

单侧穿戴式外骨骼机器人训练对亚急性期脑卒中患者平衡和步行功能的影响

李颀安¹ 陈泽健¹ 夏楠¹ 顾明辉¹ 徐江¹ 谢晓宇² 黄晓琳¹

¹华中科技大学同济医学院附属同济医院康复医学科,武汉 430030; ²武汉体育学院体育科技学院,武汉 430079

通信作者:黄晓琳,Email: xiaolin2006@tjh.tjmu.edu.cn

【摘要】 目的 探讨单侧穿戴式外骨骼机器人训练对亚急性期脑卒中偏瘫患者下肢运动功能的影响。**方法** 将符合纳入和排除标准的脑卒中患者 40 例采用随机数字表法分为机器人组和对照组,每组 20 例。对照组患者采用常规下肢康复训练,机器人组则进行外骨骼辅助下肢运动训练,每日训练 40 min,每周训练 6 d,连续训练 3 周。于治疗前和治疗 3 周后(治疗后)采用功能性步行分级(FAC)、简式 Fugl-Meyer 运动功能量表下肢部分(FMA-LE)、Berg 平衡量表(BBS)和改良 Barthel 指数量表(MBI)分别评估 2 组患者的步行能力、下肢功能、平衡能力和日常生活活动能力,并采用坐站转移任务时,双下肢股直肌和胫前肌的健侧与患侧积分肌电值(iEMG)比值来评估 2 组患者患侧肌肉的激活情况和双侧肌肉激活对称性。**结果** 治疗后,2 组患者的 FAC 分级和 FMA-LE、BBS、MBI 评分较组内治疗前均显著改善($P<0.05$);且机器人组治疗后的 FAC 分级为(1.63±0.72)级,显著优于对照组治疗后($P<0.05$)。治疗后,2 组患者的股直肌和胫前肌健侧与患侧的 iEMG 比值较组内治疗前均显著改善($P<0.05$),且机器人组胫前肌健侧与患侧的 iEMG 比值显著优于对照组治疗后($P<0.05$)。**结论** 单侧穿戴式外骨骼机器人训练可有效地改善亚急性期脑卒中患者的步行、下肢运动、平衡功能和日常生活活动能力,促进患侧下肢肌肉激活及提高双侧下肢肌肉激活对称性。

【关键词】 外骨骼机器人; 脑卒中; 下肢运动功能; 康复

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52175268)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.02.003

Training in a wearable exoskeleton improves the lower limb motor recovery of stroke survivors

Li Yangan¹, Chen Zejian¹, Xia Nan¹, Gu Minghui¹, Xu Jiang¹, Xie Xiaoyu², Huang Xiaolin¹

¹Department of Rehabilitation Medicine, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China; ²Sport Science and Technology College of Wuhan Sports University, Wuhan, 430079, China

Corresponding author: Huang Xiaolin, Email: xiaolin2006@tjh.tjmu.edu.cn

【Abstract】 Objective To explore any differential effect of training wearing a unilateral exoskeleton on the lower-limb motor function of stroke survivors. **Methods** Forty stroke survivors were randomly divided into an exoskeleton group ($n=20$) and a control group ($n=20$). The control group performed conventional lower extremity exercise training while the exoskeleton group received exoskeleton-assisted lower-limb physical therapy. Each participant received eighteen 40-minute training sessions over three weeks. Before and after the intervention, the walking ability, lower-limb function, balance and ability in the activities of daily living of both groups were evaluated. Integrated electromyography (iEMG) of the rectus femoris and tibialis anterior of both legs was also recorded during sit-to-stand transitions to assess the activation of the affected muscles and the symmetry of bilateral muscle activation. **Results** After the three weeks, significant improvement was observed in all of the measurements in both groups, but with the exoskeleton group scoring significantly better on average in functional ambulation category grading (1.63±0.72). Both groups' iEMGs had also improved significantly compared with before treatment, but the exoskeleton group's average result was by that time significantly better than the control group's average. **Conclusions** A wearable exoskeleton can effectively improve the rehabilitation of walking, lower limb movement, balance and skill in the activities of daily living of persons with subacute stroke. It better activates the affected lower limb muscles and improves the symmetry of bilateral lower limb muscle activation.

【Key words】 Exoskeleton robots; Stroke; Lower-limb motor ability; Rehabilitation

Funding: The National Natural Science Foundation of China (52175268)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.02.003

在世界范围内,脑卒中是导致长期下肢运动障碍的主要原因之一^[1],下肢运动功能障碍对患者的生活质量有严重的影响。脑卒中后,患者需要花费大量时间完成坐站转移、迈步以及步行等功能训练^[2]。同时卒中后双侧下肢负重不平衡影响患者的平衡功能,增加患者的跌倒风险^[3,4]。因此,有效恢复患者的下肢运动功能对脑卒中患者的整体恢复具有重要意义。

近年来,康复机器人广泛应用于改善脑卒中患者的步行功能^[5]。同时,卒中后运动恢复主要发生在卒中后的亚急性期内(病程<3个月)^[6],然而,关于单下肢外骨骼在这一阶段的应用尚处于研究阶段^[7],需要更多的研究来验证其临床效用。本研究观察了 ProWalk 外骨骼机器人对早期亚急性期脑卒中偏瘫患者下肢运动功能、平衡功能和日常生活活动能力的影响,以期为偏瘫患者下肢功能的临床研究提供参考。

对象与方法

一、研究对象

纳入标准:①均符合全国第 4 届脑血管疾病学术会议制定的脑卒中诊断标准^[8],并且经颅脑 CT 或 MRI 证实;②首次发病,单侧偏瘫,病程 2 周~3 个月;③年龄 18~80 岁;④下肢 Brunnstrom 分期在 II 期~IV 期;⑤神志清楚,查体合作,可以接受动作指令;⑥满足穿戴外骨骼的需求:身高 1.5~1.9 m,体重≤100 kg;⑦能够在治疗师或外骨骼辅助下进行平衡及步行功能训练;⑧能够理解研究目的,患者本人或家属签署知情同意书。

排除标准:①下肢肌张力过高,改良 Ashworth 量表分级≥3 级;②近期下肢骨折或骨质疏松症(根据原发性骨质疏松症诊疗指南推荐方法筛查^[9]);③下肢局部皮肤损伤者或局部压疮;④有重要脏器功能衰竭或其他严重疾病;⑤妊娠期或哺乳期或筛选期妊娠试验阳性的女性受试者;⑥入组前 3 个月内参加了其他药物或者医疗器械临床试验;⑦患有其他神经系统疾病,如脑瘫、脊髓损伤等。

本研究经华中科技大学同济医学院医学伦理委员会(伦理文件批号[2020]S296-1)批准通过。选取 2021 年 7 月至 2022 年 7 月期间在华中科技大学同济医学院附属同济医院康复医学科住院治疗的符合上述标准的脑卒中患者 40 例,采用随机数字表法分为

2 组,每组 20 例,2 组患者中有 34 例患者完成了共计 3 周的治疗。2 组患者的性别、平均年龄、病变性质、偏瘫侧别、平均病程等一般资料组间比较,差异均无统计学意义($P>0.05$),具有可比性,表 1。

二、治疗方法

2 组患者均接受康复科规范药物治疗和常规康复治疗,常规康复治疗包括上、下肢的物理治疗,血压、血糖、血脂等的控制,体位和患肢的摆放,偏瘫肢体的被动活动,按摩针灸和日常生活活动训练等。

对照组在此基础上进行下肢常规康复训练,包括坐位平衡训练、站立平衡训练、下肢各关节肌力和控制训练、患侧负重训练和步行训练等。下肢常规康复训练每日 1 次,每次 40 min,每周训练 6 d,连续训练 3 周。

机器人组则在常规治疗的基础上采用 ProWalk 外骨骼机器人(深圳丞辉威世公司)进行机器人辅助下的康复训练(图 1),包括坐站转移训练、站立平衡训练、下肢肌力和控制训练、患侧负重训练和步行训练。ProWalk 外骨骼机器人配备了可以监测双侧髋关节和患者膝关节生物力学数据的传感器,根据定制的算法识别患者意图,可为患侧膝关节在功能性任务中的屈伸活动提供合适的辅助。坐站训练模式分为从低到高 5 个助力等级,可以帮助患者坐站转移的膝关节屈伸活动,机器人初始辅助统一设置为等级 3,随后根据患者坐站能力增加或减少辅助等级;同时患者在站立状



图 1 外骨骼机器人示意图

表 1 2 组患者一般资料

组别	例数	性别(例)		年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$)	病变性质(例)		偏瘫侧(例)		病程 (d, $\bar{x}\pm s$)
		男	女		脑梗死	脑出血	左侧	右侧	
机器人组	20	13	7	51.80±11.06	10	10	7	13	51.20±17.42
对照组	20	12	8	45.75±11.27	12	8	5	15	46.45±19.75

态下外骨骼可以锁定患者患侧膝关节使之完成健侧迈步、回退及重心转移等平衡性训练。在步行训练辅助模式下,可以调节支撑等级、屈膝等级、速度等级和节奏等级,每一项从低到高分为 10 个等级,分别代表步行周期患侧支撑相膝关节支撑力、患侧摆动相屈膝角度、患侧摆动相屈膝速度和步频,初始辅助等级统一设置为 5、5、5、1,随后根据患者的步行能力再调整辅助等级。ProWalk 外骨骼机器人训练每日 1 次,每次 40 min,每周训练 6 d,连续训练 3 周。

三、评估指标

分别于治疗前和治疗 3 周后(治疗后)采用功能性步行分级(functional ambulation categories, FAC)、简式 Fugl-Meyer 运动功能量表下肢部分(Fugl-Meyer assessment of lower extremity, FMA-LE)、Berg 平衡量表(Berg balance scale, BBS)和改良 Barthel 指数量表(modified Barthel index, MBI)评估患者的下肢运动功能、平衡能力和日常生活活动能力;采用双下肢股直肌和胫前肌的积分肌电值(integrated electromyography, iEMG)比值评估患者患侧肌肉激活和双侧肌肉激活对称性。

1. FAC:分为 6 个等级,0 级表示患者没有行走能力或需要 2 人及以上辅助才能行走,1 级表示患者在 1 人连续帮助下可以行走,5 级表示患者行走能力正常^[10]。

2. FMA-LE:包括仰卧位有无反射、仰卧位屈肌和伸肌协同运动、坐位伴协同运动的活动、站位脱离协同运动的活动、坐位反射亢进、仰卧位协调能力和速度共 17 项内容,总分 34 分,分数越高表示下肢运动功能越好^[11]。

3. BBS:评价平衡功能,共有 14 个项目,总分 56 分,分数越高表示平衡功能越好^[12]。

4. MBI:评价日常生活活动能力,共有转移、步行等 10 个项目,总分 100 分,0~20 分为完全依赖,100 分表示有完全的自理能力^[13]。

5. 双下肢 iEMG 比值:采用美国 Noraxon 公司生产的 Ultimu16 通道表面肌电设备在 2000 Hz 采样频率下

采集坐到站任务中双下肢股直肌和胫前肌的肌电信号。使用 75% 浓度酒精清洁双下肢股直肌和胫前肌周围皮肤后粘贴电极贴,嘱患者取舒适坐位,以自选速度独立进行坐到站任务,重复测量 10 次,每次任务后休息 10 s,以减少疲劳干扰。求取坐到站整个阶段的 iEMG 值并取平均值,iEMG 是整流后肌电曲线下的面积,测量骨骼肌的驱动,通常用来度量肌肉的激活情况。坐站转移任务前、后健侧与患侧的 iEMG 比值的减小表示患侧下肢肌肉激活的增加以及双下肢肌肉激活对称性的改善^[14]。

四、统计学方法

使用 SPSS 22.0 版统计学软件对本研究所得数据进行分析,计量数据以($\bar{x} \pm s$)表示,组内使用配对样本 *t* 检验,组间比较用独立样本 *t* 检验,没有通过正态检验则使用秩和检验,计数资料比较采用 χ^2 检验,等级资料比较采用秩和检验,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、2 组患者治疗前和治疗 3 周后下肢功能、平衡能力和日常生活活动能力比较

治疗前,2 组患者的 FAC、FMA-LE、BBS 和 MBI 比较,差异均无统计学意义($P > 0.05$)。治疗后,2 组患者的 FAC、FMA-LE、BBS 和 MBI 较组内治疗前均显著改善($P < 0.01$),且机器人组治疗后的 FAC 分级显著优于对照组治疗后,差异有统计学意义($P < 0.05$),详见表 2。

二、2 组患者治疗前和治疗 3 周后 iEMG 比值比较
对照组 6 例和机器人组 3 例患者未能完成肌电评估。治疗前,2 组患者的股直肌和胫前肌健侧与患侧的 iEMG 比值比较,差异均无统计学意义($P > 0.05$)。治疗后,2 组患者的股直肌和胫前肌健侧与患侧的 iEMG 比值较组内治疗前均显著改善($P < 0.01$),且机器人组胫前肌健侧与患侧 iEMG 比值显著优于对照组,差异有统计学意义($P < 0.05$)。详见表 3。

表 2 2 组患者治疗前、后各量表比较($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	FMA-LE 评分 (分)	BBS 评分 (分)	MBI 评分 (分)	FAC 分级 (级)
对照组					
治疗前	16	14.69±2.89	18.69±4.13	38.75±7.02	0.88±0.62
治疗后	16	17.81±3.82 ^a	30.50±7.04 ^a	52.75±5.93 ^a	1.63±0.72 ^{ab}
机器人组					
治疗前	18	13.28±3.54	16.39±8.00	38.17±8.13	0.78±0.65
治疗后	18	16.83±4.40 ^a	29.22±10.81 ^a	54.39±10.07 ^a	2.06±0.94 ^a

注:与组内治疗前比较,^a $P < 0.01$;与对照组治疗后比较,^b $P < 0.05$

表 3 2 组患者治疗前、后股直肌和胫前肌健侧与患侧的 iEMG 比值比较 ($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	股直肌健侧与患侧 iEMG 比值	胫前肌健侧与患侧 iEMG 比值
对照组			
治疗前	12	4.17±1.85	8.97±5.75
治疗后	12	3.44±0.92 ^a	7.59±4.72 ^a
机器人组			
治疗前	15	3.88±1.53	9.69±4.99
治疗后	15	3.28±1.13 ^a	6.32±4.05 ^{ab}

注:与组内治疗前比较,^a $P < 0.05$;与对照组治疗后比较,^b $P < 0.05$

讨 论

本研究结果显示,机器人组患者经单下肢外骨骼机器人训练 3 周后,其 FAC 分级、FMA-LE 评分、BBS 评分、MBI 评分较组内治疗前均显著改善,且 FAC 评分和胫前肌健侧与患侧 iEMG 比值亦显著优于对照组治疗后($P < 0.01$)。该结果提示,单下肢外骨骼机器人训练不仅可以有效地提高亚急性期脑卒中患者的步行能力、下肢功能、平衡能力和日常生活活动能力,还可改善患者患侧肌肉激活程度和负重对称性。这与以往的相关研究结果类似^[15-18]。

脑卒中后高级中枢失去了对随意运动的控制功能,患者下肢会难以完成坐站转移、迈步和步行等任务。脑卒中后的神经恢复很大程度上依赖于神经可塑性,包括新的神经元生成、皮质内轴突和树突的发芽以及存活神经元之间新连接的形成等^[19]。大多数运动恢复发生在脑卒中后 3 个月内^[6],因此,这段时间是康复干预措施影响恢复和预后的关键时期。脑卒中患者在进行坐站转移、平衡和步行训练时自发地将躯干重心偏向健侧,同时身体向个方向主动转移的能力和稳定性变差,导致双侧负重、跌倒风险和步行功能障碍,因此必须尽早恢复患者坐站转移、动态平衡能力和步行等任务的独立性,以便进行如上肢功能等其他日常生活活动能力的训练。在这一阶段尽快恢复下肢运动的功能独立性是脑卒中康复的重要挑战。

针对下肢运动功能恢复的功能训练任务繁重,以及为了保证运动处方质量的要求等,给物理治疗师带来了极大的挑战。康复机器人具有高重复性和高强度的优势,能够减轻治疗师的繁重工作,同时经由重复性特定任务训练诱导神经可塑性变化,提高康复的效率。下肢康复机器人主要分为跑步机式机器人和外骨骼式地面行走机器人,与目前应用广泛的跑步机式下肢机器人相比,在地面行走的单侧外骨骼机器人的优势体现在以下两个方面:第一,运动灵活性。单侧外骨骼训练具有高度自由性的特点,腿部运动在矢状面的受限程度较低,身体能够在空间中进行多向运动,在不同

地面条件下进行运动训练^[20]。第二,促进感觉运动神经网络的可塑性变化。感觉运动整合理论认为,与身体和环境相关的感觉信息帮助塑造了运动输出,在运动过程中任何的输入信息,无论是视觉、空间位置觉、触觉以及本体感觉等,都能通过中枢神经系统整合作用后辅助运动程序的执行^[21]。本课题组认为,外骨骼机器人训练可促进更多的感觉信息传入(包括视觉、本体感觉、触觉等),同时患者需要更多的主动参与来协调躯体和外骨骼机器人进而控制平衡和维持躯干稳定性。因此,单侧外骨骼机器人可为患者提供更多的感觉输入信息控制运动输出以促进其神经可塑性的改变。

关于单侧穿戴式外骨骼机器人改善亚急性期脑卒中患者步行、平衡和日常活动能力的作用机制,本课题组认为:①外骨骼机器人辅助下的任务导向性训练具有高重复性和高强度的特点,可以有效重复正确运动模式,诱导神经可塑性改善下肢功能^[22]。②膝关节屈伸肌群对于卒中患者步行的推动力至关重要^[23],本研究使用的外骨骼机器人可以通过直接对患侧膝关节屈伸进行助力帮助改善患者的步行能力。③脑卒中导致健侧肢体为实现功能性步态而发展代偿性策略。基于患侧的运动辅助可以减少健侧肢体发展的代偿机制,使健侧运动模式更加健康。④脑卒中后下肢负重的不对称常常会影响治疗过程中坐站转移任务和步行的完成度以及患者对患侧负重的信心,从而影响步行能力的恢复^[24]。在脑卒中后坐到站过程中,双侧肌肉的激活都受到了损害,患侧的损伤更为严重,如胫骨前肌的激活延迟或减少^[25]。

综上所述,单侧穿戴式外骨骼机器人可以有效改善亚急性期脑卒中患者步行能力、下肢运动功能、平衡功能以及日常生活活动能力,以及促进患侧下肢肌肉的激活,改善负重对称性。本研究还存在一些不足,包括样本量偏小,治疗周期偏短,没有进行长期随访等,这些均需在后续研究中进一步地完善。

参 考 文 献

- [1] Benjamin EJ, Blaha MJ, Chiuve SE, et al. Heart disease and stroke statistics-2017 update: a report from the american heart association [J]. *Circulation*, 2017, 135(10): e146-e603. DOI: 10.1161/CIR.0000000000000485.
- [2] Moore SA, Boyne P, Fulk G, et al. Walk the talk: current evidence for walking recovery after stroke, future pathways and a mission for research and clinical practice [J]. *Stroke*, 2022, 53(11): 3494-3505. DOI: 10.1161/STROKEAHA.122.038956.
- [3] Boukadida A, Piotte F, Dehail P, et al. Determinants of sit-to-stand tasks in individuals with hemiparesis post stroke: a review [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2015, 58(3): 167-72. DOI: 10.1016/j.rehab.2015.04.007.

- [4] Lecours J, Nadeau S, Gravel D, et al. Interactions between foot placement, trunk frontal position, weight-bearing and knee moment asymmetry at seat-off during rising from a chair in healthy controls and persons with hemiparesis[J]. *J Rehabil Med*, 2008, 40(3): 200-7. DOI:10.2340/16501977-0155.
- [5] Mehrholz J, Thomas S, Kugler J, et al. Electromechanical-assisted training for walking after stroke [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2007, (4): CD006185. DOI:10.1002/14651858.CD006185.pub5.
- [6] Zeiler SR, Krakauer JW. The interaction between training and plasticity in the poststroke brain [J]. *Curr Opin Neurol*, 2013, 26(6): 609-16. DOI:10.1097/WCO.000000000000025.
- [7] Bao G, Pan L, Fang H, et al. Academic review and perspectives on robotic exoskeletons [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2019, 27(11): 2294-304. DOI:10.1109/TNSRE.2019.2944655.
- [8] 中华神经科学会, 中华神经外科学会. 各类脑血管疾病诊断要点 [J]. *中华神经科杂志*, 1996, 29(6): 379-380.
- [9] 中华医学会骨质疏松和骨矿盐疾病分会. 原发性骨质疏松症诊疗指南(2017) [J]. *中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志*, 2017, 10(5): 413-443. DOI:10.3969/j.issn.1007-9572.2017.00.118.
- [10] Hesse S, Konrad M, Uhlenbrock D. Treadmill walking with partial body weight support versus floor walking in hemiparetic subjects [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 1999, 80(4): 421-7. DOI:10.1016/s0003-9993(99)90279-4.
- [11] Gladstone DJ, Danells CJ, Black SE. The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke: a critical review of its measurement properties [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2002, 16(3): 232-40. DOI:10.1177/154596802401105171.
- [12] Blum L, Komer BN. Usefulness of the berg balance scale in stroke rehabilitation: a systematic review [J]. *Phys Ther*, 2008, 88(5): 559-66. DOI:10.2522/ptj.20070205.
- [13] Yang CM, Wang YC, Lee CH, et al. A comparison of test-retest reliability and random measurement error of the barthel index and modified barthel index in patients with chronic stroke [J]. *Disabil Rehabil*, 2022, 44(10): 2099-103. DOI:10.1080/09638288.2020.1814429.
- [14] Androwis GJ, Pilkar R, Ramanujam A, et al. Electromyography assessment during gait in a robotic exoskeleton for acute stroke [J]. *Front Neurol*, 2018, 9: 630. DOI:10.3389/fneur.2018.00630.
- [15] Moucheboeuf G, Griffier R, Gasq D, et al. Effects of robotic gait training after stroke: a meta-analysis [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2020, 63(6): 518-34. DOI:10.1016/j.rehab.2020.02.008.
- [16] Wang L, Zheng Y, Dang Y, et al. Effects of robot-assisted training on balance function in patients with stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Rehabil Med*, 2021, 53(4): jrm00174. DOI:10.2340/16501977-2815.
- [17] 张旭, 邱模炎, 权范善等. 步行机器人训练对慢性期脑卒中偏瘫患者步行能力的影响 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2021, 43(1): 30-33. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2021.01.007.
- [18] 陈芳, 季晶, 苏彬等. 平地行走式下肢外骨骼机器人对脑卒中患者步行功能的影响 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2022, 44(6): 497-502. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.06.004.
- [19] Zeiler SR, Krakauer JW. The interaction between training and plasticity in the poststroke brain [J]. *Curr Opin Neurol*, 2013, 26(6): 609-616. DOI:10.1097/WCO.000000000000025.
- [20] Molteni F, Gasperini G, Gaffuri M, et al. Wearable robotic exoskeleton for overground gait training in sub-acute and chronic hemiparetic stroke patients: preliminary results [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2017, 53(5): 676-684. DOI:10.23736/S1973-9087.17.04591-9.
- [21] Krakauer JW. Motor learning: its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation [J]. *Curr Opin Neurol*. 2006, 19(1): 84-90. DOI:10.1097/01.wco.0000200544.29915.cc.
- [22] Xing Y, Bai Y. A review of exercise-induced neuroplasticity in ischemic stroke: pathology and mechanisms [J]. *Mol Neurobiol*, 2020, 57(10): 4218-31. DOI:10.1007/s12035-020-02021-1.
- [23] Brough LG, Kautz SA, Neptune RR. Muscle contributions to pre-swing biomechanical tasks influence swing leg mechanics in individuals post-stroke during walking [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19(1). DOI:10.1186/s12984-022-01029-z.
- [24] Sarkisian SV, Gunnell AJ, Bo FK, et al. Knee exoskeleton reduces muscle effort and improves balance during sit-to-stand transitions after stroke: a case study [J]. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, 2022, (2022): 1-6. DOI:10.1109/ICORR55369.2022.9896571.
- [25] Cheng PT, Chen CL, Wang CM, et al. Leg muscle activation patterns of sit-to-stand movement in stroke patients [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2004, 83(1): 10-16. DOI:10.1097/01.PHM.0000104665.34557.56.

(修回日期:2023-01-02)

(本文编辑:阮仕衡)