

医学康复

· 临床研究 ·

智能机器人康复手套对脑卒中偏瘫患者手功能的疗效

毕文倩^{1a}, 张锴文^{2a}, 刘金^{1b}, 王娜^{1c}, 李海舰^{1d}, 张涵莱^{2a},
吴金雨^{2a}, 王彤^{2b}, 王淑友^{2c}, 许晓冬^{1b}, 张建梁^{2a}

【摘要】 目的:观察智能康复机器人手套辅助训练对脑卒中偏瘫患者手功能的康复效果。方法:60例脑卒中住院患者随机分为2组,2组患者均给予运动疗法、物理因子疗法等传统康复方法治疗。另外,对照组患者进行抓握等常规手功能训练,观察组使用康复机器人手套进行上肢及手功能训练,完成抓握、捡球、持物等动作。记录患者治疗前、治疗后1周、2周、3周的Wolf运动功能评定(WMFT)分数及手功能评定分数。结果:与治疗前比较,治疗1周后2组的WMFT及手功能评分均有显著提高(均 $P<0.05$),但2组间的WMFT及手功能评分无明显差异;治疗2周和3周后,2组的WMFT及手功能评分均较治疗前明显升高(均 $P<0.01$),且观察组WMFT及手功能评分明显高于对照组($P<0.05$)。结论:智能康复机器人手套辅助训练能够改善脑卒中偏瘫患者上肢和手功能,值得进一步推广使用。

【关键词】 脑卒中;偏瘫;智能机器人康复手套;Wolf运动功能评定;手功能评定

【中图分类号】 R49;R743.3 **【DOI】** 10.3870/zgkf.2023.03.001

Effectiveness of Intelligent Robotic Rehabilitation Gloves for Stroke-induced Hemiplegic Hands Bi Wenqian, Zhang Kaiwen, Liu Jin, et al. Cangzhou Hospital of Integrated TCM-WM of Hebei Province, Cangzhou 061000, China

【Abstract】 **Objective:** To observe the effectiveness of intellectual rehabilitation robot-assisted glove therapy for hand and upper limbs function in patients with stroke-induced hemiplegia. **Methods:** A total of 60 patients with stroke-induced hemiplegia were recruited and then equally divided into control group ($n=30$) and observation group ($n=30$). Both groups were treated with traditional rehabilitation methods such as exercise therapy and physical factor therapy. In addition, the control group received conventional therapy of routine hand function training such as grasping and holding, and the treatment group received the robot-assisted therapy to perform the exercise of the upper limb and hand function by grasping, picking up a ball and holding objects with the intellectual rehabilitation gloves. The effectiveness was assessed by Wolf Motor Function Test (WMFT) and hand function evaluation (HFE) at 1, 2 and 3 weeks post-treatments. **Results:** In comparison with pre-treatments, the scores of WMFT and HFE in all time-points (week 1, week 2 and week 3) of both groups were significantly higher ($P<0.01$); In comparison with week 1, the scores of WMFT and HFE in both groups in week 2 and week 3 were significantly higher ($P<0.01$). The scores of WMFT and HFE in week 3 were higher than those in week 2 ($P<0.01$); In week 1, there was no significant difference in the scores of WMFT and HFE between the control group and the treatment group. In week 2 and week 3, however, the scores of WMFT and HFE in the treatment group were higher than those in the control group ($P<0.05$). **Conclusion:** Robot-assisted therapy with the intellectual flexible robotic rehabilitation gloves could improve the function of upper limb and hands of patients with stroke-induced hemiplegia.

【Key words】 stroke; hemiplegia; soft wearable intellectual rehabilitation gloves; Wolf motor function test; hand function evaluation

基金项目:国家重点研发计划“中医药现代化研究”专项(2018YFC1707804)

收稿日期:2022-07-21

作者单位:1.沧州中西医结合医院 a.外七科,b.神经康复三科,c.针灸科,d.康复治疗科,河北 沧州 061000;2.中国中医科学院 a.针灸研究所机能研究室,b.针灸医院骨伤推拿科,c.针灸研究所针灸医学工程室,北京 100700

作者简介:毕文倩(1984-),女,主治医师,主要从事整形与康复方面的研究。

通讯作者:张建梁,2572162050@qq.com

脑卒中是以脑血管堵塞或者破裂引起脑组织不能正常得到血液供应,进而损伤脑组织,影响机体正常的运动、感觉、意识、认知、言语、吞咽等功能的一种神经

系统疾病。我国每年新增病例 200 多万人,高居全球之首,而且发病率呈逐年上升并有明显的年轻化趋势^[1-2]。据统计,卒中后高达 85% 的患者伴有单侧上肢手运动功能障碍,需要出院后继续接受康复训练,这不仅是患者重返社会的主要障碍,也为其家庭带来沉重的经济负担^[3-4]。

康复训练是降低脑卒中致残率最有效的方法。康复治疗介入脑卒中后运动障碍恢复的最佳时机是在发病早期,介入的越早,患者的肢体功能障碍恢复的越好^[5-6]。目前,临床上常用的偏瘫康复治疗方法包括传统康复疗法如作业疗法、针灸推拿以及电、磁、超声波、温度等物理因子刺激疗法,这些方法虽然可改善肢体功能,但费力耗时,过程单一。患者每天重复治疗容易感觉枯燥,导致训练积极性下降。另外,由于人手短缺,康复治疗师往往长期处于超负荷工作状态,这在一定程度上也会降低了临床治疗效果^[7]。

近年来,智能康复机器人逐渐成为一种重要的辅助康复手段,在临床上被广泛应用^[7]。它具有趣味性、无疲劳、量化等优点,能增加运动强度,提高训练效率,丰富治疗过程,减少治疗师的工作负担。经过适当示范培训,患者可进行居家自我康复训练^[8-9],这将极大地提高患者治疗的便利性与依从性。本研究分析比较常规康复方法与智能软体手功能康复机器人辅助训练对患者上肢及手功能恢复效果的差异。

1 资料与方法

1.1 一般资料 随机选取 2021 年 1 月~2021 年 12 月在河北省沧州中西医结合医院康复院区住院的脑卒中患者 60 例。符合《中国各类主要脑血管病诊断要点 2019》中的相关诊断标准^[10]。入选标准:首次发生脑梗死或脑出血,并经 CT 或 MRI 影像学证据证实;出现上肢运动障碍经治疗病情平稳,发病在 3 个月内,年龄 49~80 岁;偏瘫手功能评价为无随意运动、细微屈伸、共同运动达高峰(钩状抓握不能伸);神志清楚,无听理解、视理解障碍,能配合康复治疗师指令;Brunnstrom 分期Ⅲ期;无参与既往同类研究。排除标准:认知功能障碍,不能配合治疗的患者;排除治疗过程中出现新发脑卒中患者;排除出现病情变化不能继续康复治疗的患者;排除既往脑卒中遗留上肢、手功能障碍的患者;排除患者及家属不同意参加该研究者。本研究经河北省沧州中西医结合医院伦理委员会审核批准(No. 2021-KY-129),所有入组患者或家属知情并签订了知情同意书。60 例患者随机分为 2 组各 30 例,2 组一般资料比较差异均无统计学意义。见表 1。

1.2 方法 2 组患者均给予调控血压、血糖与凝血状

表 1 2 组患者一般资料比较

组别	n	性别 (男/女,例)	年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	病程 (周, $\bar{x} \pm s$)
对照组	30	16/14	66.46 $\pm$ 8.44	11.60 $\pm$ 5.43
观察组	30	17/13	63.63 $\pm$ 7.90	10.76 $\pm$ 3.45
χ^2/t 值		0.067	1.342	0.654
P 值		0.795	0.185	0.516

态,改善血液循环,加强神经保护以及并发症处理等常规内科治疗。另外,2 组患者同时接受肢体综合康复训练如良肢位摆放、运动疗法、物理因子疗法等康复治疗。对照组患者进行抓握等常规手功能训练,观察组使用康复机器人手套进行上肢及手功能训练,完成抓握、捡球、持物等动作。2 组均每日训练 1 次,每次 30min,每周 5d,持续 3 周,共治疗 15 次。

1.2.1 观察组 患者坐位,身体保持放松,上肢放置在桌面上,将智能软体手功能康复机器人手套(图 1)佩戴于患侧手,健侧手佩戴数据传感手套,通过程序控制器启动,用健侧手引导患侧手进行手部的主动、被动运动及抗阻训练,包括手指的全部屈伸、单个手指的屈伸、抗阻运动及功能场景内容,完成抓握、捡球、持物等多个动作(图 2)。



图 1 康复机器人手套



图 2 康复机器人手套训练场景

1.2.2 对照组 ①患侧上肢支撑在侧方床沿或侧方凳子上,将肘关节伸直,以增加患侧上肢的使用;②患侧上肢进行推轮椅滞留练习,加强患侧肩胛带的使用以及手的抓握动作训练;③患侧上肢放置在一个合适

高度的PT(治疗师辅助治疗)凳上,肘关节伸直并前推凳子,加强肩部的前屈动作运动;④对每个手指分别进行关节被动活动,通过健手带动患手完成抓取木棍动作,并由治疗师帮助强化患手的抓握训练。

1.3 评定标准 记录所有患者治疗前、治疗1、2及3周后Wolf运动功能评定量表与手功能评定分数情况。

1.3.1 Wolf运动功能评定量表 该量表包含15项评定任务,每项任务均需在2min内完成,否则计为1分,时间记为2min。其中项目1~7主要测试单关节(近端肢体的肩、肘关节)运动能力,包括①前臂放到桌子(侧面);②前臂由桌子放到盒子(侧面);③在桌面上伸肘(侧面);④在桌面有负荷伸肘(侧面);⑤手放到桌子(正面);⑥手由桌子放到盒子(正面);⑦在桌面屈肘拉回0.45kg的物体。而项目8~15测试包括手关节在内的整个上肢共同运动的能力,分别为⑧拿起易拉罐边;⑨从桌面上拿起铅笔;⑩从桌面上拿起曲别针;⑪叠放3个棋子;⑫翻转3张纸牌;⑬在锁中转动钥匙;⑭叠毛巾;⑮提1.35kg篮子到旁边的桌子上。每项任务根据完成质量,分为6个等级(0~5分),最高评分为5分,最低为0分,总分为75分。评分结果越高,代表上肢运动功能越好^[11-12]。

1.3.2 手功能评定分数 该量表包括对指(10分)、对掌(10分)、手指内收/外展(10分)、手指屈伸TAM(20分)、腕关节旋转(5分)、腕关节屈伸(5分)、日常活动(20分)、感觉功能(10分)、外观(10分)等9项评定任务,总分为100分。80~100分为优,60~79分为良,40~59分为中,0~39分为差。

1.4 统计学方法 采用SPSS 22.0软件进行数据分析。计量资料符合正态分布的数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组内均数比较采用配对 t 检验;组间均数比较采用独立样本 t 检验。不符合正态分布的数据采用M(P25,P75)表示,组间与组内数据分析均采用秩和检验。计数资料采用 χ^2 检验。以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 Wolf运动功能评定量表评定 治疗前,2组Wolf运动功能评分差异无统计学意义。与治疗前比较,治疗1周后2组的WMFT评分均有显著提高(均 $P < 0.05$),但2组间的WMFT评分无明显差异;治疗2周和3周后,2组的WMFT评分均较治疗前明显升高(均 $P < 0.01$),且观察组WMFT评分明显高于对照组($P < 0.05$)。见表2。

2.2 手功能评定 治疗前,2组患者手功能评分差异无统计学意义。与治疗前比较,治疗1周后2组的手

功能评分均有显著提高(均 $P < 0.05$),但2组间的手功能评分无明显差异。治疗2周和3周后,2组的手功能评分均较治疗前明显升高($P < 0.01$),且观察组手功能评分明显高于对照组($P < 0.05$)。见表3。

表2 2组治疗前后Wolf运动功能评分比较

组别	n	治疗前	治疗后		
			1周	2周	3周
对照组	30	11.13±4.86	17.26±2.97 ^a	21.53±5.83 ^{ab}	33.50±5.26 ^{abc}
观察组	30	10.76±3.45	18.96±5.02 ^a	24.70±5.70 ^{abd}	36.56±4.72 ^{abcd}

与治疗前比较,^a $P < 0.01$;与治疗第1周比较,^b $P < 0.01$;与治疗第2周比较,^c $P < 0.01$;与对照组比较,^d $P < 0.05$

表3 2组治疗前后手功能评分比较

组别	n	治疗前	治疗后		
			1周	2周	3周
对照组	30	13.63±7.12	18.60±6.36 ^a	23.20±6.22 ^{ab}	28.73±6.97 ^{abc}
观察组	30	11.60±5.43	17.50±5.68 ^a	26.96±4.21 ^{abd}	32.93±4.70 ^{abcd}

与治疗前比较,^a $P < 0.01$;与治疗第1周比较,^b $P < 0.01$;与治疗第2周比较,^c $P < 0.01$;与对照组比较,^d $P < 0.05$

3 讨论

手是人与环境交互作用的重要工具,在人们的日常生活中发挥着不可替代的关键作用。手通过各肌群协调屈伸、收展及对掌运动以完成捏、抓、握、显微操作等精细动作,其中涉及诸多信息编码及相关执行的认知加工过程^[13]。脑卒中后大量患者出现上肢特别是手部的运动功能障碍,主要表现为肌力减退和肌张力升高,严重影响其身心健康和生活质量。长期以来,手功能恢复一直是脑卒中后临床康复治疗的重点和难点。

本研究比较了传统康复法与机器人辅助康复法对脑卒中偏瘫患者的上肢及手部运动功能的疗效。结果显示,无论是传统康复法还是机器人辅助康复法,均能明显改善脑卒中偏瘫患者的上肢及手的运动功能。与治疗前相比,治疗后1周、2周、3周的WMFT评分与手功能评分均明显提高。同时,与治疗后第1周比,第2周和第3周的疗效均有显著性升高,而治疗后第2周与第3周的疗效也有明显增加,表明随着治疗时间的延长和治疗次数的增多,其疗效呈逐渐增高趋势,提示脑卒中后早期干预的必要性以及连续治疗的科学性。结果还显示,与传统康复疗法相比,机器人辅助康复法的疗效更加突出,尤其是在治疗后的第2周和第3周,提示除操作简单、安全无创以及趣味性强等诸多优势外,柔性穿戴式智能康复机器人手套辅助训练的可靠疗效还可为未来制订脑卒中患者上肢及手康复方案提供科学依据和技术支持。

机器人辅助训练是一种行之有效的脑卒中后偏瘫

上肢与手功能的康复方法,许多中外研究都证实了手部机器人对偏瘫上肢功能康复的有效性^[14-17]。侯红等^[17]报道,机器人辅助训练与传统作业治疗疗效相近。采用回顾性多中心研究方法,Colombo等^[18]比较了3种不同类型手部机器人对脑卒中后上肢功能的疗效,发现它们均可改善患侧上肢受损状态,提高其运动能力。侯莹等^[19]研究表明,基于运动想象的手部机器人辅助训练比常规康复训练更有效。本研究结果也显示,智能机器人康复手套对脑卒中偏瘫患者手功能的治疗效果优于传统康复方法,在治疗后第2周和第3周表现尤为明显。

近年来,随着技术的不断进步,外骨骼机器人在康复医疗领域备受重视,它主要针对患者手指肌张力增高、水肿、僵硬等症状进行治疗。和人工康复训练方法相比,外骨骼康复机器人辅助装置省时省力,患者康复过程中拥有更强的主控意识,有助于提高康复效率^[20];通过适宜的人机接口,这类康复器械可与传统康复手段相互补充,为脑卒中偏瘫患者手功能的恢复与重建提供合理的解决方案。本研究使用的羿生C10康复机器人手套融合柔性机器人辅助、神经科学及临床康复等技术原理,通过仿生气动人工肌肉,驱使手指关节、手腕关节被动活动或者主动运动,配以智能控制关节屈伸角度与屈伸时间,提供被动、助力、抗阻、双手镜像、声控以及主动游戏等多种训练模式,是全面覆盖从软瘫期到康复期全过程的手功能康复训练机器人。一般认为,康复机器人手套促进脑卒中后手功能恢复可能是通过外周和中枢两个途径实现的。康复机器人手套可以单独训练某个指关节或同时训练多个指关节,增加患侧手指的肌力以及关节的协调性。另外,通过强化训练患者的抓握能力等行为,有助于提升其生活技能及生活质量。有学者提出假说,认为康复机器人手套是一种基于中枢神经可塑性理论的“外周干预”手段。通过机器人手套辅助运动训练,不断将患侧上肢及手部本体感觉信号上传至大脑,激活支配患肢的运动神经元以促进中枢神经系统重塑和神经再支配,加速静脉和淋巴回流,缓解手指关节水肿,降低患侧手肌张力,从而实现脑卒中后手部运动功能的恢复^[21-22]。康复机器人手套在一定时间内重复性训练,不仅提高患者的手部运动功能,还可增加患者触觉及本体感觉信息的中枢传入,加速正常运动反射弧的形成。感觉运动经验能极大地影响脑损伤的恢复进程,高度重复的训练有助于患肢恢复运动功能。中风偏瘫患者的上肢在经过机器人辅助治疗后,其上肢功能及日常生活能力均得到显著改善^[23-24]。有研究表明,康复机器人辅助运动训练时,感觉和运动信息同步化优

于传统康复方法,这有助于患者形成正确的感觉-运动环路,促进神经系统功能的重塑,缓解脑卒中偏瘫患者上肢及手部肌肉痉挛,减轻神经功能受损程度,加快手功能的恢复,提高患者的日常生活活动能力和社会参与能力^[25-27]。

控制机体运动的最高结构位于大脑皮层运动区,它主要是由初级运动区、前运动区以及辅助运动区三部分组成。它们或通过皮层脊髓束直接、或通过脑干下行通路间接影响脊髓前角运动神经元的传出活动。前运动区与辅助运动区均有纤维投射至初级运动区,以协调复杂性的运动过程。同时,它们也接受来自后顶叶皮层以及前额叶联络皮层的纤维传入^[28]。最新研究表明,后顶叶皮层是大脑中一个处理多种感觉、运动信息的联合脑区,其接收来自视觉、听觉和躯体感觉系统的多种信息传入,它的传出目标是与运动相关的脑区,是大脑网络中感觉-运动整合的枢纽^[29-30]。我们推测,佩戴机器人手套进行康复训练时,来自手的感觉信息经背根节、脊髓背角、丘脑三级神经上传至感觉皮层,经联络纤维投射到大脑皮层运动区后,激活相关运动神经元,然后通过直接或间接下行通路,兴奋脊髓前角运动神经元,以增加支配手部肌肉的传入冲动,提升其活动水平,从而防止肌肉萎缩,改善功能状态。

脑血流量是反映局部脑功能变化和代谢状态的一个敏感指标,大脑血流量增加,可提高脑的运动和运动前皮质区供血,促进神经功能恢复,继而改善上肢运动功能^[31-32]。孟灵等^[33]报道,采用康复机器人手套连续治疗20d后,脑卒中手功能障碍患者患侧手的最大握力、患侧腕关节背伸和掌屈活动度、上肢功能研究量表评分均有明显改善,小脑皮层、额叶、顶叶、枕叶等区域的血流量显著增加,治疗的总有效率达76%,而且无明显不良反应。提示康复机器人手套可提高脑卒中手功能障碍患者患侧手最大握力,增大腕关节背伸、掌屈活动度,增加脑血流量,改善手部运动功能。采用脑电图及功能性磁共振成像技术研究发现,进行康复机器人手套训练时活跃的脑区不仅在M1运动区,中央旁小叶、顶叶、额叶等多个脑区同时被激活,并且脑区活动随着训练次数的增多而增加,患者手功能评分也会随之提高^[34-35]。我们采用红外热成像和血流灌注成像技术观察到,佩戴软体机器人手套训练后,脑卒中偏瘫患者患侧手的手掌、手背血流均明显增加,温度升高,提示机器人康复训练通过增加关节肌肉活动,改善局部血供,防止关节僵硬和肌肉萎缩(待发表资料)。

本研究的局限性在于仅为单中心研究,所观察地病例数较少,疗程较短,检测指标不多,缺乏长期疗效观测与随访,下一步我们将开展多中心研究,扩大检测

指标,增加样本量,延长治疗疗程,完善后期随访,深入探讨手功能康复机器人对脑卒中偏瘫患者手上肢功能障碍的疗效及其作用机制,以更客观、全面、准确地进行疗效评价。

本研究证实,采用柔性可穿戴式康复机器人手套进行康复训练能显著改善脑卒中偏瘫患者的上肢及手的功能状态,这可能是通过增加感觉运动反馈、提高受损肢体局部以及大脑相关核团区域的血供、促进神经可塑性而实现的。目前,手功能康复机器人越来越多地应用于临床,为脑卒中患者提供重复性、渐进性、量化、规范化的康复治疗,从而降低脑卒中患者的致残率。该方法操作简单,疗效确凿,适用场景多元,无明显副作用,值得在社会上进一步推广使用。

【参考文献】

- [1] Wang W, Jiang B, Sun H, et al. Prevalence, incidence and mortality of stroke in China: results from a nationwide population-based survey of 480,687 adults [J]. *Circulation*, 2017, 135(8): 759-771.
- [2] Wu S, Wu B, Liu M, et al. Stroke in China: advances and challenges in epidemiology, prevention, and management [J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(4): 394-405.
- [3] Feigin VL, Krishnamurthi RV, Parmar P, et al. Update on the global burden of ischemic and hemorrhagic stroke in 1990-2013: the GBD 2013 study [J]. *Neuroepidemiology*, 2015, 45(3): 161-176.
- [4] Lee KB, Lim HS, Kim KH, et al. Six-month functional recovery of stroke patients [J]. *Int J Rehabil Res*, 2015, 38(2): 173-180.
- [5] Tschepel C, Dern S, Hensel L, et al. Brain responsivity provides an individual readout for motor recovery after stroke [J]. *Brain*, 2020; 143(6): 1873-1888.
- [6] 张通. 中国脑卒中康复治疗指南(2011 完全版)[J]. *中国康复理论与实践* 2012, 18(4): 301-318.
- [7] 李宇洪, 曾庆, 黄国志. 上肢康复机器人在脑卒中中的临床应用进展[J]. *中国康复理论与实践*, 2020, 26(3): 310-314.
- [8] 徐冬艳, 田茹锦, 刘珏, 等. 上肢智能反馈康复机器人联合常规康复治疗改善脑卒中患者上肢运动功能临床研究[J]. *康复学报*, 2018, 28(2): 11-17.
- [9] 姜荣荣, 叶正茂, 陈艳, 等. 上肢康复机器人对偏瘫上肢运动功能和日常生活能力的影响[J]. *中国康复*, 2020, 35(10): 517-521.
- [10] 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.
- [11] Morris DM, Uswatte G, Crago JE, et al. The reliability of the wolf motor function test for assessing upper extremity function after stroke[J]. *Arch Phys Med Rehab*, 2001, 82(6): 750-755.
- [12] Wolf SL, Lecraw DE, Barton LA, et al. Forced use of hemiplegic upper extremities to reverse the effect of learned nonuse among chronic stroke and head-injured patients. [J]. *Experimental Neurology*, 1989, 104(2): 125-132.
- [13] 杨钟亮, 文杨靓, 陈育苗. 基于 KF-LSTM 模型的手写数字轨迹的 sEMG 重建算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2019, 31(7): 1247-1257.
- [14] Veerbeek J, Langbroek-Amersfoort A, van Wegen E, et al. Effects of robot-assisted therapy for the upper limb after stroke [1]. *Neurorehabil Neural Re*, 2017, 31(2): 107-121.
- [15] 周游飞, 王德强, 李红卫, 等. 脑卒中后手部活动障碍的研究进展[J]. *中国康复*, 2017, 32(2): 151-154.
- [16] 刘霖, 朱琳, 单桂香, 等. 神经康复机器人对慢性期卒中偏瘫患者上肢功能康复的疗效分析[J]. *中国脑血管病杂志*, 2016, 13(11): 579-582.
- [17] 侯红, 范亚蓓, 吴玉霞, 等. 康复机器人辅助训练对偏瘫患者上肢功能及日常生活活动能力的影响[J]. *中同康复医学杂志*, 2015, 30(10): 1013-1016.
- [18] Colombo R, Pisano F, Delconte C, et al. Comparison of exercise training effect with different robotic devices for upper limb rehabilitation: a retrospective study [J]. *Eur J Phys Rehab Med*, 2017, 53(2): 240-248.
- [19] 侯莹, 高琳, 陈苗苗, 等. 基于运动想象的手部机器人辅助训练对脑卒中患者上肢运动功能的疗效[J]. *中国康复理论与实践*, 2019, 25(1): 81-85.
- [20] Colombo R, Pisano F, Micera S, et al. Robotic techniques for upper limb evaluation and rehabilitation of stroke patients[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2005, 13(3): 311-324.
- [21] 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, 31(11): 1180-1182.
- [22] 李光林, 郑悦, 吴新宇, 等. 医疗康复机器人研究进展及趋势[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 793-802.
- [23] Heo P, Gu GM, Lee SJ, et al. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering[J]. *Int J Precis Eng Man*. 2012, 13(5): 807-824.
- [24] 王娜娜, 路微波, 吴毅. 上肢康复机器人对脑卒中患者上肢功能及日常生活能力影响的研究进展[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2017, 39(9): 706-708.
- [25] 刘岩松, 孙青峰, 李红玲. 康复机器人在脑卒中后手功能康复中的研究进展[J]. *中国康复*, 2022, 37(7): 430-434.
- [26] Hu XL, Tong KY, Song R, et al. A comparison between electro-myography-driven robot and passive motion device on wrist rehabilitation for chronic stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2009, 23(8): 837-846.
- [27] 韩晴, 徐宁, 庄贺, 等. 运动想象疗法在卒中后运动功能障碍康复的研究进展[J]. *中国康复*, 2021, 36(6): 372-375.
- [28] 韩济生. 神经科学原理[M]. 北京: 北京医科大学出版社, 1999: 750-756.
- [29] Lin Z, Yuan Z, Chunyu AD, et al. Causal contributions of parietal cortex to perceptual decision-making during stimulus categorization[J]. *Nat Neurosci* 2019, 22(6): 963-973.
- [30] Zhou Y, Freedman DJ. Posterior parietal cortex plays a causal role in perceptual and categorical decisions[J]. *Science*, 2019, 365(6449): 180-185.
- [31] 韩广, 于秀英, 范欣. 三维动脉自旋标记技术的脑血流量绝对值在急性缺血性脑卒中的应用价值[J]. *医学影像学杂志*, 2018, 28(2): 196-199.
- [32] 谌德雄. 自拟中药方联合重复经颅磁刺激对脑梗死后脑血流量及肢体运动障碍的影响[J]. *慢性病学杂志*, 2019, 20(11): 1618-1621.
- [33] 孟灵, 杨松, 钟青华. 康复机器人手套结合电针治疗痉挛型脑卒中手功能障碍患者的临床研究[J]. *湖南中医药大学学报*, 2022, 42(3): 387-392.
- [34] Yuan K, Wang X, Chen C, et al. Interhemispheric Functional Reorganization and Its Structural Base After BCI-Guided Upper Limb Training in Chronic Stroke [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(11): 2525-2536.
- [35] Formaggio E, Storti SF, Boscolo G, et al. Time-frequency modulation of ERD and EEG coherence in robot-assisted hand performance [J]. *Brain Topogr*, 2015, 28(2): 352-363.