不论是患手还是健手MI时,随着PMA区PSD值的增强,同侧M1区相应导联的PSD值随之增强,呈现明显正相关性(均 $P < 0.05$,图3—4)。

2.2 运动想象对脑区激活的影响

左手MI时,PMA中的18导联、20导联PSD值明显高于对应M1区的27导联、29导联,差异有显著性意义($P < 0.05$);右手MI时,PMA各导联与M1区对应导联之间无显著性差异(均 $P > 0.05$)(表1)。

2.3 运动想象对双侧大脑激活的影响

患手(左手)MI时,左侧M1区25导联的PSD值高于对侧大脑对应导联(即31导联)的特征值,二者比较,差异有显著性意义($P <$

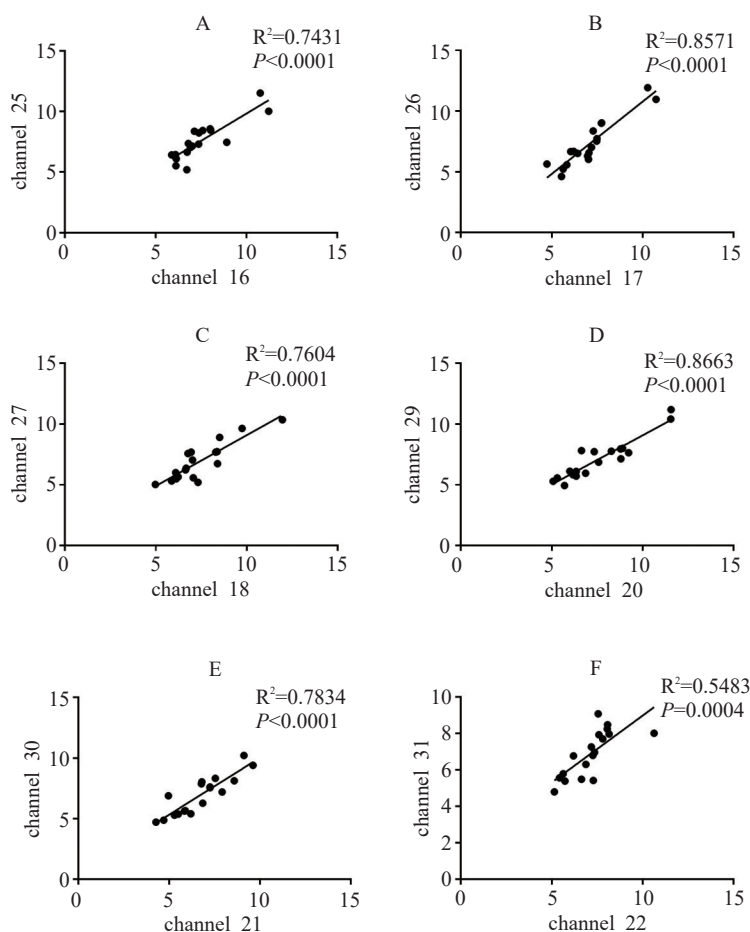
表1 左/右手MI时PMA与M1区对应导联PSD的比较

PMA-M1	L-MI		R-MI	
	t 值	P 值	t 值	P 值
16—25	-0.435	0.669	-0.334	0.743
17—26	-1.214	0.241	-1.017	0.323
18—27	2.537	0.021	1.524	0.146
20—29	2.746	0.014	1.849	0.082
21—30	-1.346	0.196	0.300	0.768
22—31	1.178	0.255	1.204	0.245

注:①导联16/17/18为L-PMA,导联25/26/27为L-M1;②导联20/21/22为R-PMA,导联29/30/31为R-M1。

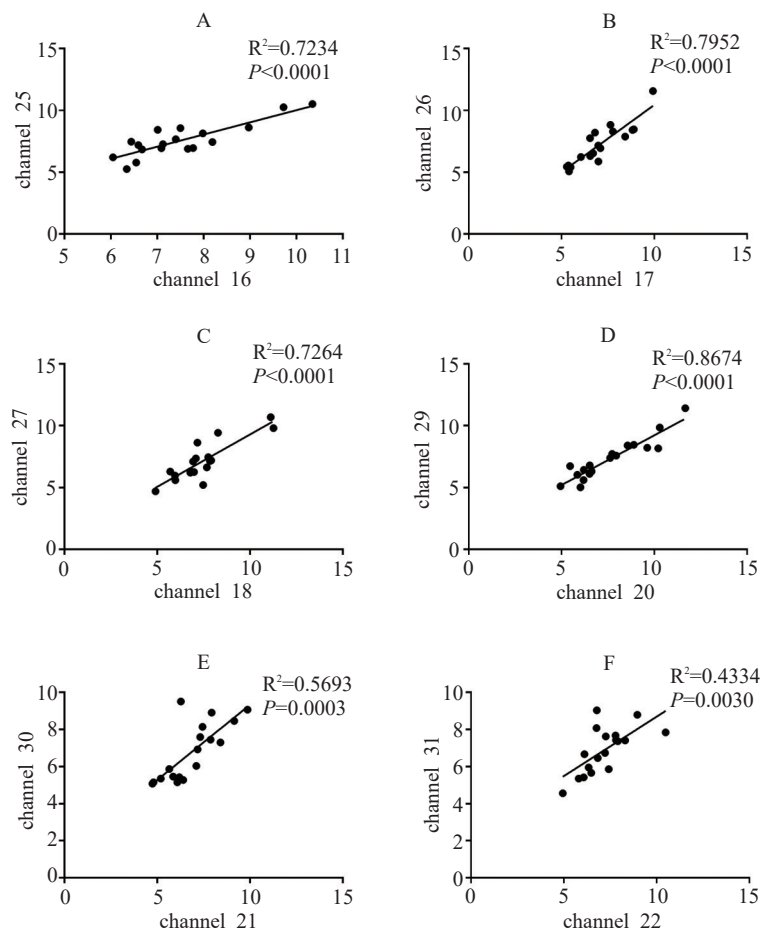
0.05),余左右侧大脑对应导联之间无显著性差异($P > 0.05$);健侧手(右手)MI时,左侧M1区25导联的PSD值高于对侧大脑对应导联(即31导联),差异有显著性意义($P < 0.05$),余左右侧大脑对应导联之

图3 左手运动想象时PMA区与同侧M1区相应导联激活之间的相关性



注:①左手运动想象时,随着前运动区脑电信号的增强,对应同侧M1区的脑电信号随之增强,二者呈正相关;②L-PMA:导联16/17/18;③L-M1:导联25/26/27;④R-PMA:导联20/21/22;⑤R-M1:导联29/30/31。

图4 右手运动想象时PMA区与同侧M1区相应导联激活之间的相关性



注:①右手运动想象时,随着前运动区脑电信号的增强,对应同侧M1区的脑电信号随之增强,二者呈正相关;②L-PMA:导联16/17/18;③L-M1:导联25/26/27;④R-PMA:导联20/21/22;⑤R-M1:导联29/30/31。

间无显著性差异($P>0.05$)(表2)。图5为运动想象时PMA、M1区的脑电地形图。

表2 左/右手MI时左右大脑半球之间对应导联PSD的比较

LCH-RCH	L-MI		R-MI	
	t值	P值	t值	P值
16—22	1.456	0.164	1.369	0.189
17—21	1.380	0.186	0.761	0.457
18—20	-0.769	0.452	-0.698	0.494
25—31	2.730	0.014	2.428	0.027
26—30	1.151	0.266	1.593	0.130
27—29	-1.223	0.238	-0.889	0.386

注:①LCH:left cerebral hemisphere左侧大脑半球;②RCH:right cerebral hemisphere右侧大脑半球;③导联16/17/18为L-PMA,导联20/21/22为R-PMA;④导联25/26/27为L-M1,导联29/30/31为R-M1。

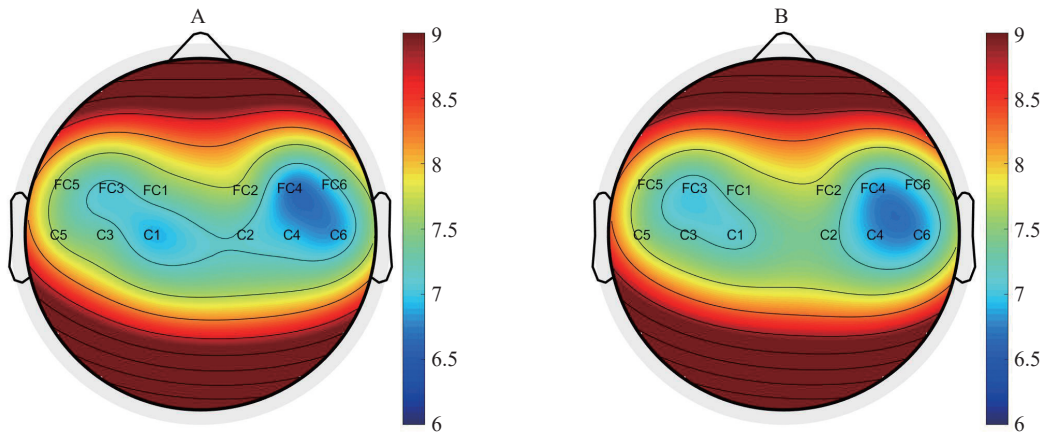
3 讨论

本研究探索了卒中患者进行左右手运动想象训练时对双侧大脑半球及不同脑区激活的影响,从脑电特征角度验证了运动想象对卒中患者运动功能恢复的作用机制。

卒中是世界范围内造成死亡和残疾的第二大原因,我国是全球卒中患病率、发病率和死亡率较高的国家之一,承受着无比沉重的负担^[6]。运动功能障碍是脑卒中患者最常见的临床表现。临床上常用的物理治疗、运动疗法等康复治疗技术可促进患者恢复肢体功能,但大多数治疗受到场地、器械、运动功能等的限制^[7]。运动想象疗法是指在脑海中反复模拟排练运动过程,根据运动记忆激活特定活动的大脑活跃区域,通过暗示性训练改善功能,具有针对性强、简单易行等优点^[8],已应用于卒中康复。通过与多种康复方法对比,基于运动想象的康复治疗方法已被证明效果最明显^[9]。脑电信号识别算法是运动想象康复的重要前提。本研究在时频分析基础上,采用改进的S变换(MST)算法进行脑电信号处理。我们已用MST算法分析了脑卒中、脊髓损伤等患者的脑电信号,计算出更精确的PSD值^[10]。

正常运动功能相关脑区主要由初级和次级运动区组成,其中,M1区是主要运动区,控制全身的躯体运动,交叉支配肢体运动。PMA与M1区相邻,主要生理功能是参与运动的准备和规划,是运动控制的一个关键区域^[11-12],通过汇集初始运动信息,加工处理后将其输送到初级运动皮层,从而导致运动的执行^[13]。因此,M1区的活动可能是由PMA的促进或抑制作用驱动的。既往对MI期间脑功能区激活情况的研究,受试者多为健康人,如近红外光谱研究

图5 运动想象时PMA、M1区脑电地形图



注:①无论左手或右手运动想象时,左侧(健侧)PMA、M1区的PSD值均高于右侧(患侧),A为左手运动想象,B为右手运动想象,颜色深浅代表功率谱强度值大小,其中,红色最高,蓝色最低;②FC1-导联18,FC3-导联17,FC5-导联16;③FC2-导联20,FC4-导联21,FC6-导联22;④C1-导联27,C3-导联26,C5-导联25;⑤C2-导联29,C4-导联30,C6-导联31。

显示,健康成年人手部MI期间PMA氧合血红蛋白水平的增加与在运动执行期间相类似^[14];fMRI研究也表明,健康成年人在MI和运动执行具有相似的活动模式,其激活的脑部区域类似^[15];健康人手指MI和运动执行期间脑网络分析研究也得出相似结论^[16]。但对于已经有脑部损伤的卒中患者,MI对脑区的激活情况并不清楚。本研究发现,卒中患者无论偏瘫侧或健侧手MI时,随着PMA脑电信号的增加,对应M1区脑电信号相应增强,此结果与健康人类似,证明PMA与M1区脑电信号相关,二者具有共同协调关系,也验证了MI可促进卒中患者运动功能区的激活。

MI时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^[17]。在一项自我进食活动的研究中发现,运动想象过程中,辅助运动区和左侧运动前区的氧合血红蛋白水平明显高于运动执行过程^[18],本研究也观察了左右手MI时对PMA和对应M1脑区激活的影响,结果显示患手MI对PMA脑电信号的激活更有意义,提示患侧手MI对促进肢体运动功能的恢复效果可能更好。与我们的研究结果一致,fMRI研究也显示当卒中患者进行偏瘫侧MI时,PMA激活更明显,而M1区激活不明显^[19],进一步证实了PMA在偏瘫患者MI中的重要作用。

有趣的是,我们发现不论左手还是右手MI,左侧PMA、M1区的PSD值均高于右侧,其中,左侧M1区的25导联激活情况较对侧脑区激活更明显,原因可能是:①根据手部运动由对侧大脑支配及在大脑皮层的投射特点,当右手MI时,左侧运动区中手功能代表区的脑电信号会增强;②当想象左手运动时,由于右侧大脑半球为患侧半球,根据半球间竞争性抑制原理,患侧(右侧)大脑半球运动皮质由于损伤造成兴奋性降低,对非受损侧(左侧)半球的抑制作用减弱,非受损侧(左侧)半球皮质兴奋性增高,对受损侧(右侧)半球的不对称抑制作用增加,进一步降低了受损伤侧(右侧)皮质的兴奋性^[20-21],因此,左手运动想象时,表现为左脑(健侧半球)比右脑(患侧半球)激活增加。总之,患手或健手MI时,均明显激活健侧M1区,此区域可以配合无创神经调控治疗,促进运动想象治疗的作用。

同样,我们应当注意,影响卒中患者运动想象能力的因素很多,包括患者的年龄、病程、病变部位、损伤严重程度等,因此,不同的研究方法,受试者不同,得到的结果不尽相同。例如,有研究显示,恢复期脑卒中患者通过运动想象训练,在损伤同侧大脑感觉运动区激活增加,上肢运动功能改善^[22];而对12例皮质下损伤的卒中患者研究发现,运动想象时,可激活双侧辅助运动区及对侧前运动区^[23]。

本研究选用的患者多为男性,均为右利手,且左侧肢体偏瘫,而且样本量偏少,因此,尚不能将结果推广到所有类型患者中。另外,所有患者试验前缺乏运动想象能力的评估,可能会影响运动想象的效果。后续研究中将对以上问题做进一步完善。

综上所述,本研究证明,运动想象可同时激活前运动区和初级运动皮质,而且无论是健侧或患侧运动想象,均明显激活健侧的初级运动皮质,为选择临床康复治疗方案提供了理论依据。

参考文献

- [1] 邹颖,张长杰,孔瑛.脊髓损伤患者运动想象期间的近红外脑功能成像研究[J].创伤外科杂志,2022,24(3):175—181.
- [2] 王建华,陈苏英,王飞,等.运动想象的神经机制及其在偏瘫康复应用中的研究进展[J].中华物理医学与康复杂志,2021,43(2):184—186.
- [3] 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.
- [4] 陈小刚,陈菁菁,刘冰川,等.基于脑电的脑机接口技术在医学领域中的应用[J].人工智能,2021(6)6—14.
- [5] 中华医学会神经病学分会,中华医学会神经病学分会脑血管病学组.中国各类主要脑血管病诊断要点2019[J].中华神经科杂志,2019,52(9):710—715.
- [6] GBD 2016 Lifetime Risk of Stroke Collaborators, Feigin VL, Nguyen G, et al. Global, regional, and country-specific lifetime risks of stroke,1990 and 2016[J]. N Engl J Med, 2018,379(25):2429—2437.
- [7] Cervera MA, Soekadar SR, Ushiba J, et al. Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis[J]. Ann Clin Transl Neurol,2018,5(5):651—663.
- [8] 李继刚,田宝.运动想象的理论模式生理机制与应用研究[J].武汉体育学院学报,2005,39(5):64—67.
- [9] Plow EB, Arora P, Pline MA, et al. Within-limb somatotopy in primary motor cortex-revealed using fMRI[J]. Cortex, 2010,46(3):310—321.
- [10] Xu F, Rong F, Leng J, et al. Classification of left-versus right-hand motor imagery in stroke patients using supplementary data generated by cycleGAN[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng,2021(29)2417—2424.
- [11] Park CH, Chang WH, Ohn SH, et al. Longitudinal changes of resting-state functional connectivity during motor recovery after stroke[J]. Stroke,2011,42(5):1357—1362.
- [12] Wang L, Zhang J, Zhang Y, et al. Conditional granger causality analysis of effective connectivity during motor imagery and motor execution in stroke patients[J]. Biomed Res Int,2016(2016)3870863.
- [13] Fleischmann R, Schmidt S, Bathe-Peters R, et al. P1066: Movement preparation requires early activation of the dorsal premotor area[J]. Clinical Neurophysiology, 2014 (125) S332
- [14] Iso N, Moriuchi T, Sagari A, et al. Monitoring local regional hemodynamic signal changes during motor execution and motor imagery using near-infrared spectroscopy[J]. Front Physiol,2016(6)416.
- [15] 席友缘.多模式手部运动想象下的经颅磁刺激运动诱发电位研究[D].天津:天津大学,2011.
- [16] 张嘉鑫.手指运动执行与想象的脑脑网络分析方法研究[D].天津:天津理工大学,2020.
- [17] Kim YK, Park E, Lee A, et al. Changes in network connectivity during motor imagery and execution[J]. PLoS One,2018,13(1):e0190715.
- [18] Matsuo M, Iso N, Fujiwara K, et al. Comparison of cerebral activation between motor execution and motor imagery of self-feeding activity[J]. Neural Regen Res, 2021, 16(4): 778—782.
- [19] 王莉.应用脑功能成像技术研究脑卒中运动想象疗法神经康复机制[D].重庆:重庆大学,2015.
- [20] Hummel FC, Cohen LG. Non-invasive brain stimulation: a new strategy to improve neurorehabilitation after stroke? [J]. Lancet Neurol,2006,5(8):708—712.
- [21] Lefaucheur JP, Aleman A, Baeken C, et al. Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS): an update (2014—2018)[J]. Clin Neurophysiol,2020,131(2):474—528.
- [22] 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.
- [23] Park CH, Chang WH, Lee M, et al. Predicting the performance of motor imagery in stroke patients: multivariate pattern analysis of functional MRI data[J]. Neurorehabil Neural Repair,2015,29(3):247—254.