

## 论著·临床研究

## 下肢外骨骼机器人对关节镜下半月板修补术后患者功能重建的治疗效果

王衍鸿\*, 韩稷钰\*, 万大千

同济大学附属同济医院骨关节科, 上海 200065

**[摘要]** **目的**·探索下肢外骨骼康复机器人对关节镜下半月板修补术后康复期患者的下肢功能恢复的治疗效果, 并与关节功能康复训练器(continuous passive motion, CPM)康复结果进行比较。**方法**·以同济大学附属同济医院骨科2020年6月至2021年6月收治的膝关节半月板损伤后行关节镜下半月板修补术的90例患者为研究对象, 试验未进行双盲法分组及分配隐藏; 随机将患者分为常规康复疗法联合CPM训练组(常规组, 45例)和常规康复疗法联合下肢外骨骼机器人训练组(外骨骼组, 45例), 康复训练前收集患者的基线资料。对2组患者在康复训练前(术后4 d)和康复训练后(康复训练2个月后)的膝关节Lysholm评分分级、国际膝关节评分委员会(International Knee Documentation Committee, IKDC)膝关节主观功能评分分级、美国特种外科医院(Hospital for Special Surgery, HSS)评分、膝关节活动度进行对比分析。记录试验过程中的不良事件。**结果**·常规组和外骨骼组患者的性别、年龄、病程, 膝关节损伤部位及分型间差异均无统计学意义(均 $P>0.05$ )。所有患者均完成2个月的康复训练。半月板修补术后常规组和外骨骼组患者康复前Lysholm评分和IKDC评分的优良率、HSS评分和膝关节活动度差异均无统计学意义(均 $P>0.05$ ); 康复训练2个月后2组患者Lysholm评分和IKDC评分的优良率, 以及HSS评分均较康复前显著提高(均 $P<0.05$ ), 且常规组Lysholm评分和IKDC评分的优良率, 以及HSS评分均显著低于外骨骼组(均 $P<0.05$ )。常规组患者康复前后膝关节活动度改善无统计学意义( $P>0.05$ ), 而外骨骼组康复前后膝关节活动度改善有统计学意义( $P=0.000$ ), 且康复后外骨骼组膝关节活动度显著大于常规组( $P=0.001$ )。康复训练期间, 2组患者均未见明显不良反应。**结论**·对于关节镜下半月板修补术后康复期患者, 在同时联合常规康复疗法的情况下, 下肢外骨骼康复机器人比CPM对于促进膝关节功能恢复, 提高膝关节活动度的效果更加显著。

**[关键词]** 外骨骼机器人; 半月板修补术; 膝关节; 康复治疗**[DOI]** 10.3969/j.issn.1674-8115.2022.03.011 **[中图分类号]** R493; R687.4 **[文献标志码]** A

## Effect of lower limb exoskeleton robot on recovery of function in patients after arthroscopic meniscus repair

WANG Yanhong\*, HAN Jiayu\*, WAN Daqian

Department of Orthopaedics and Joint, Tongji Hospital, Tongji University, Shanghai 200065, China

**[Abstract]** **Objective**·To investigate the effect of lower limb exoskeleton robot on function recovery of lower limbs in the patients during the rehabilitation period after arthroscopic meniscus repair, and compare its effect with the effect of continuous passive motion (CPM) training. **Methods**·Ninety patients undergoing meniscus repair under arthroscopy after injury in the Orthopaedic Department of Tongji Hospital, Tongji University, from June 2020 to June 2021 were selected as the objects. The trial did not carry out double-blind grouping and allocation concealment. The patients were randomly divided into conventional rehabilitation therapy combined with CPM training group (conventional group, 45 cases) and conventional rehabilitation therapy combined with lower limb exoskeleton robot training group (exoskeleton group, 45 cases). The baseline data of the patients were collected before the rehabilitation training. The knee Lysholm score, the knee subjective function score of the International Knee Documentation Committee (IKDC), the Hospital for Special Surgery (HSS) score and the range of motion of knee joint were compared and analyzed between the two groups before (4 d after surgery) and after (after 2 months of rehabilitation training) the rehabilitation

**[基金项目]** 中央高校基本科研业务费专项资金(22120210569); 上海同济医院国家自然科学基金培育项目(TJ2025)。**[作者简介]** 王衍鸿(1991—), 男, 住院医师, 硕士; 电子信箱: wyh85892892@qq.com。韩稷钰(1993—), 男, 住院医师, 硕士; 电子信箱: hanjiyudocor@163.com。\*为共同第一作者。**[通信作者]** 万大千, 电子信箱: wdqwdq1986@126.com。**[Funding Information]** Fundamental Research Funds for the Central Universities (22120210569); Fostering Project of National Natural Science Foundation of China in Shanghai Tongji Hospital (TJ2025).**[Corresponding Author]** WAN Daqian, E-mail: wdqwdq1986@126.com.

training. Adverse events during the test were recorded. **Results**·There was no significant difference in gender, age, course of disease, location and classification of knee injury between the conventional group and the exoskeleton group ( $P>0.05$ ). All the patients completed 2 months of rehabilitation training. After the meniscus repair, there was no significant difference in the excellent and good rates of Lysholm score and IKDC score, HSS score and knee range of motion between the conventional group and the exoskeleton group before rehabilitation ( $P>0.05$ ). After 2 months of rehabilitation training, the excellent and good rates of Lysholm score and IKDC score, and HSS score in the two groups were significantly higher than those before rehabilitation ( $P<0.05$ ), and the excellent and good rates of Lysholm score and IKDC score, and HSS score in the conventional group were significantly lower than those in the exoskeleton group ( $P<0.05$ ). There was no significant difference in the improvement of knee range of motion before and after rehabilitation in the conventional group ( $P>0.05$ ), while there was significant difference in the exoskeleton group ( $P=0.000$ ), and the knee range of motion in the exoskeleton group after rehabilitation was significantly wider than that in the conventional group ( $P=0.001$ ). During the rehabilitation training, no significant adverse effects were reported in both groups. **Conclusion**·For the patients in the rehabilitation period after meniscus repair under arthroscopy, combined with the conventional rehabilitation therapy, lower limb exoskeleton rehabilitation robot is more effective than CPM in promoting the recovery of knee function and improving the range of motion of knee joint.

**[Key words]** exoskeleton robot; meniscus repair; knee joint; rehabilitation therapy

半月板的损伤在膝关节损伤中是最常见的一种。根据流行病学调查,其发病率仅次于骨关节炎。一般来说,男性比女性更容易发病<sup>[1-2]</sup>。半月板是一种复杂的纤维软骨组织,对于减震、负荷分布、维持稳定性和保护关节软骨起重要作用<sup>[3-4]</sup>。当半月板受损时,患者常出现关节肿胀、股四头肌萎缩、局部疼痛、压痛等不适症状,严重时会影响患者下肢的正常功能<sup>[5]</sup>。在临床的诊疗中,对半月板损伤的患者主要选用关节镜进行微创治疗<sup>[6]</sup>。

膝关节镜下半月板缝合修补术可用于治疗大多数半月板损伤的患者,临床疗效显著,但是仍存在术后关节僵硬、活动度差、膝关节退行性改变、疼痛等并发症<sup>[7-8]</sup>,因此在术后予患者康复治疗是非常必要的。但是现阶段半月板修补术后的康复方案仍有缺陷,存在术后康复恢复时间长,康复效果不佳等问题,急需进一步完善术后患者的康复方案<sup>[9]</sup>。

得益于现代科技的发展,外骨骼机器人被广泛应用在康复治疗中。日本的HAL(hybrid assistive limb)外骨骼系统、以色列的ReWalk机器人在脊髓损伤后出现的下肢瘫痪的康复治疗中取得了良好的效果<sup>[10-12]</sup>。患者在术后康复过程中,通过使用下肢外骨骼康复机器人,在进行有效的功能康复训练之余,还能在肌电信号的协助下,尽早下地行走。此外,该类器械能促进患者半月板营养支持和代谢功能的恢复,并能促进半月板及其周围组织的损伤修复,还能增强股四头肌等相关区域肌肉的肌力,最终达到消除粘连、减少痛苦、快速消肿、促进活动等作用<sup>[13]</sup>。

本试验设计采用单中心随机对照研究的方法,在

前期小样本试验基础上,扩大样本量,探讨下肢外骨骼康复机器人对半月板修补术后康复期患者的下肢功能恢复的治疗效果,以期为患者提供更加理想的康复方案。

## 1 对象和方法

### 1.1 研究对象

收集整理同济大学附属同济医院骨科2020年6月至2021年6月收治的膝关节半月板损伤关节镜术后患者资料进行单中心随机对照研究。收集患者性别、年龄、病程,膝关节损伤位置及分型等基线资料。将全部收集整理的信息通过计算机录入病例报道表(case report form, CRF)中备用。

纳入标准:①临床诊断为膝关节半月板损伤。②首次行关节镜下半月板修补术治疗。③对本项研究知情同意并能积极配合。

排除标准:①中度以上膝关节退行性变,合并有交叉韧带或侧副韧带损伤,膝关节或周围部分骨折、血管或神经损伤,感染性病变。②合并有膝关节周围肿瘤、骨结核、风湿及类风湿关节炎、骨折未愈合等膝关节病变的患者。③伴有严重心脑血管疾病、呼吸系统疾病、肝肾疾病、内分泌系统疾病,偏瘫或截瘫等严重肢体功能障碍的患者。④有认知功能障碍及其他不能配合治疗的患者。⑤正在接受或即将接受其他康复手段治疗的患者。

试验分组及盲法:试验未进行双盲法分组及分配隐藏,采用随机数字表进行随机治疗分组。将90例术后患者从1开始编号到90,然后在Excel表中生成

随机数字表,从任一行、任一列开始读取三位数作为一个随机数记录,根据随机数从大到小的排列调整患者序号次序,将前45位患者纳入常规康复疗法联合关节功能康复训练器(continuous passive motion, CPM)训练组(常规组),后45位患者纳入常规康复疗法联合下肢外骨骼机器人训练组(外骨骼组)。

本研究通过同济大学附属同济医院伦理委员会批准,审批号为(同)伦审2020-KYSB-023号。参与此次试验的患者及其家属均自愿参加,所有患者都对试验过程以及可能的不良反应完全知情同意,在充分理解本治疗方案的前提下签署知情同意书。

## 1.2 研究方法

所有纳入患者行腰硬联合麻醉,在关节镜下对撕裂分层的半月板予以缝合处理<sup>[14]</sup>,术后由具备康复资质的理疗师在康复病房内开展术后常规康复疗法。常规康复疗法:①股四头肌等长收缩训练。嘱患者于术后第2日开始训练,绷紧大腿肌肉之后再放松肌肉,每日3组,每组收缩20次,持续2周。②直腿抬高训练。该项训练于术后第3~5日开始,嘱患者选取仰卧或俯卧,患侧肢体运动首先进行被动抬高,逐步过渡到主动抬高。每日训练3组,开始时每组抬高20次;若患者耐受良好,则每隔3 d增加10次,直至每组抬高50次为止。③膝关节负重训练:患者于术后第3日开始训练,从足尖踮地开始步行训练,每周逐渐增加重负荷,直至最后达到完全踩地行走为止。

常规组:在临床常规康复疗法的基础上,配合CPM康复训练,CPM采用美国OPTIFLEX公司生产的OPTIFLEX3-2090型下肢关节康复训练器。CPM康复训练的简要流程<sup>[15]</sup>:患者术后第4日开始康复治疗<sup>[16]</sup>,患者取平卧或半卧位,关节活动度训练根据治疗前测得的膝关节主动后屈角度设定治疗角度(初始治疗角度为测试角度减去 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ),后逐渐加大角度至每个屈伸终末端略感轻微疼痛,并可耐受10 s,完成一个屈伸动作约50 s;根据患者的耐受情况加大角度2~3次,治疗结束后记录最大角度;下次治疗以上次记录的最大角度为参考,减去 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 作为起始角度。康复训练治疗时间2个月,每周治疗3次,每次30 min。

外骨骼组:在临床常规康复疗法的基础上,采用下肢外骨骼机器人步态康复训练。下肢外骨骼康复机器人(图1)是由上海交通大学医学院附属第六人民

医院与上海交通大学机器人研究所合作研制开发的一种康复器械<sup>[17]</sup>,可应用于康复训练中关节活动度训练;由固定髋部和下肢且具有双自由度的步态矫正系统组成。为了适应不同身形的患者,步态矫正系统的高度、髋关节宽度、靠背高度、靠背水平距离、下肢长度,以及3个固定带的尺寸和位置均可调节。在其膝、髋关节分别使用MAXON RE40 直流有刷电机驱动同步带和滚珠丝杆控制患者步态运动。

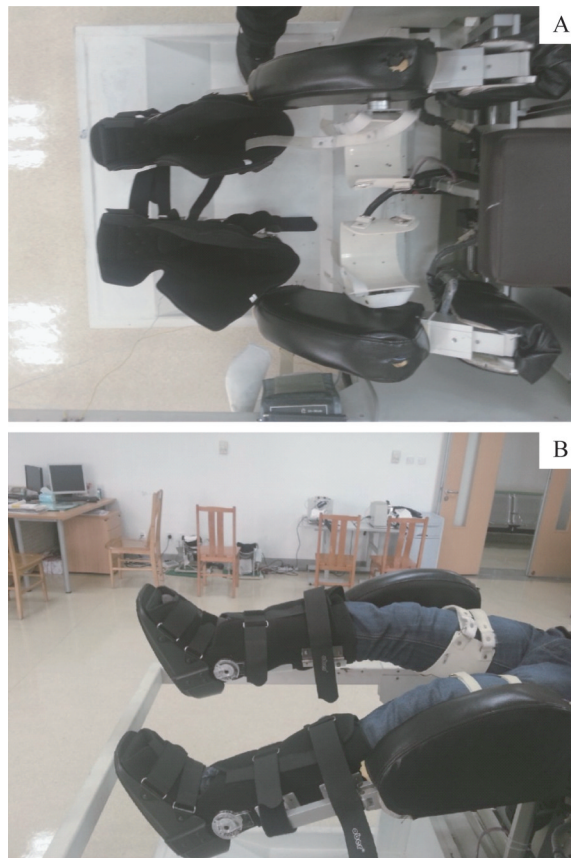


图1 下肢外骨骼机器人外观(A)及患者康复训练图(B)  
Fig 1 Appearance of the lower limb exoskeleton robot (A) and rehabilitation training of a patient (B)

患者训练过程简述如下<sup>[18]</sup>:嘱患者选取直立站位,双下肢固定于康复机器人之上,调整运动轴心,使运动轴心完全和康复机器人契合,之后在康复技师的协助下完成固定。在训练过程中,下肢升降带在迈步相时被被动地引起关节屈曲。在患者具有足够的肌肉力量和控制能力的时候,通过适当降低下肢升降带的张力,减少升降带对患者下肢的限制,促进其发挥自主肌力。膝、髋关节运动轨迹,膝关节主动后屈角度,患者下肢相对肌力,及运动速度等参数通过计算机实时监测和控制,以供医师了解患者的运动表现。机器人的关节活动度设定原则与CPM关节治疗角度



设定原则一致。在保证患者舒适度、适应性与步态质量的前提下,步行训练的速度由医师通过观察计算机屏幕上的反馈曲线与机械腿速度是否匹配来判断。步态矫正系统的引导力的大小要根据患者下肢的可用肌力进行选择,将其调整至既可以使患者主动参与肌力训练又不会使患者感觉下肢沉重、行走困难为佳。康复训练治疗时间为2个月,自患者术后第4日开始,每周3次,每次训练30 min。

### 1.3 观察指标

**1.3.1 主要结局指标** 由术者以门诊复诊的方式于康复前后回访患者,分别在康复前(术后4 d)和康复后(康复治疗2个月结束后),采用膝关节 Lysholm 评分<sup>[19]</sup> 与国际膝关节评分委员会(International Knee Documentation Committee, IKDC)膝关节主观功能评分<sup>[20]</sup> 评估2组患者的术后膝关节功能的恢复情况。 $\geq 85$ 分为优,70~<85分为良,60~<70分为可,<60分为差<sup>[21-22]</sup>。

**1.3.2 次要结局指标** 同样于康复前(术后4 d)和康复后(康复治疗2个月结束后)进行膝关节功能评估和膝关节活动度评估。①膝关节功能评估:选用美国特种外科医院(Hospital For Special Surgery, HSS)评分对膝关节的功能进行评估<sup>[23]</sup>,包括疼痛、稳定性、行走辅助、行走距离、伸直障碍、屈曲障碍和渗出等方面。②活动度评估:使用量角器检测关节运动所经过的角度来评价患侧关节的活动度。

**1.3.3 不良事件** 记录试验中的不良事件,例如关节肿胀不适、疼痛加重、半月板再次撕裂等。记录内容包括:不良事件的描述、发生时间、终止时间、程度、发作频度、是否进行治疗(如治疗,应记录治疗方案、药物等)。临床研究医师需要根据患者病情变化实施处理,必要时中止实验,并启动事先准备好的防范和处理医疗中受试者损害及突发事件预案。

### 1.4 样本量估算

通过前期小样本预试验,外骨骼组(20例)和常规组(20例)治疗后患者的 Lysholm 评分优良率分别为85%和55%,平均分分别为79.65分和78.10分,两者标准差为2.05。假设把握度为0.9,设 $\beta=0.10$ ,检验水准(双侧) $\alpha=0.05$ ,采用PASS软件通过两样

本 $t$ 检验计算后得出每组应纳入的样本量为 $n=38$ ;考虑到20%的患者脱落率,最终2组应分别纳入患者45例,总计90例。

### 1.5 数据收集和管理

**数据收集方法:** 研究人员将采集到的全部数据记录在CRF上。在完成数据录入之后,主要负责人员将及时检查其完整性,确认无误后签名。如已确认内容需要变更,则需由主要负责人员或其授权人员进行,在完成修改后,及时签名确认,并注明修改日期。

**数据管理:** 根据CRF包含的表格内容采用Epi-Data 3.0软件编译对应的录入程序,并设定录入数据时的逻辑审查限定条件。之后对该数据库进行试运行,测试其工作是否正常,从而完成本次试验专用的数据库系统的创建。数据同步录入由数据库管理员负责,采用双人双录入法,并逐项核对录入数据,确保录入数据无误。

### 1.6 质量控制

成立数据监控委员会,由医学(相关专业背景的医师、理疗师)、流行病学、临床影像学、临床试验管理、外骨骼机器人算法及机械、统计学与伦理学的相关专家组成,对试验进行实时监督,确保其行为符合相关规定的原则,并监控数据和试验安全。

**研究者资质:** 对膝关节功能进行评价的医师均受过医学专业培训;进行常规康复治疗或联合外骨骼机器人的理疗师均受过相应培训。医师和理疗师均具有丰富的评价和康复理疗经验,工作经验5年以上,并具有副高以上职称。

**审核:** 临床监查员定期或根据实际情况拜访试验单位进行临床质量监查工作。数据库管理员应及时在注册数据库更新当前的试验进展状态。

### 1.7 统计学方法

试验的数据分析采用SPSS 22.0软件进行。呈正态分布的定量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示,两组间比较采用独立样本 Student- $t$  检验,组内前后比较采用配对样本 Student- $t$  检验;定性资料以频数和百分比表示,组间比较采用 $\chi^2$  检验。 $P<0.05$  认为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 患者基线资料

纳入因半月板撕裂行半月板修补术及术后康复治疗

疗的患者90例,随机分为常规组和外骨骼组,每组各45例;90例患者均进入结果分析,无病例脱落。2组患者的性别、年龄、病程,膝关节损伤部位及分型间差异均无统计学意义(均 $P>0.05$ ,表1)。

表1 2组患者康复前基线资料比较

Tab 1 Comparison of baseline data before rehabilitation between the two groups

Index	Conventional group (n=45)	Exoskeleton group (n=45)	Statistical value	P value
Age/year	41.44±12.56	40.11±12.30	0.509	0.612
Gender (male/female)/n	25/20	26/19	0.045	0.832
Duration/d	131.93±14.45	126.33±16.47	1.715	0.090
Right or left knee/n			0.178	0.673
Left	23	21		
Right	22	24		
O'Connor classification/n			0.415	0.521
Simplex type	16	15		
Complex type	7	9		
Longitudinal type	10	11		
Radial type	5	4		
Retrogressive type	4	4		
Hybrid type	3	2		

### 2.2 临床疗效的比较

2.2.1 主要结局指标 所有患者均完成2个月的康复训练。由表2所示,半月板修补术后常规组和外骨骼组患者康复前Lysholm评分和IKDC评分的优良率差异无统计学意义(均 $P>0.05$ );康复训练2个月后

2组患者康复后Lysholm评分和IKDC评分的优良率均较康复前显著提高(均 $P<0.05$ ),但常规组Lysholm评分和IKDC评分的优良率均显著低于外骨骼组,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$ )。

表2 2组患者康复前后Lysholm评分和IKDC评分优良率的比较

Tab 2 Comparison of excellent and good rate in Lysholm score and IKDC score between the two groups before and after rehabilitation

Index	Before rehabilitation		Z value	P value	After rehabilitation		Z value	P value
	Conventional group (n=45)	Exoskeleton group (n=45)			Conventional group (n=45)	Exoskeleton group (n=45)		
Excellent and good cases in Lysholm score/n(%)	21(46.67)	20(44.44)	-0.840	0.401	25(55.56) <sup>①</sup>	33(73.33) <sup>②</sup>	-2.002	0.045
Excellent and good cases in IKDC score/n(%)	22(46.67)	18(40.00)	-1.070	0.309	24(53.33) <sup>①</sup>	34(75.56) <sup>③</sup>	-2.157	0.031

**Note:** <sup>①</sup> $P=0.000$ , compared with the conventional group before rehabilitation; <sup>②</sup> $P=0.034$ , <sup>③</sup> $P=0.028$ , compared with the exoskeleton group before rehabilitation.

2.2.2 次要结局指标 由表3所示,2组患者康复前HSS评分和膝关节活动度差异均无统计学意义(均 $P>0.05$ )。完成2个月康复训练后,2组HSS评分均较康复前显著提高,差异均有统计学意义(均 $P=0.000$ ),且外骨骼组评分显著高于常规组( $P=$

0.003)。常规组患者康复前后膝关节活动度改善无统计学意义( $P>0.05$ ),外骨骼组康复前后膝关节活动度改善有统计学意义( $P=0.000$ ),且康复后外骨骼组膝关节活动度显著大于常规组( $P=0.001$ )。

表3 2组患者康复前后HSS评分和膝关节活动度的比较

Tab 3 Comparison of HSS score and knee range of motion between the two groups before and after rehabilitation

Index	Before rehabilitation		t value	P value	After rehabilitation		t value	P value
	Conventional group (n=45)	Exoskeleton group (n=45)			Conventional group (n=45)	Exoskeleton group (n=45)		
HSS score/point	67.89±9.95	65.02±7.92	1.512	0.134	74.87±14.09 <sup>①</sup>	83.78±13.32 <sup>②</sup>	-3.083	0.003
Knee range of motion/(°)	120.89±4.00	121.80±3.23	-1.101	0.274	122.29±9.32	128.20±6.77 <sup>②</sup>	-3.441	0.001

**Note:** <sup>①</sup> $P=0.000$ , compared with the conventional group before rehabilitation; <sup>②</sup> $P=0.000$ , compared with the exoskeleton group before rehabilitation.



### 2.3 不良反应

2个月康复训练期间,2组患者均未见明显不良反应。

## 3 讨论

半月板是膝关节的重要组成部分,是位于胫骨关节面内外侧的半月形软骨,有保持关节稳定、缓冲吸能、润滑关节等作用,对膝关节的运动功能至关重要<sup>[24]</sup>。然而膝关节中的半月板损伤是关节疾病中最常见的一种,也是骨关节炎的重要诱因之一,可对患者的生活质量产生较大影响<sup>[25]</sup>。随着关节镜手术技术的发展,关节镜下的半月板微创手术已成为治疗半月板损伤的首选方式<sup>[26]</sup>。然而虽然膝关节镜下半月板手术的治疗效果较好,但是术后的康复治疗中患者依从性较差,康复锻炼完成度差,影响术后患者下肢功能的恢复。因此在手术后,进行及时有效的康复治疗已引起医务工作者的重视。通过相关康复人员对患者实施积极的康复训练,能显著恢复患者膝关节的功能和活动度<sup>[27]</sup>。

近年来科技的发展日新月异,机器人技术也取得了长足的发展,外骨骼机器人已逐步应用在多种疾病的康复医学领域<sup>[28-32]</sup>。这是近年来发展起来的一种新的技术,可针对多种病因导致的运动损伤进行康复治疗。研究发现:下肢外骨骼机器人对脑卒中恢复期患者的步态、平衡功能,以及下肢运动功能的恢复均有良好的效果<sup>[33]</sup>;外骨骼机器人能促进急性脑卒中病患的康复<sup>[34]</sup>;下肢外骨骼康复机器人能显著改善脊髓损伤患者的步行能力<sup>[35]</sup>。但是对于半月板修补术后的患者,通过使用下肢外骨骼机器人促进其康复的研究未检索到相关报道。故本研究在常规康复训练的基础上,联用下肢外骨骼机器人,对其促进下肢功能恢复,改善关节僵硬、活动度差等并发症的功效进行了研究。研究结果显示:因半月板受损而接受关节镜下半月板修补术治疗的患者,康复后症状均较前

改善。在术后接受传统康复疗法联合下肢外骨骼机器人康复训练的患者,其Lysholm分级、IKDC分级、HSS评分、膝关节活动度均显著优于接受传统康复疗法联合CPM康复疗法的患者。所以对于半月板损伤的患者,在术后康复治疗时,采用下肢外骨骼康复机器人联合传统康复疗法能显著改善下肢关节运动,促进膝关节运动能力和活动度的恢复。同时与CPM等传统康复器械相比,其具有以下优点:①能直观评价康复训练的效果,实时对助力能力、助力效果、骨骼稳定性等参数进行检测,不仅有利于康复技师评价治疗效果,更有利于患者实时了解自身康复进程,建立继续康复训练的信心。②能使患者提早进行下肢运动,与传统康复器械不同,该器械以辅助肢体进行高强度、高重复性的康复训练为优势。③可以和虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)技术相结合,促进患者的康复依从性。④由于悬挂系统的存在,不仅让患者在较低心率、较少能量消耗的前提下进行较长时间的康复训练,还能更早地让患者直立训练,有利于功能的进一步恢复。⑤外骨骼机器人的步态分析系统可以对患者康复期的步态运动情况进行更客观、更准确、更可信的分析,使得康复医师能针对患者康复时步态出现的具体问题拟定个体化方案,进行针对性治疗,更符合现代康复的要求<sup>[36]</sup>。

本研究亦存在一定的局限性。首先是作为单中心研究,本研究患者来源单一,年龄跨度较大,且纳入数量较少;其次是观察指标主要是量表和评分,除膝关节活动度外,缺乏客观指标;最后是测量数据次数过少,仅在康复前后进行了2次测量。因此,研究结论仍需要进一步的多中心临床试验加以确认,同时将膝关节能量、支撑力矩、摆动力矩等实时参数和客观指标纳入研究中,完善丰富研究层次;并且可考虑利用外骨骼机器人的步态分析系统,进行康复前后的三维步态分析,通过三维步态参数的变化,对康复前后患者的恢复情况进行量化研究。

### 参·考·文·献

- [1] SHI Y, TIAN Z, ZHU L, et al. Clinical efficacy of meniscus plasty under arthroscopy in middle-aged and elderly patients with meniscus injury[J]. Exp Ther Med, 2018, 16(4): 3089-3093.
- [2] GU Y, ZHU W, HAO Y, et al. Repair of meniscal defect using an induced myoblast-loaded polyglycolic acid mesh in a canine model[J]. Exp Ther

Med, 2012, 3(2): 293-298.

- [3] AHMED A M, BURKE D L, YU A. *In-vitro* measurement of static pressure distribution in synovial joints—part II: retropatellar surface[J]. J Biomech Eng, 1983, 105(3): 226-236.
- [4] VOLOSHIN A S, WOSK J. Shock absorption of meniscectomized

- and painful knees: a comparative *in vivo* study[J]. J Biomed Eng, 1983, 5(2): 157-161.
- [5] KOPF S, BEAUFILS P, HIRSCHMANN M T, et al. Management of traumatic meniscus tears: the 2019 ESSKA meniscus consensus[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2020, 28(4): 1177-1194.
- [6] ABRAM S G F, BEARD D J, PRICE A J, et al. Arthroscopic meniscal surgery: a national society treatment guideline and consensus statement[J]. Bone Joint J, 2019, 101-B(6): 652-659.
- [7] 何立群, 汪毅. 中医治疗配合康复训练对半月板损伤术后重竞技运动员膝关节功能恢复的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2013, 32(9): 784-787, 792.
- [8] 王月光. 新编五禽戏结合CPM对退变性半月板损伤关节镜术后康复的影响[D]. 北京: 北京中医药大学, 2019.
- [9] SPANG III R C, NASR M C, MOHAMADI A, et al. Rehabilitation following meniscal repair: a systematic review[J]. BMJ Open Sport Exerc Med, 2018, 4(1): e000212.
- [10] 李龙飞, 朱凌云, 苟向峰. 可穿戴下肢外骨骼康复机器人研究现状与发展趋势[J]. 医疗卫生装备, 2019, 40(12): 89-97.
- [11] 万大千, 徐义明, 白跃宏. 下肢外骨骼康复机器人的研究与进展[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(52): 9855-9858.
- [12] 万大千, 徐义明, 白跃宏, 等. 下肢外骨骼康复机器人在膝关节活动受限康复治疗中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(4): 597-600.
- [13] 邢森. 胫骨平台骨折46例手术治疗及疗效评价[D]. 北京: 中国医科大学, 2011.
- [14] 宣华兵, 罗新乐, 唐久阳, 等. 盘状半月板撕裂关节镜手术的回顾性分析[J]. 中华关节外科杂志(电子版), 2019, 13(6): 773-776.
- [15] 桑井贵, 骆贤萍, 陈建芳, 等. CPM装置临床应用288例[J]. 内蒙古医学杂志, 1999, 31(1): 1-2.
- [16] 尹悦民. CPM机在膝关节镜术后康复中的应用[J]. 当代护士(专科版), 2010(10): 61-62.
- [17] 缪云洁. 新型下肢外骨骼的机构性能设计方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [18] HUSSAIN F, GOECKE R, MOHAMMADIAN M. Exoskeleton robots for lower limb assistance: a review of materials, actuation, and manufacturing methods[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2021, 235(12): 1375-1385.
- [19] WANG W, LIU L, CHANG X, et al. Cross-cultural translation of the Lysholm knee score in Chinese and its validation in patients with anterior cruciate ligament injury[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2016, 17(1): 436.
- [20] JIA Z Y, ZHANG C, ZOU Y M, et al. Translation and validation of the Simplified Chinese version of International Knee Documentation Committee Subjective Knee Form[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2018, 138(10): 1433-1441.
- [21] Melster A O, Strand T, Skredderstuen A, et al. Extra-articular stabilization of the knee a. m. Losee[J]. Acta Orthopaedica Scandinavica, 1984, 55(6): 640.
- [22] 李文俊, 孙健, 刘葛君. 关节镜下全内技术股骨双隧道重建膝关节前交叉韧带[J]. 中华关节外科杂志(电子版), 2018, 12(6): 5.
- [23] 刘建. 关节镜下成形术治疗老年膝关节半月板损伤的疗效[J]. 甘肃医药, 2020, 39(5): 418-419, 423.
- [24] WANG Z Q, XIONG Y, TANG X, et al. An arthroscopic repair technique for meniscal tear using a needle and suture: outside-in transfer all-inside repair[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2019, 20(1): 614.
- [25] XU J, BIAN F. Pain-related risk factors after arthroscopic minimally invasive treatment of meniscus injury of knee joints[J]. Exp Ther Med, 2020, 20(3): 2317-2324.
- [26] CAO H, ZHANG Y, QIAN W, et al. Short-term clinical outcomes of 42 cases of arthroscopic meniscectomy for discoid lateral meniscus tears[J]. Exp Ther Med, 2012, 4(5): 807-810.
- [27] 邓伟, 丁雪勇, 文涛. 关节镜半月板成形术联合功能锻炼治疗膝关节半月板损伤的效果及其对关节功能和活动度的影响[J]. 中国医药导报, 2016, 13(9): 108-111.
- [28] KANDILAKIS C, SASSO-LANCE E. Exoskeletons for personal use after spinal cord injury[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2021, 102(2): 331-337.
- [29] LOUIE D R, ENG J J. Powered robotic exoskeletons in post-stroke rehabilitation of gait: a scoping review[J]. J Neuroeng Rehabil, 2016, 13(1): 53.
- [30] PROIETTI T, CROCHER V, ROBY-BRAMI A, et al. Upper-limb robotic exoskeletons for neurorehabilitation: a review on control strategies[J]. IEEE Rev Biomed Eng, 2016, 9: 4-14.
- [31] VÉLEZ-GUERRERO M A, CALLEJAS-CUERVO M, MAZZOLENI S. Artificial intelligence-based wearable robotic exoskeletons for upper limb rehabilitation: a review[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(6): 2146.
- [32] 郭洋, 李岩, 李旗. Lokomat机器人步态康复训练对半月板损伤患者下肢功能影响[J]. 河北联合大学学报(医学版), 2016, 18(1): 12-14, 18.
- [33] 李宏伟, 张韬, 冯焱娟, 等. 外骨骼下肢康复机器人在脑卒中康复中的应用进展[J]. 中国康复理论与实践, 2017, 23(7): 788-791.
- [34] NOLAN K J, KARUNAKARAN K K, CHERVIN K, et al. Robotic exoskeleton gait training during acute stroke inpatient rehabilitation[J]. Front Neurobot, 2020, 14: 581815.
- [35] 向小娜, 宗慧燕, 何红晨. 下肢外骨骼康复机器人对脊髓损伤患者步行能力改善的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(1): 119-122.
- [36] FERREIRA DOS SANTOS L, CHRIST O, MATE K, et al. Movement visualisation in virtual reality rehabilitation of the lower limb: a systematic review[J]. Biomed Eng Online, 2016, 15(Suppl 3): 144.

[收稿日期] 2021-09-03

[本文编辑] 瞿麟平