

脑机接口联合多模态感知反馈训练对脑卒中后上肢功能恢复的探索性研究*

胡义茜¹ 高天昊¹ 白玉龙^{1,2} 陆蓉蓉^{1,2,3}

摘要

目的:探究基于运动想象的脑机接口技术联合多模态感知反馈训练对脑卒中后严重偏瘫患者上肢运动功能恢复的临床可行性及有效性。

方法:本研究纳入在院康复脑卒中慢性期患者12例,在常规康复训练基础上,增加基于运动想象的脑机接口联合多模态感知反馈训练。在干预前后评估患者的上肢运动功能及日常生活活动能力,包括简化Fugl-Meyer量表上肢部分(FMA-UE)、腕关节主动活动度、手臂动作调查测试(action research arm test, ARAT)和Barthel指数(Barthel index, BI)。同时测量每位患者干预前后双侧M1区的运动诱发电位(motor evoked potentials, MEP),探讨脑机接口训练对脑重塑的影响。

结果:所有患者均完成了治疗和评估,其中,FMA-UE及ARAT评分较干预前显著改善($P<0.05$),FMA-UE从基线的(13.50 ± 8.20)分提高到(15.92 ± 9.28)分,ARAT评分从基线的(3.08 ± 5.96)分提高到(4.75 ± 7.52)分;所有患者在干预前均不能主动伸展腕关节,2例受试者有小范围的主动屈腕,而在干预后,4例患者出现了较为明显的患侧腕关节自主伸展,6例患者出现显著的腕关节主动屈曲;所有患者的BI评分均未显示出显著变化。在治疗过程中未观察到不良事件。

结论:基于运动想象的脑机接口联合多模态感知反馈训练或能有效改善脑卒中严重偏瘫患者的上肢运动功能恢复。

关键词 慢性期脑卒中;偏瘫;运动想象;脑机接口;多模态感知反馈训练

中图分类号:R743.3,R493 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2022)-11-1457-06

Investigation of brain-computer interface with multimodal perception feedback training on functional recovery of upper limbs in chronic stroke patients/HU Yiqian, GAO Tianhao, BAI Yulong, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2022, 37(11): 1457—1462

Abstract

Objective: To investigate the clinical feasibility and effectiveness of motor imagery based brain-computer interface with multimodal feedback training in chronic stroke patients with severe upper limb impairment.

Method: Twelve patients with stroke were admitted from inpatient department. In addition to conventional training, motor imagery based brain-computer interface with multimodal feedback training was applied. Motor function of the upper limb and activities of daily living were evaluated before and after the intervention, including the Fugl-Meyer(upper limb), active wrist range of motion, action research arm test and Barthel index. Motor evoked potentials of bilateral M1 regions were measured before and after the intervention to explore the effect of brain-computer interface training on brain plasticity.

Result: All participants completed all the assessments and treatments, among which, FMA-UE and ARAT scores showed significant improvements ($P<0.05$), FMA-UE improved from 13.50 ± 8.20 to 15.92 ± 9.28 while ARAT increased from 3.08 ± 5.96 to 4.75 ± 7.52 . All the participants could not extend their paretic wrist and two participants could flex their wrist in a small range, while, after the intervention, 4 patients could actively ex-

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2022.11.004

*基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(81902280);卫健委临床研究专项(20194Y0103)

1 复旦大学附属华山医院康复医学科,上海市,200040; 2 国家神经疾病医学中心; 3 通讯作者

第一作者简介:胡义茜,女,住院医师;收稿日期:2022-01-29

tend their paretic wrist and 6 patients had active wrist flexion. BI scores of all participants didn't improve significantly. No adverse events occurred during the treatment.

Conclusion: Motor imagery based brain-computer interface with multimodal perception feedback training may have some clinical feasibility and effectiveness for chronic stroke patients with severe upper limb motor impairment.

Author's address Rehabilitation Medicine, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai, 200040

Key word chronic stroke; hemiplegia; motor imagery; brain-computer interface; multimodal perception feedback

脑卒中后上肢及手功能的持续不恢复仍是阻碍卒中患者回归家庭和工作的主要原因^[1]。有研究表明^[2],卒中后上肢功能的恢复遵循一定的恢复模式,会在肩、肘、腕、指依次出现屈曲和伸展,最终达到功能的有效恢复。按照上述恢复规律,若在卒中后1个月内仍未出现可测量到的握力,或者持续处于软瘫状态,那么后续上肢及手功能的恢复则不容乐观,给患者的家庭和社会带来较大的经济负担^[3]。

近年来,多学科融合技术发展越来越快,并逐渐在各行各业中应用。脑机接口(brain-computer interface, BCI)就是一种多学科融合后产生的新型康复治疗技术,涉及神经科学、生物医学工程、计算机技术等多种学科^[4]。BCI技术可以直接作用于中枢神经系统,主要通过在人脑和计算机或其他电子设备之间建立直接通信和控制的通路(不依赖于常规的神经-肌肉接头通路)^[5]。BCI技术最初应用于脊髓损伤、肌萎缩侧索硬化症患者中,通过联合功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)或外骨骼机器人等,能有效改善上述患者群体的生活独立性^[6-7]。随着材料和解码技术的不断优化,该技术也逐渐应用于脑损伤患者的康复中。既往多项临床研究也验证了BCI技术在脑卒中患者中应用的临床可行性和有效性^[8-11]。目前的脑计算机接口系统中,大多基于运动想象(motor imagery, MI),即在不产生实际动作的同时,输出与任务执行相似的皮层活动^[12]。即使是严重偏瘫的卒中患者也可以在规范培训后进行该项训练,大大提高了临床可应用性。既往研究也发现,BCI技术有助于充分发挥运动想象的疗效,二者结合对卒中后上肢功能恢复是可行且有效的^[13],是值得推广的康复新技术。

然而,关于脑机接口技术在卒中后功能恢复中的应用还处于探索中,最佳干预时间、干预剂量、干预模式等方面存在一定疑问。因此,在本研究中,我们将基于运动想象的脑机接口技术与多模态感知反

馈训练相结合,进一步探究该干预方式对脑卒中严重偏瘫患者的上肢运动功能障碍改善的作用,以期脑机接口技术在临床中的应用提供更多的理论依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究所纳入的受试者为2020年10月—2021年10月期间在复旦大学附属华山医院北院康复医学科住院的12例慢性期脑卒中严重上肢偏瘫患者。

纳入标准:①经头颅CT或MRI证实脑血管事件者;②诊断符合《中国脑血管病分类2019》^[14]中脑血管病诊断要点的首次脑卒中患者;③患侧腕关节严重障碍,腕伸肌群的徒手肌力测定评级在0—1级者;④患侧严重上肢运动功能障碍(FMA-UE<31分)者^[15];⑤MMSE筛查无认知障碍者;⑥年龄为20—75岁,男女不限;⑦无听觉或视觉障碍者;⑧病程在6个月及以上者;⑨生命体征平稳,血糖、血压控制良好(<140/90mmHg),无心律失常者。

排除标准:①经中文版运动及视觉调查问卷显示无法进行运动想象任务,得分<25分^[16]者;②颅内金属植入物或有心脏起搏器等导致不能进行经颅磁刺激检查者;③依从性差,不能配合完成试验者;④参与其他临床试验者。

本研究已通过华山医院伦理委员会审查[批号:(2020)临审第(044)],并已在中国临床试验注册中心注册(注册编号:ChiCTR2000034725)。所有受试者在干预前均签署书面知情同意书。

本研究共纳入12例患者,其中男性8例,女性4例,平均年龄为(55.08±13.22)岁,中位病程在10(7, 19)个月,平均FMA-UE评分为(13.50±8.20)分,ARAT评分为(3.08±5.96)分,患者的一般资料情况见表1。

1.2 研究方法

所有受试者都接受常规康复训练,包括物理治

表1 患者一般资料情况

患者	性别	年龄 (岁)	诊断	偏瘫侧	病程 (月)	有无主 动伸腕	有无主 动屈腕
1	男	43	脑出血	左	8	无	无
2	女	31	脑梗死	右	22	无	有
3	男	42	脑出血	左	20	无	无
4	女	55	脑出血	左	8	无	无
5	女	58	脑出血	右	7	无	无
6	男	56	脑梗死	右	8	无	无
7	男	68	脑梗死	左	16	无	无
8	男	65	脑出血	左	11	无	无
9	男	75	脑梗死	左	6	无	无
10	男	41	脑梗死	左	20	无	无
11	男	66	脑梗死	左	7	无	无
12	女	61	脑梗死	左	13	无	有

疗、作业治疗和物理因子治疗(中频电刺激疗法、低频电刺激疗法、激光治疗、超声波治疗等),每天总训练时间2h,每周5次,持续4周。

1.2.1 试验设备:本研究所使用的设备为基于运动想象的BCI联合多模态感知反馈训练装置,包括预设程序的电脑系统、提供视觉反馈的电脑屏幕和VR眼镜、脑电信号放大器及附件以及提供感觉输入的手板和毛刷。其中,脑电信号放大器包括变压器、脑电主控盒、脑电放大盒以及电极。

1.2.2 基于运动想象的脑机接口联合多模态感知反馈训练:所有受试者都在常规康复训练基础上,每日增加基于运动想象的脑机接口联合多模态感知反馈训练,每次30min,每周5次,持续4周,共20次。首次训练时由专门的康复医师对每位患者进行详细讲解。具体训练步骤:①准备工作:按标准姿势佩戴脑电帽、VR眼镜,同时进行系统的启动准备;②开始训练:系统启动后,由面板上的毛刷输出感觉刺激,在毛刷刺激结束后,提示受试者以VR眼镜中虚拟手前出现的红色小球为任务开始信号,进行该侧手腕伸展抓球的运动想象任务。每次训练包括4组,每组进行20次随机单手的运动想象任务,时间为6min,每组循环之间休息2min。在训练过程中,计算机实时采集并分析脑电信号,提取脑电特征信号并进行转化,若该模式与预设模式一致,虚拟手将根据受试者的运动想象完成情况显示相应的动作(伸展或抓取),并由VR眼镜提供实时视觉反馈。整个训练过程如图1所示。在干预前后对所有患者进行相关不良反应(导电膏

过敏、头晕等)的问卷调查并予以记录。

1.3 评估指标

1.3.1 Fugl-Meyer评定量表上肢部分(modified Fugl-Meyer assessment-upper extremity, FMA-UE):该量表为主要评估指标,包括近端肢体、腕、手和整体协调能力4部分,总分66分,分数越低表明功能越差。

1.3.2 手臂动作调查测试(action research arm test, ARAT):该量表包括抓、握、捏以及粗大运动四大部分,共19个测试项目,每项任务的完成质量采用4级法(0—3分)评定,能够评估脑卒中后广泛的上肢运动功能。

1.3.3 腕关节主动活动度:对于出现主动腕关节屈伸的患者,应用量角器测量其主动关节活动范围。

1.3.4 Barthel指数(Barthel index, BI):用于评估患者的日常生活活动能力。

1.3.5 运动诱发电位(motion evoked potential, MEP):用于评估干预前后皮质脊髓束的完整性。

1.4 统计学分析

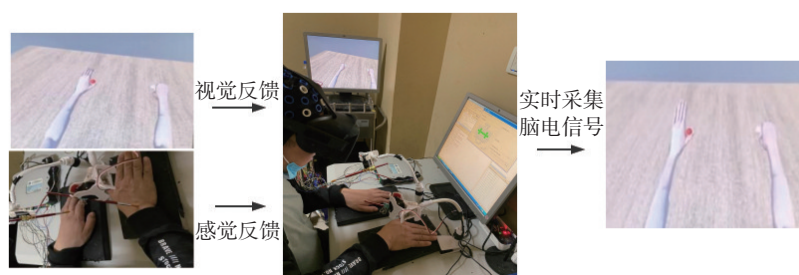
应用SPSS 20.0软件对数据进行统计分析。符合正态分布的计量资料采用均数±标准差表示,偏态分布采用中位数(下四分位数,上四分位数)表示。不符合正态分布的计量资料和计数资料采用一般的 χ^2 检验或Fisher精确检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 运动功能评估

干预前,主要评价指标的FMA-UE评分为(13.50±8.20)分,经过20次训练后,增加到(15.92±9.28)分,干预前后具有显著性差异($P<0.05$);同时ARAT评分也在干预后从(3.08±5.96)分增加(4.75±7.52)分,结果具有显著差异($P<0.05$)(图2—3)。干

图1 基于MI的BCI联合多模态感知反馈训练



干预前,12例患者均无主动伸腕动作,2例患者存在小范围主动屈腕,干预后有4例出现主动腕背伸,6例患者出现更为明显的腕背屈(表2—3)。

2.2 日常生活活动能力评估

干预前后 Barthel 指数评分为(70.42 ± 15.44)分和(72.92 ± 10.97)分,前后比较无显著性差异($P=0.339$)(表2)。

2.3 神经电生理评估

干预前后也对所有受试者进行运动诱发电位的评

估,使用设备为依瑞德的MagTD磁场刺激仪,有10例患者进行了标准的前后评估(其中2例患者因某些客观原因未能完成该项评估)。干预前,12例患者的患侧均不能诱发出标准的MEP,健侧可正常诱发MEP,平均潜伏期为(25.04 ± 2.41)ms,波幅为(0.72 ± 0.56)mV;干预后,所有患者的患侧MEP仍不能诱发出,健侧平均潜伏期为(26.29 ± 3.25)ms,波幅为(0.27 ± 0.38)mV。干预前后潜伏期比较无显著性差异($P>0.05$),而波幅之间的差异有显著性意义($P<0.05$)(表2)。

表2 运动功能及日常生活活动能力结果比较

指标	干预前 ($\bar{x} \pm s$)	干预后 ($\bar{x} \pm s$)	P值	t值	95% 置信区间
FMA-UE(分)	13.50 ± 8.20	15.92 ± 9.28	0.002	4.143	[1.13, 3.70]
ARAT(分)	3.08 ± 5.96	4.75 ± 7.52	0.034	2.419	[0.15, 3.18]
BI(分)	70.42 ± 15.44	72.92 ± 10.97	0.339	1.000	[-3.00, 8.00]
MEP-潜伏期(ms)	25.04 ± 2.41	26.29 ± 3.25	0.153	1.559	[-0.57, 3.07]
MEP-波幅(mV)	0.72 ± 0.56	0.27 ± 0.38	0.010	-3.234	[-0.77, -0.14]

注:FAM-UE、ARAT、BI评分以及MEP的潜伏期和波幅符合正态分布

表3 12例受试者干预前后患侧腕关节活动度比较

受试者	干预前 屈腕	干预后 屈腕	干预前 伸腕	干预后 伸腕
1	无	无	无	无
2	10°	10°	无	60°
3	无	15°—20°	无	无
4	无	15°	无	10°
5	无	无	无	无
6	无	无	无	无
7	无	无	无	无
8	无	15°—20°	无	无
9	无	60°	无	15°—20°
10	无	无	无	无
11	无	无	无	无
12	45°—60°	45°—60°	无	30°—45°
患侧腕关节主动 活动占比	20%	60%	0	40%

图2 12例受试者FMA-UE干预前后比较

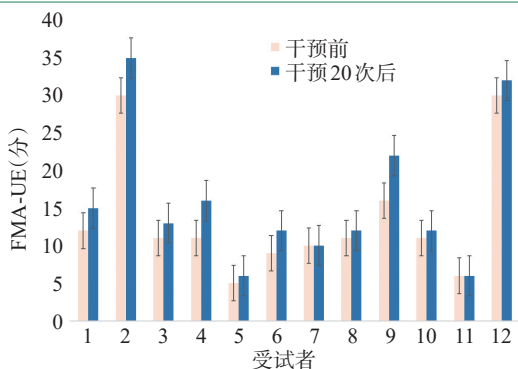
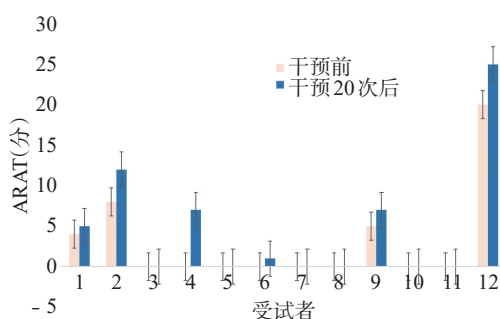


图3 12例受试者ARAT评分干预前后比较



3 讨论

既往研究已经证实,规范的康复训练可有效促进脑卒中患者的功能恢复^[17-18]。然而,由于上肢功能尤其是手功能的复杂性,目前尚无行之有效的康复训练能有效改善脑卒中患者上肢运动功能的恢复,在慢性期患者中犹是如此,因此亟需探寻更加有效且适配性强的新型康复方法。而BCI技术的不断发展或许可以为目前的康复治疗提供新的思路。关于BCI技术在脑卒中后功能恢复中的应用已在不断探索中^[19-21],其中,基于患者主动运动想象过程的脑机接口系统是较为广泛应用的。

在康复治疗技术中,运动想象疗法本身也是近

年来的研究热点^[22-23]。一般而言,任务导向性训练需要患者具有一定的运动功能基础,因此,运动功能严重受损的患者可能无法完成上述疗法,而运动想象疗法对患者残余运动功能的需求较小,因此,可用于具有严重运动功能障碍的患者。

偏瘫是脑卒中患者最常见的功能障碍,但许多脑卒中患者也存在不同程度的感觉障碍,包括深浅感觉的减退或缺失^[24]。有研究证实,感觉功能的恢复可以促进运动功能的恢复,因此,在治疗中增加感觉输入及输出可能发挥重要作用^[25-27]。从中枢层面来看,也存在着运动-感觉通路的整合,因此,同时结合感觉输入和运动输出,或能更有效地促进中枢神经系统功能的恢复。

在受试者方面,本研究共纳入12例慢性期脑卒中患者(病程>6个月)。在纳入本研究之前,所有患者均进行了较为规范的康复治疗,但其上肢运动功能恢复效果欠佳。而在接受基于运动想象的脑机接口联合多模态感知反馈训练后,其上肢功能都在一定程度上得到了改善。作为主要评估指标的FMA-UE评分较干预前具有显著差异($P=0.002$),而且分别有6例和4例受试者在干预后出现了主动屈腕和伸腕动作。根据目前康复理论,在脑卒中病程达到6个月以后,功能恢复可能进入平台期,本研究所纳入的患者均处于常规意义上的平台期中,在参与研究前的很长一段时间里(至少3周的规范康复治疗)都未能获得功能恢复。这表明在脑卒中患者中应用基于运动想象的脑机接口联合多模态感知反馈训练是可行且有效的。

在脑卒中患者中,上肢功能恢复较下肢更缓慢且困难,这是因为在大脑皮层中,控制上肢部分的皮层面积更大更多,且上肢及手的功能更加精细,目前缺乏行之有效的康复干预。本研究中所使用的干预技术,或能“重启”处于功能恢复停滞阶段的患者的恢复进程,因此是慢性期卒中患者可积极尝试的新型治疗技术之一。

在我们的结果中,日常生活活动能力在干预前后未见明显变化,考虑有以下几点原因:首先,我们都知道,康复的最终目的是为了改善日常生活,无论是受损功能的恢复还是健侧功能的代偿,而对于慢性期的卒中患者来说,已经接受了较长期的规范化

康复治疗,已经形成了较为稳定的日常活动能力,短期内不会出现较大变动;其次,虽然我们的行为学结果显示出较为显著的改善,但是我们知道,日常生活的改善需要的不仅仅是单一功能的改善。因此,在本研究中日常生活活动能力未见明显变化。

目前,关于康复训练促进脑卒中后功能恢复的机制有多种,包括损伤脑周围脑组织的功能代偿、健侧大脑的功能代偿等^[28-29],并由此演变而出患侧代偿、健侧代偿、半球间竞争和双模态平衡恢复等多种理论。最近有研究发现^[29],脑卒中后功能恢复在康复治疗过程中是动态变化的过程,脑功能连接的特征并不会以统一方式变化,神经元亚群(抑制性和兴奋性)会根据功能行为状态的不同发生不同变化。本研究中,通过神经电生理对干预前后患者的大脑皮层兴奋性进行检测,结果显示在经过基于MI的BCI联合多模态感知反馈训练后,健侧的MEP潜伏期延长,波幅减低($P<0.05$),这表明健侧大脑皮层的兴奋性较干预前有所降低。虽然我们仍未能在患侧大脑皮层诱发出MEP,但由此我们可以猜测,在脑卒中慢性期的功能恢复中,损伤脑对健侧脑存在一定的抑制作用,其功能代偿的贡献可能优于健侧脑,但这仅仅是初步猜测,在后续研究中我们会加入功能性磁共振进行机制的探索。

本研究中,所有患者在干预后均未出现相关不良反应,例如头晕目眩、导电膏过敏等,这也证明患者在BCI训练过程中是安全的。

本研究也存在一定局限性。首先,本研究样本量较小,结果分析可能存在一定偏差;其次,本研究为探索性研究,仅验证了BCI训练在常规训练基础上的有效性,未将该技术与目前临床常用的康复干预方法进行比较,所得结论可靠性不足,循证等级尚较低,因此需要在后续研究中设立对照组,并对患者的运动功能进行基线评估,进一步提高结果的可靠性;最后,本研究仅观察了干预后的短期有效性,未对长期有效性进行随访,在以后的研究中应增加长期功能改善的观察。

综上所述,基于运动想象的脑机接口联合多模态感知反馈训练可有效促进卒中后上肢功能的恢复,对慢性期卒中患者疗效亦可,且不存在不安全因素,是值得进一步研究及推广的康复治疗新技术。

参考文献

- [1] Hibaut A, Chatelle C, Ziegler E, et al. Spasticity after stroke: physiology, assessment and treatment[J]. Brain Inj, 2013,27(10):1093—1105.
- [2] Twitchell TE. The restoration of motor function following hemiplegia in man[J]. Brain,1951,74(4):443—480.
- [3] Veerbeek JM, Kwakkel G, van Wegen EE, et al. Early prediction of outcome of activities of daily living after stroke: a systematic review[J]. Stroke,2011,42(5):1482—1488.
- [4] Lebedev MA, Nicolelis MA. Brain-machine interfaces: from basic science to neuroprostheses and neurorehabilitation [J]. Physiol Rev,2017,97(2):767—837.
- [5] Kennedy PR, Adams KD. A decision tree for brain-computer interface devices[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2003,11(2):148—150.
- [6] Kübler A, Kotchoubey B, Kaiser J, et al. Brain-computer communication: unlocking the locked in[J]. Psychol Bull, 2001,127(3):358—375.
- [7] Kübler A, Nijboer F, Mellinger J, et al. Patients with ALS can use sensorimotor rhythms to operate a brain-computer interface[J]. Neurology,2005,64(10):1775—1777.
- [8] Muralidharan A, Chae J, Taylor DM. Extracting attempted hand movements from EEGs in people with complete hand paralysis following stroke[J]. Front Neurosci,2011(5)39.
- [9] Gomez-Rodriguez M, Grosse-Wentrup M, Hill J, et al. Towards brain-robot interfaces in stroke rehabilitation[J]. IEEE Int Conf Rehabil Robot,2011(2011)5975385.
- [10] 刘小曼,毕胜,高小榕,等.基于运动想象的脑机交互康复训练新技术对脑卒中大脑可塑性影响[J].中国康复医学杂志, 2013,28(2):97—102.
- [11] Lu RR, Zheng MX, Li J, et al. Motor imagery based brain-computer interface control of continuous passive motion for wrist extension recovery in chronic stroke patients [J]. Neurosci Lett,2020(718)134727.
- [12] Sirigu A, Cohen L, Duhamel JR, et al. Congruent unilateral impairments for real and imagined hand movements[J]. Neuroreport,1995,6(7):997—1001.
- [13] Raspopovic S, Carpaneto J, Udina E, et al. On the identification of sensory information from mixed nerves by using single-channel cuff electrodes[J]. J Neuroeng Rehabil, 2010(7)17.
- [14] 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.
- [15] Hayward KS, Schmidt J, Lohse KR, et al. Are we armed with the right data? Pooled individual data review of biomarkers in people with severe upper limb impairment after stroke[J]. Neuroimage Clin,2016(13)310—319.
- [16] 刘华,程钰琦,李洋,等.中文版运动觉-视觉想象问卷的结构效度[J].中国康复理论与实践,2017,23(5):580—583.
- [17] Lin KC, Chung HY, Wu CY, et al. Constraint-induced therapy versus control intervention in patients with stroke: a functional magnetic resonance imaging study[J]. Am J Phys Med Rehabil,2010,89(3):177—185.
- [18] Hebert D, Lindsay MP, McIntyre A, et al. Canadian stroke best practice recommendations: stroke rehabilitation practice guidelines, update 2015[J]. Int J Stroke, 2016,11(4):459—484.
- [19] Nojima I, Sugata H, Takeuchi H, et al. Brain-computer interface training based on brain activity can induce motor recovery in patients with stroke: a meta-analysis[J]. Neuro-rehabil Neural Repair,2022,36(2):83—96.
- [20] Hu YQ, Gao TH, Li J, et al. Motor imagery-based brain-computer interface combined with multimodal feedback to promote upper limb motor function after stroke: a preliminary study[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2021(2021)1116126.
- [21] Colamarino E, de Seta V, Masciullo M, et al. Corticomuscular and intermuscular coupling in simple hand movements to enable a hybrid brain-computer interface[J]. Int J Neural Syst,2021,31(11):2150052.
- [22] 曲斯伟,宋为群.运动想象联合优化运动技能训练对脑卒中患者上肢运动功能的影响[J].中国康复医学杂志,2020,35(2):151—155+160.
- [23] Mihelj E, Bächinger M, Kikkert S, et al. Mental individuation of imagined finger movements can be achieved using TMS-based neurofeedback[J]. Neuroimage,2021(242)118463.
- [24] Doyle S, Bennett S, Fasoli SE, et al. Interventions for sensory impairment in the upper limb after stroke[J]. Cochrane Database Syst Rev,2010,2010(6):CD006331.
- [25] 刘思曼,何万兴.PNF与静态牵伸技术对偏瘫患者痉挛影响的比较研究[J].四川体育科学,2021,40(3):46—49.
- [26] 王晓蕾,刘向明.针刺联合感觉刺激疗法治疗脑卒中后上肢功能障碍的临床疗效[J].中西医结合心脑血管病杂志,2021,19(3):489—491.
- [27] Tsuzuki K, Kawakami M, Nakamura T, et al. Do somatosensory deficits predict efficacy of neurorehabilitation using neuromuscular electrical stimulation for moderate to severe motor paralysis of the upper limb in chronic stroke?[J]. Ther Adv Neurol Disord,2021(14)17562864211039335.
- [28] Guggisberg AG, Nicolo P, Cohen LG, et al. Longitudinal structural and functional differences between proportional and poor motor recovery after stroke[J]. Neurorehabil Neural Repair,2017,31(12):1029—1041.
- [29] Latifi S, Mitchell S, Habibey R, et al. Neuronal network topology indicates distinct recovery processes after stroke [J]. Cereb Cortex,2020,30(12):6363—6375.