机器人外科学杂志
CJRS
Chinese Journal of Robotic Surgery
论著 · Article
Vol. 6 No. 2 Feb. 2025
DOI: 10.12180/j.issn.2096-7721.2025.02.014

下肢外骨骼机器人在脊髓损伤患者康复过程中的应用及效果观察

胡晓红[1]，伍俊[2]

（1. 西安交通大学第一附属医院康复医学科　陕西　西安　710061；2. 西安国际医学中心医院康复科　陕西　西安　710000）

摘要　目的：分析脊髓损伤患者接受下肢外骨骼机器人干预对康复的影响。方法：选取 2022 年 4 月—2024 年 4 月于西安交通大学第一附属医院收入的脊髓损伤患者 122 例作为研究对象。按随机数表法将其分为对照组（61 例，常规康复干预）和试验组（61 例，下肢外骨骼机器人干预），两组患者均干预 45 d。比较两组患者的感觉及运动功能、生活活动能力、便秘症状、肺功能及肌力分级。结果：干预后，与对照组相比，试验组运动评分、轻触觉和针刺觉评分更高（$P<0.05$）。与对照组相比，干预 7~45 d，试验组 SCIM Ⅲ评分更高，肺功能指标更高，MMT 分级 3 级占比更高，排便频率、排便困难、不完全排空的感觉、腹部疼痛、上厕所花费的时间评分更低（$P<0.05$）。结论：脊髓损伤患者接受下肢外骨骼机器人干预可改善其感觉及运动功能、生活活动能力、便秘状态、肺功能及肌力分级。

关键词　脊髓损伤；下肢外骨骼机器人；康复医学

中图分类号　R651.2　R493　**文献标识码**　A　**文章编号**　2096-7721（2025）02-0266-06

Application effect of lower limb exoskeleton robot in spinal cord injury patients during rehabilitation

HU Xiaohong[1], WU Jun[2]

(1.Department of Rehabilitation Medicine, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China;
2. Department of Rehabilitation, Xi'an International Medical Center Hospital, Xi'an 710000, China)

Abstract　Objective: To analyze the impact of lower limb exoskeleton robot intervention on rehabilitation in spinal cord injury patients. Methods: 122 spinal cord injury patients in the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University from April 2022 to April 2024 were selected and divided into the control group (n=61, routine rehabilitation intervention) and the experimental group (n=61, lower limb exoskeleton robot intervention) using a random number table. Both groups of patients were treated for 45 days. The sensory and motor function, life activity ability, constipation symptoms, lung function, and muscle strength grades of patients in the two groups were compared. Results: After intervention, the scores of exercise, light touch and acupuncture sense were higher in the experimental group than those in the control group ($P<0.05$). After 7–45 days of intervention, the experimental group had higher SCIM Ⅲ scores, higher lung function indexes, higher proportion of MMT grade 3, and lower scores for frequency of defecation, difficulty in defecation, sensation of incomplete emptying, abdominal pain and time spent on the toilet ($P<0.05$). Conclusion: Lower extremity exoskeleton robotic intervention could improve sensory and motor function, activities of daily living, constipation status, lung function, and muscle strength grading of spinal cord injury patients.

Key words　Spinal Cord Injury; Lower Limb Exoskeleton Robot; Rehabilitation Medicine

脊髓损伤是一种严重的神经系统损伤，患者常伴随下肢运动功能丧失，生活质量受到极大影响[1]。传统康复方法虽然能够在一定程度上促进患者功能恢复，但往往需要长时间的持续干预，且效果因个

基金项目：陕西省重点研发计划项目（2023-YBSF-639，2023-YBSF-546）
Foundation Item: Key R & D Plan Project of Shaanxi Province (2023-YBSF-639，2023-YBSF-546)
引用格式：胡晓红，伍俊. 下肢外骨骼机器人在脊髓损伤患者康复过程中的应用及效果观察 [J]. 机器人外科学杂志（中英文），2025，6（2）：266-270，275.
Citation: HU X H, WU J. Application effect of lower limb exoskeleton robot in spinal cord injury patients during rehabilitation[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(2): 266-270, 275.
通讯作者（Corresponding Author）：伍俊（WU Jun），Email：458550@qq.com

体差异而异[2]。近年来，随着科技飞速发展，下肢外骨骼机器人作为一种新兴康复辅助设备，逐渐在脊髓损伤患者康复中展现出独特优势[3]，其是基于人体解剖学设计的智能机械系统，通过机械、电子和智能控制技术，实现对人体下肢运动功能的支持和增强[4-5]。对于脊髓损伤患者而言，这种机器人技术提供了一种全新的康复手段，有助于患者恢复行走能力，提高生活质量。同时，下肢外骨骼机器人还能根据患者的具体情况提供个性化的康复训练方案，从而提高康复效果。然而，尽管下肢外骨骼机器人在康复领域的应用前景广阔，但目前在国内脊髓损伤患者康复过程中的具体效果和应用价值仍需通过深入的研究来进一步验证[6]。本研究旨在通过观察下肢外骨骼机器人在脊髓损伤患者康复过程中的应用效果，评估其对患者机体功能的改善作用。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取 2022 年 4 月—2024 年 4 月于西安交通大学第一附属医院收入的脊髓损伤患者 122 例作为研究对象。采用随机数表法将其分为对照组（61 例，常规康复干预）和试验组（61 例，下肢外骨骼机器人干预）。纳入标准：①入院经影像学确诊脊髓损伤[7]；②年龄 >18 岁，有自主行为能力；③属于外伤导致的不完全性脊髓损伤，损伤部位为胸或腰脊髓；④入院后接受外科手术干预，术后生命体征平稳；⑤入组时距受伤时间在 3 个月以内；⑥可配合完成研究；⑦患者及其家属对本研究内容及利弊均了解较为充分，完成知情同意书签署。排除标准：①入组前已接受过其他形式康复训练；②合并强直性脊柱炎、明显下肢痉挛；③既往有髋关节手术史；④存在认知功能障碍；⑤合并心、肝等重要脏器功能障碍；⑥合并骨质疏松、未控制的感染、严重的精神疾病。本研究已获医院伦理委员会审批。两组患者基线资料见表 1。

1.2 方法

1.2.1 对照组 患者接受常规康复干预，包括日常生活技能训练、平衡能力锻炼、体位变换练习等多项功能锻炼，康复师辅助进行步行训练。具体训练内容涉及负重练习、重心转移训练、地面步行模拟、坐站转换练习、平板步行训练以及上下楼梯的实际操作等多个方面。训练频率为每天 2 次，每次持续 30 min，每周 5 d，持续干预 45 d。

表 1 两组患者基线资料比较 [$\bar{x} \pm s$，n（%）]

Table 1 Comparison of baseline data between the two groups of patients [$\bar{x} \pm s$，n（%）]

指标	试验组（n=61）	对照组（n=61）	t/χ^2 值	P 值
年龄（岁）	39.43 ± 7.67	40.07 ± 8.12	−0.447	0.656
病程（月）	1.98 ± 0.47	2.03 ± 0.48	−0.573	0.567
性别			0.153	0.696
男	41（67.21）	43（70.49）		
女	20（32.79）	18（29.51）		
脊髓损伤部位			0.131	0.717
胸	30（49.18）	32（52.46）		
腰	31（50.82）	29（47.54）		
ASIA 分级			0.145	0.703
B 级	39（63.93）	41（67.21）		
C 级	22（36.07）	20（32.79）		

1.2.2 试验组 患者在对照组基础上接受下肢外骨骼机器人干预。采用平地行走式外骨骼康复机器人（型号：BEAR-H1 型，深圳迈步机器人公司）辅助患者进行室内步行训练。该机器人每条腿设计有三个主动自由度和一个被动自由度，其中三个主动自由度能分别实现髋关节、膝关节和踝关节在矢状面上的灵活旋转，被动自由度能够实现髋关节内收、外展。训练前，根据患者的下肢长度、腰宽等个人体征对外骨骼机械臂长度进行调整，由专业康复师协助患者穿戴外骨骼，精确录入患者个人信息，如受试编号、身高、体重、大腿及小腿长度等，确保训练的个性化和精确性。训练中，机器人会实时收集患者肢体状态信息，并通过先进的人机交互技术，不断调整下肢助力，辅助患者完成运动。外骨骼的步行频率设置为 0.1~0.5 Hz，助力等级划分为 15 级，以适应不同患者的具体需求。训练初期，步频统一设定为 0.3 Hz，随后根据患者步行能力的提升和训练进展，步频和助力等级会自动进行适应性调整，无需人工干预。训练频率为每天 1 次，每次 30 min，每周 5 d，持续干预 45 d。

1.3 观察指标 ①美国脊髓损伤协会（American Spinal Injury Association，ASIA）感觉及运动评分[8]：于干预前、干预结束后评估。其中，ASIA 感觉评分包括针刺觉和轻触觉，包含 28 个触点。每个触点评分为 0~2 分，0 分表示感觉功能完全缺失，1 分表示

感觉功能受损或有所降低，2 分表示感觉功能保持正常。针刺觉和轻触觉总分为 112 分，分数越高表示患者感觉功能越好。ASIA 运动评分评估全身 20 块关键肌肌力状况，每块关键肌评分为 0~5 分，两侧总分为 100 分，分数越高表示患者运动功能越好。②脊髓独立性评定（Spinal Cord Injury Independence Measure，SCIM）Ⅲ评分[9]：于干预前、干预第 7 d、14 d、30 d、45 d 评估。该评分包括 3 个维度，总分为 0~100 分，分数越高表示患者生活活动能力越好。③ Wexner 便秘症状评分[10]：于干预前、干预结束后评估。该量表包括 5 个维度（排便频率、排便困难、不完全排空的感觉、腹部疼痛、上厕所花费的时间），每个维度按照 0~5 分进行评分，总分在 0~25 分，分数越高表示患者便秘症状越严重。④肺功能指标：于干预前、干预结束后采用肺功能检测仪（德国 SCHILLER）测患者用力肺活量（Forced Vital Capacity，FVC）、第 1 秒最大呼气量（Forced Expiratory Volume in One Second，FEV1）、每分钟最大通气量（Maximal Voluntary Ventilation，MVV）。⑤股四头肌徒手肌力检查（Manual Muscle Testing，MMT）分级[11]：于干预前、干预结束后评估。MMT 分级分为 0~5 级，分级越高表示患者肌力越好。

1.4 统计学方法 本研究数据均采用 SPSS 22.0 统计软件分析，采用 GraphPad Prism 8 软件绘图。计数资料用例数（百分比）[n（%）] 表示，采用 χ^2 检验和秩和检验；符合正态分布的计量资料用均数 ± 标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，采用独立样本 t 检验，多时点组间比较采用重复测量方差，以 $P<0.05$ 认为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 感觉及运动功能 干预前，两组患者运动评分、轻触觉和针刺觉评分比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）。干预后，与对照组相比，试验组运动评分、轻触觉和针刺觉评分更高，差异有统计学意义（$P<0.05$），见表 2。

2.2 生活活动能力 两组患者 SCIM Ⅲ评分 $F_{时点}$、$F_{交互}$、$F_{组间}$ 比较，差异有统计学意义（$P<0.05$），SCIM Ⅲ评分有随时间变化趋势，且组间存在差异。干预前，两组患者 SCIM Ⅲ评分比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）。干预 7~45 d，试验组患者 SCIM Ⅲ评分较对照组更高，差异有统计学意义（$P<0.05$），见表 3。

2.3 便秘症状 干预前，两组患者排便频率、排便困难、不完全排空的感觉、腹部疼痛、上厕所花费的时间评分比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）。干预后，与对照组相比，试验组患者排便频率、排便困难、不完全排空的感觉、腹部疼痛、上厕所花费的时间评分更低，差异有统计学意义（$P<0.05$），见表 4。

2.4 肺功能 干预前，两组患者 FVC、FEV1、MVV 比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）。干预后，与对照组相比，试验组患者 FVC、FEV1、MVV 更高，差异有统计学意义（$P<0.05$），见表 5。

表 2 两组患者 ASIA 感觉及运动评分比较（$\bar{x} \pm s$）

Table 2 Comparison of ASIA sensory and motor scores between the two groups of patients（$\bar{x} \pm s$）

指标	试验组（n=61）	对照组（n=61）	t 值	P 值
干预前				
运动	58.08 ± 5.11	57.05 ± 5.97	1.027	0.306
轻触觉	20.66 ± 3.51	20.41 ± 3.31	0.398	0.691
针刺觉	21.36 ± 4.03	21.03 ± 3.89	0.457	0.648
干预后				
运动	74.41 ± 3.57[a]	70.44 ± 4.15[a]	5.657	<0.001
轻触觉	30.07 ± 2.45[a]	25.18 ± 3.17[a]	9.535	<0.001
针刺觉	30.46 ± 3.04[a]	25.92 ± 3.44[a]	7.728	<0.001

注：与同组干预前相比，[a]$P<0.05$

表 3 两组患者 SCIM Ⅲ评分比较（$\bar{x} \pm s$）

Table 3 Comparison of SCIM Ⅲ scores between the two groups of patients（$\bar{x} \pm s$）

组别	干预前	干预 7 d	干预 14 d	干预 30 d	干预 45 d	$F_{时点}$	$F_{组间}$	$F_{交互}$
试验组（n=61）	52.02 ± 3.39	54.41 ± 2.10	56.95 ± 3.19	60.39 ± 2.16	64.08 ± 3.50	536.288	19.482	19.544
对照组（n=61）	52.11 ± 3.55	53.21 ± 2.46	54.98 ± 3.10	57.66 ± 2.89	60.11 ± 3.12			
t 值	−0.156	2.891	3.459	5.937	6.604	—	—	—
P 值	0.876	0.005	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

2.5 肌力分级 干预前，两组患者 MMT 分级比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）。干预后，与对照组相比，试验组患者 MMT 分级 3 级占比更高，差异有统计学意义（$P<0.05$），见表 6。

3 讨论

脊髓损伤是一种严重的身体创伤，据世界卫生组织统计，全球每年新增 25 万 ~50 万脊髓损伤患者，对家庭和社会造成沉重负担 [12]。脊髓损伤患者恢复过程漫长且具挑战性。传统康复方法如减重平板训练等虽有一定效果，但存在治疗师体能消耗大、步行控制质量不稳定等局限性 [13-14]。下肢外骨骼机器人作为新兴技术，为脊髓损伤患者的康复带来了新希望。下肢外骨骼机器人基于人体解剖学设计，通过机械、电子和智能控制技术实现关节运动的支持和增强 [15]，它能精确感知患者的运动意图，提供个性化的康复训练方案，显著改善患者的平衡能力和协调性。Edwards D J 等人 [16] 发现，对不完全性脊髓损伤患者开展基于外骨骼的机器人步态训练可较好改善其独立踏步能力与下肢肌力。本研究参考其他学者研究，从多角度分析了下肢外骨骼机器人在脊髓损伤患者康复中的作用。

本研究结果显示，与对照组相比，试验组运动评分、轻触觉和针刺觉评分更高，MMT 分级 3 级占比更高，说明试验组患者机体感觉、运动及肌力恢

表 4 两组患者 Wexner 便秘症状评分比较（$\bar{x}\pm s$）

Table 4 Comparison of Wexner constipation symptoms between the two groups of patients（$\bar{x}\pm s$）

指标	试验组（n=61）	对照组（n=61）	t 值	P 值
干预前				
排便频率	4.05 ± 4.63	4.00 ± 0.48	0.574	0.567
排便困难	3.79 ± 0.61	3.70 ± 0.56	0.775	0.440
不完全排空的感觉	3.84 ± 0.49	3.75 ± 0.62	0.808	0.421
腹部疼痛	3.74 ± 0.48	3.69 ± 0.53	0.535	0.593
上厕所花费的时间	3.72 ± 0.52	3.66 ± 0.57	0.661	0.510
干预后				
排便频率	2.30 ± 0.67[a]	2.87 ± 0.81[a]	−4.284	<0.001
排便困难	2.64 ± 0.52[a]	3.05 ± 0.53[a]	−4.321	<0.001
不完全排空的感觉	2.38 ± 0.58[a]	3.13 ± 0.43[a]	−8.157	<0.001
腹部疼痛	1.51 ± 0.50[a]	2.48 ± 0.54[a]	−10.271	<0.001
上厕所花费的时间	2.38 ± 0.55[a]	3.00 ± 0.48[a]	−6.628	<0.001

注：与同组干预前相比，[a]$P<0.05$

表 5 两组患者肺功能比较（$\bar{x}\pm s$）

Table 5 Comparison of lung function between the two groups of patients（$\bar{x}\pm s$）

指标	试验组（n=61）	对照组（n=61）	t 值	P 值
干预前				
FVC（L）	1.41 ± 0.50	1.37 ± 0.45	0.465	0.643
FEV1（L）	1.29 ± 0.35	1.26 ± 0.38	0.454	0.651
MVV（L/min）	48.65 ± 10.45	47.45 ± 11.01	0.617	0.538
干预后				
FVC（L）	3.45 ± 0.64[a]	2.64 ± 0.45[a]	8.089	<0.001
FEV1（L）	3.36 ± 0.77[a]	2.01 ± 0.60[a]	10.806	<0.001
MVV（L/min）	71.40 ± 11.62[a]	60.43 ± 8.75[a]	5.890	<0.001

注：与同组干预前相比，[a]$P<0.05$

表 6　两组患者 MMT 分级比较 [*n*（%）]

Table 6　Comparison of MMT classification between the two groups of patients [*n*（%）]

指标	试验组（*n*=61）	对照组（*n*=61）	*Z* 值	*P* 值
干预前			−0.006	0.995
0 级	0（0.00）	0（0.00）		
1 级	33（54.10）	32（52.46）		
2 级	25（40.98）	28（45.90）		
3 级	3（4.92）	1（1.64）		
4 级	0（0.00）	0（0.00）		
5 级	0（0.00）	0（0.00）		
干预后			−2.415	0.016
0 级	0（0.00）	0（0.00）		
1 级	8（13.11）	12（19.67）		
2 级	30（49.18）	39（63.93）		
3 级	23（37.70）	10（16.39）		
4 级	0（0.00）	0（0.00）		
5 级	0（0.00）	0（0.00）		

复更好。这是因为下肢外骨骼机器人能够根据患者具体情况，如肌力水平、运动范围等，调整训练的幅度、速度和力量。这种个性化的训练方式确保了康复计划的针对性和有效性，从而更精确地提升患者的肌力运动功能[17]。此外，下肢外骨骼机器人能够实时监测患者的运动状态，并提供即时的反馈，这使得康复师可以根据患者的实时表现调整训练方案，确保训练始终保持在最佳状态，从而加速肌力运动功能的恢复[18]。同时，机器人技术使得下肢外骨骼能够提供精确的运动控制，模拟正常步态和行走模式，这种精准的控制有助于患者重新学习正确的运动模式，促进肌肉记忆的形成，进而提升肌力运动功能[19-20]。

从生活活动能力角度分析，干预 7~45 d，试验组 SCIM Ⅲ评分高于对照组，说明下肢外骨骼机器人干预能够显著提升患者的生活活动能力。分析原因可能为下肢外骨骼机器人能够模拟人类下肢骨骼和肌肉运动方式，帮助患者恢复行走功能。这种模拟正常行走训练方式有助于患者重新适应日常活动中基本动作，如站立、行走和上下楼梯等。通过下肢外骨骼机器人辅助训练，患者能够逐渐恢复生活自理能力，如穿衣、进食和洗漱等[21]。这些自理能力的提升直接增强了患者生活活动能力。此外，下肢外骨骼机器人的应用能够增强患者康复信心，使其更加积极地参与到康复训练中来。这种积极参与态度有助于患者在日常生活中更加自主地进行活动，进一步提升生活活动能力。

胡晓敏等人[22]发现，外骨骼机器人训练能够改善患者排便时间、排便频率等肠功能指标，减少开塞露使用支数。本研究所得结论与其一致，试验组患者被发现便秘症状较对照组显著改善。分析原因在于，下肢外骨骼机器人的干预可能通过促进患者的整体身体活动，间接地促进了肠道的蠕动，这有助于改善肠道功能，减轻便秘症状。同时，通过下肢外骨骼机器人的辅助训练，患者的身体代谢可能得到改善，从而减少便秘的发生，因为良好的代谢有助于食物的消化和废物的排出。除肠道功能外，试验组患者的肺功能同样较对照组显著改善，这与 XIANG X N 等人[23]研究所得结论类似。这是因为下肢外骨骼机器人的干预可能涉及全身的运动，包括呼吸肌的锻炼[24-26]，这有助于增强呼吸肌的力量，进而提升肺功能[27-28]。同时，通过下肢外骨骼机器人的辅助训练，患者可能学会了更加有效的呼吸模式，提高了肺部的通气效率，进而提升肺功能[29-30]。

综上所述，脊髓损伤患者接受下肢外骨骼机器人干预可改善感觉及运动功能、生活活动能力、便秘状态、肺功能及肌力分级。本研究不足之处在于，探讨脊髓功能损伤的恢复时，由于观察时间较短，对具体应用效果展示有限，后续研究还需增加随访及居家康复指导至术后半年甚至 1 年，以期更准确地验证下肢外骨骼机器人辅助康复训练的有效性。

利益冲突声明：本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明：胡晓红负责实验设计与实施，撰写文章，数据统计与分析；伍俊负责分析和解释数据，指导文章并最终定稿。

参考文献

[1] XIANG X N, DING M F, ZONG H Y, et al. The safety and feasibility of a new rehabilitation robotic exoskeleton for assisting individuals with lower extremity motor complete lesions following spinal cord injury (SCI): an observational study[J]. Spinal Cord, 2020 , 58(7): 787–794.

[2] Eli I, Lerner D P, Ghogawala Z. Acute traumatic spinal cord injury[J]. Neurol Clin, 2021, 39(2): 471–488.

[3] Hersh A M, Weber-Levine C, Jiang K, et al. Spinal cord injury: emerging technologies[J]. Neurosurg Clin N Am, 2024, 35(2): 243–251.

[4] 李京泽 , 邢靖松 , 吕福现 , 等 . 下肢康复机器人训练对脑卒中偏瘫患者步行功能的影响 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2023, 4(6): 512–516.

[5] 王艳 , 吴珊红 , 宫子涵 . 下肢外骨骼机器人系统改善脑卒中患者步行功能研究进展 [J]. 中国现代神经疾病杂志 , 2023, 23(1): 22–28.

[6] 王锋 , 李靖龙 . 下肢外骨骼机器人在脊髓损伤中的应用研究进展 [J]. 实用医学杂志 , 2022, 38(23): 3012–3016.

（下转 275 页）