

## 外骨骼机器人步态训练系统联合经颅直流电刺激对脑梗死患者下肢运动功能及步行能力恢复的疗效研究

郑春利<sup>1</sup>, 金岩春<sup>2</sup>, 张大伟<sup>3</sup>

(1. 西安大兴医院神经内科 陕西 西安 710016; 2. 陕西省康复医院神经调控中心 陕西 西安 710065;  
3. 陕西省康复医院运动疗法二科 陕西 西安 710065)

**摘要** **目的:** 探讨外骨骼机器人步态训练系统联合经颅直流电刺激 (tDCS) 对脑梗死患者下肢运动功能及步行能力恢复的疗效。**方法:** 选取 2022 年 1 月—2023 年 12 月于西安大兴医院治疗的脑梗死患者 120 例作为研究对象, 采用随机数表法将其分为对照组、机器人组、tDCS 组和联合治疗组, 每组 30 例。四组患者均接受常规康复治疗, 机器人组在此基础上增加外骨骼机器人步态训练, tDCS 组增加 tDCS 治疗, 联合治疗组同时接受外骨骼机器人步态训练和 tDCS 治疗。于治疗前、治疗 4 周及治疗 8 周分别评估患者的下肢运动功能、平衡功能、步行能力及日常生活活动能力及神经可塑性。**结果:** 治疗 4 周和 8 周后, 四组患者的 Fugl-Meyer 下肢运动功能量表 (FMA-LE) 评分、Berg 平衡量表 (BBS) 评分、10 米步行测试 (10MWT)、功能性步行量表 (FAC) 评分、改良 Barthel 指数 (MBI) 评分、脑卒中专用生活量表 (SS-QOL) 评分及运动诱发电位 (MEP) 潜伏期和波幅均较治疗前显著改善 ( $P < 0.05$ )。与对照组相比, 机器人组和 tDCS 组的各项评分均显著提高 ( $P < 0.05$ )。联合治疗组在 FMA-LE、BBS、10MWT、FAC、SS-QOL 评分及 MEP 潜伏期和波幅方面显著优于其他三组 ( $P < 0.05$ ), MBI 评分优于对照组和 tDCS 组 ( $P < 0.05$ ), 但与机器人组差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。**结论:** 外骨骼机器人步态训练系统和 tDCS 均能有效改善脑梗死患者的下肢运动功能、步行能力、日常生活活动能力和生活质量。两种方法联合应用具有协同效应, 可能通过促进神经可塑性, 加速运动功能的康复, 为脑梗死患者的康复治疗提供了新的有效方案。

**关键词** 脑梗死; 外骨骼机器人; 经颅直流电刺激

**中图分类号** R743 R493 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2025) 01-0060-09

### Curative effect of exoskeleton robot gait training system combined with transcranial direct current stimulation on the recovery of lower limb motor function and walking ability in patients with cerebral infarction

ZHENG Chunli<sup>1</sup>, JIN Yanchun<sup>2</sup>, ZHANG Dawei<sup>3</sup>

(1. Department of Neurology, Xi'an Daxing Hospital, Xi'an 710016, China; 2. Neuromodulation Center, Shaanxi Rehabilitation Hospital, Xi'an 710065, China; 3. No. 2 Department of Physical Therapy, Shaanxi Rehabilitation Hospital, Xi'an 710065, China)

**Abstract** **Objective:** To investigate the curative effect of exoskeleton robot gait training system and transcranial direct current stimulation (tDCS) on the recovery of lower limb motor function and walking ability in patients with cerebral infarction. **Methods:** 120 patients with cerebral infarction in Xi'an Daxing Hospital from January 2022 to December 2023 were selected and divided into the control group, robot group, tDCS group, and combination treatment group, with 30 patients in each group. All patients received conventional rehabilitation treatment, while the robot group added exoskeleton robot gait training, the tDCS group

**基金项目:** 2022 年度卫生健康科研项目 (2022D071)

**Foundation Item:** 2022 Health Research Project(2022D071)

**通讯作者:** 张大伟, Email: 517101919@qq.com

**Corresponding Author:** ZHANG Dawei, Email: 517101919@qq.com

**引用格式:** 郑春利, 金岩春, 张大伟. 外骨骼机器人步态训练系统联合经颅直流电刺激对脑梗死患者下肢运动功能及步行能力恢复的疗效研究 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2025, 6 (1): 60-68.

**Citation:** ZHENG C L, JIN Y C, ZHANG D W. Curative effect of exoskeleton robot gait training system combined with transcranial direct current stimulation on the recovery of lower limb motor function and walking ability in patients with cerebral infarction[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(1): 60-68.

added tDCS therapy, and the combined treatment group received both exoskeleton robot gait training and tDCS therapy. Assessments of lower extremity motor function, balance function, walking ability, activities of daily living, and neuroplasticity were conducted before treatment, 4 weeks and 8 weeks after treatment. **Results:** After 4 and 8 weeks of treatment, the Fugl-Meyer assessment of lower extremity (FMA-LE) scores, Berg balance scale (BBS) scores, 10-meter walk test (10 MWT), functional ambulation category scale (FAC) scores, modified Barthel index (MBI) scores, stroke-specific quality of life scale (SS-QOL) scores, incubation period and amplitude of motor evoked potential (MEP) were all improved significantly compared to those before treatment ( $P<0.05$ ). And all scores were significantly improved in both the robot group and the tDCS group compared to the control group ( $P<0.05$ ). In terms of FMA-LE, BBS, 10 MWT, FAC, and SS-QOL scores, as well as incubation period and MEP amplitude ( $P<0.05$ ), the combination treatment group outperformed the other three groups. Additionally, MBI scores of the combination treatment group were better than the control and tDCS groups ( $P<0.05$ ), but the difference was not statistically significant comparing with the robot group ( $P>0.05$ ). **Conclusion:** In patients with cerebral infarction, the exoskeleton robot gait training system and tDCS both can effectively improve the lower limb motor function, walking ability, activities of daily living, and quality of life. The combined application of the two methods has a synergistic effect, which may accelerate the rehabilitation of motor function through improving neuroplasticity and provide a new and effective scheme for the rehabilitation of cerebral infarction patients.

**Key words** Cerebral Infarction; Exoskeleton Robot; Transcranial Direct Current Stimulation

脑梗死是由于脑部血液供应障碍导致的局限性脑组织缺血性坏死或软化疾病，是最常见的脑血管疾病之一<sup>[1-3]</sup>。近年来，随着康复医学和生物医学工程的快速发展，一些新型康复技术和设备在脑梗死患者的康复治疗中得到广泛应用。外骨骼机器人步态训练系统和经颅直流电刺激（Transcranial Direct Current Stimulation, tDCS）是其中两种备受关注的康复方法。外骨骼机器人步态训练系统是一种基于机器人技术的康复设备，可以模拟正常人体步态，协助患者完成重复性、高强度的步行训练<sup>[4-5]</sup>。该系统通过提供精确、可控的步态模式，帮助患者重建正确的步行模式，促进神经系统的可塑性重组<sup>[6]</sup>。相较于传统的步态训练方法，外骨骼机器人步态训练系统具有训练强度高、重复次数多、精确度高等优点，可以更有效地改善患者的下肢运动功能和步行能力<sup>[7]</sup>。多项研究表明，外骨骼机器人步态训练可显著改善脑卒中患者的步行速度、步长和平衡功能<sup>[8-9]</sup>。tDCS是一种无创性脑刺激技术，通过在头皮上施加微弱的直流电，调节大脑皮层的兴奋性，从而影响神经系统的功能<sup>[10]</sup>。研究表明，tDCS可以促进神经可塑性，改善运动功能和认知功能<sup>[11]</sup>。在脑梗死患者的康复治疗中，tDCS已被证实能够促进运动功能的恢复，特别是在改善上肢运动功能方面取得了较好的效果<sup>[12-13]</sup>。有研究发现，tDCS可以通过增强大脑皮层的兴奋性和可塑性，促进运动学习和运动控制的恢复<sup>[14]</sup>。然而，目前关于外

骨骼机器人步态训练系统和 tDCS 联合应用于脑梗死患者下肢运动功能及步行能力恢复的研究相对较少。考虑到两种方法各自的优势和作用机制，外骨骼机器人步态训练系统可提供精确的运动模式和高强度的重复训练，而 tDCS 可通过调节大脑皮层兴奋性来增强神经可塑性，两者结合可能会在神经功能重塑和运动功能恢复方面产生更好的效果<sup>[15]</sup>。我们假设将外骨骼机器人步态训练系统与 tDCS 联合应用可能会产生协同效应，进一步提高脑梗死患者的康复效果。因此，本研究旨在探讨外骨骼机器人步态训练系统联合 tDCS 对脑梗死患者下肢运动功能及步行能力恢复的疗效，以期为脑梗死患者提供更有效的康复方案，提高其生活质量，同时为未来的康复治疗研究提供有价值的参考。

## 1 资料与方法

**1.1 研究对象** 选取 2022 年 1 月—2023 年 12 月在西安大兴医院住院治疗的脑梗死患者 120 例作为研究对象。本研究已获得医院伦理委员会批准。

**1.2 纳入标准** ①符合脑梗死的诊断标准<sup>[16]</sup>，并经头颅 CT 或 MRI 确诊；②首次发病，病程在 2 周~3 个月，且病情稳定至少 2 周；③年龄 18~75 岁；④意识清楚，能够理解和执行简单指令，简易精神状态检查量表（Mini-mental State Examination, MMSE）评分  $>21$  分；⑤下肢肌力  $\geq$  II 级（徒手肌力检查法）；⑥改良 Ashworth 痉挛评分  $\leq$  2 级；⑦静息血压  $<140/90$  mmHg；

⑧患者或家属签署知情同意书。

**1.3 排除标准** ①合并严重心、肝、肾功能不全者；②有癫痫病史或近期出现癫痫发作者；③有严重认知障碍或精神疾病者；④合并严重骨关节疾病，影响下肢功能者；⑤有颅内金属植入物、心脏起搏器等不适合接受tDCS治疗者；⑥皮肤有破损、感染等不适合接受tDCS治疗者；⑦参与其他临床试验者；⑧有严重的视觉或听觉障碍影响评估和治疗者；⑨有严重的平衡障碍或晕厥史，不能安全进行步态训练者。

**1.4 分组方法** 样本量的计算基于预期主要结局指标 Fugl-Meyer 下肢运动功能量表 (Fugl-Meyer Assessment of Lower Extremity, FMA-LE) 评分的改善程度。根据前期预实验结果，预期联合治疗组比单一治疗组 FMA-LE 评分改善程度高 3 分，标准差为 4 分，设  $\alpha=0.05$  (双侧)， $\beta=0.1$ ，样本量计算公式为  $n=2[(Z_{\alpha}/2+Z_{\beta})\sigma/\delta]^2$ ，得出每组所需样本量为 23 例。考虑到可能的脱落率约 20%，最终确定每组 30 例，共 120 例。将 120 例患者随机分为对照组、机器人组、tDCS 组和联合治疗组。随机分组由独立的统计学专家使用计算机生成的随机数序列完成，确保分组的隐蔽性。评估人员对分组情况不知情，以保证评估的客观性。

**1.5 治疗方法** 所有治疗均由经过统一培训的治疗师完成。为减少治疗师经验差异的影响，采用轮换制，确保每组患者均接受不同治疗师的治疗。

**1.5.1 对照组** 接受常规康复治疗，包括运动疗法、作业疗法、物理因子治疗等，每天治疗 2 h，每周 5 天，共 8 周。具体内容如下，①运动疗法：关节活动度训练、肌力训练、平衡训练、步行训练等；②作业疗法：日常生活活动能力训练；③物理因子治疗：低频电刺激、中频电疗等。

**1.5.2 机器人组** 在常规康复治疗的基础上，增加外骨骼机器人步态训练 (如图 1)。采用 Lokomat Pro (Hocoma AG, 瑞士) 外骨骼机器人步态训练系统，每次训练 30 min，每天 1 次，每周 5 天，共 8 周。训练过程中根据患者的耐受程度和恢复情况逐步调整训练参数，如步行速度、体重支持比例、导引力等，具体方案如

下。第 1~2 周：步行速度 1.0~1.5 km/h，体重支持 50%~60%，导引力 80%~90%；第 3~4 周：步行速度 1.5~2.0 km/h，体重支持 40%~50%，导引力 70%~80%；第 5~6 周：步行速度 2.0~2.5 km/h，体重支持 30%~40%，导引力 60%~70%；第 7~8 周：步行速度 2.5~3.0 km/h，体重支持 20%~30%，导引力 50%~60%。

**1.5.3 tDCS 组** 在常规康复治疗的基础上，增加 tDCS 治疗 (如图 2)。采用 Soterix Medical 1x1 tDCS 刺激器 (Soterix Medical Inc., 美国)，阳极 (5 cm × 7 cm) 置于受损半球初级运动皮层 (M1) 区域 (C3 或 C4，根据 10-20 国际脑电图电极放置系统)，阴极 (5 cm × 7 cm) 置于对侧额上区 (Fp1 或 Fp2)。刺激强度为 2 mA，持续时间 20 min，每天 1 次，每周 5 天，共 8 周。为了确保安全性和有效性，每次治疗前检查电极与皮肤的接触情况，并询问患者是否有不适感。

**1.5.4 联合治疗组** 在常规康复治疗的基础上，



图 1 外骨骼机器人步态训练  
Figure 1 Exoskeleton robot gait training



图 2 tDCS 治疗操作  
Figure 2 tDCS treatment

同时接受外骨骼机器人步态训练和 tDCS 治疗，治疗方案同上述机器人组和 tDCS 组。tDCS 治疗在机器人步态训练之前进行，两者训练间隔不少于 30 min。

所有患者在治疗期间继续接受常规药物治疗，包括抗血小板、调脂、降压等。

**1.6 观察指标** 在治疗前、治疗 4 周及治疗 8 周分别评估以下指标：①下肢运动功能：采用 FMA-LE 评分<sup>[17]</sup>进行评估，评估内容包括反射活动、协同运动模式、离开协同运动、协调性和速度等。满分 34 分，分数越高表示下肢运动功能越好。②平衡功能：采用 Berg 平衡量表（Berg Balance Scale, BBS）<sup>[18]</sup>进行评估，评估内容包括坐位平衡、站立平衡、转移等 14 个项目。满分 56 分，分数越高表示平衡功能越好。③步行功能：采用 10 米步行测试（10-Meter Walk Test, 10MWT）<sup>[19]</sup>进行评估，记录患者以舒适速度行走 10 米所需时间，取 3 次测试的平均值。④功能性步行分级：采用功能性步行量表（Functional Ambulation Category Scale, FAC）<sup>[20]</sup>进行评估，分为 0~5 级，0 级表示不能行走或需要两人以上帮助；1 级表示需要一个人持续强力支撑才能行走；2 级表示需要一个人持续或间断支撑才能行走；3 级表示需要口头指导或监督才能行走；4 级表示能在平地上独立行走，但在斜坡、楼梯等需要帮助；5 级表示能在各种地形上独立行走。⑤日常生活活动能力：采用改良 Barthel 指数（Modified Barthel Index, MBI）<sup>[21]</sup>进行评估，评估内容包括进食、洗澡、穿衣、如厕等 10 个项目。满分 100 分，分数越高表示日常生活活动能力越好。⑥生活质量：采用脑卒中专用生活质量量表（Stroke Specific Quality of Life Scale, SS-QOL）<sup>[22]</sup>进行评估，包括 12 个维度共 49 个条目，每个条目 1~5 分，总分 49~245 分，分数越高表示生活质量越好。⑦神经可塑性：采用经颅磁刺激测量运动诱发电位（Motor Evoked Potential, MEP）的潜伏期和波幅，以评估皮质脊髓束的完整性和兴奋性<sup>[23]</sup>。使用 Magstim Rapid<sup>2</sup> 磁刺激器（Magstim Company Ltd., UK）进行测量，刺激强度为运动阈值的 120%，记录对

侧拇短展肌的 MEP。⑧观察两组患者的不良反应。

所有评估均由经过培训、不知晓分组情况的评估人员完成，以确保评估的客观性和可靠性。

**1.7 统计学方法** 所有数据均采用 SPSS 25.0 软件进行统计分析。计量资料以均数  $\pm$  标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 表示，组间比较采用单因素方差分析，组内不同时间点比较采用重复测量方差分析。计数资料以例数（百分比） $[n(\%)]$  表示，采用  $\chi^2$  检验。采用 Bonferroni 法进行多重比较的校正。 $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 2 结果

**2.1 一般资料** 四组患者一般资料比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )，具有可比性（见表 1）。

**2.2 下肢运动功能** 四组患者治疗前 FMA-LE 评分比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。治疗 4 周和 8 周后，四组患者 FMA-LE 评分均较治疗前提高，机器人组、tDCS 组和联合治疗组 FMA-LE 评分均高于对照组，联合治疗组高于机器人组和 tDCS 组，差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )，机器人组与 tDCS 组比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )，见表 2。

**2.3 平衡功能** 四组患者治疗前 BBS 评分比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。治疗 4 周和 8 周后，四组患者 BBS 评分均较治疗前显著提高，机器人组、tDCS 组和联合治疗组 BBS 评分均高于对照组，联合治疗组高于机器人组和 tDCS 组，差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )，机器人组与 tDCS 组比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )，见表 3。

### 2.4 步行功能

**2.4.1 10MWT** 四组患者治疗前 10MWT 比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。治疗 4 周和 8 周后，四组患者 10MWT 结果均优于治疗前，机器人组、tDCS 组和联合治疗组 10MWT 结果优于对照组，联合治疗组 10MWT 结果优于机器人组和 tDCS 组，差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )，机器人组与 tDCS 组比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )，见表 4。

**2.4.2 FAC 评分** 四组患者治疗前 FAC 评分比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。治疗 4 周和

8 周后，四组患者 FAC 评分均较治疗前提高，机器人组、tDCS 组和联合治疗组 FAC 评分均高于对照组，联合治疗组 FAC 评分显著高于机器人组和 tDCS 组，差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )，

机器人组与 tDCS 组比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )，见表 5。

**2.5 日常生活活动能力** 四组患者治疗前 MBI 评分比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。治疗 4 周

表 1 四组患者一般资料比较 [ $\bar{x} \pm s, n(\%)$ ]

Table 1 Comparison of general data among the four groups of patients [ $\bar{x} \pm s, n(\%)$ ]

| 项目        | 对照组 (n=30)    | 机器人组 (n=30)   | tDCS 组 (n=30) | 联合治疗组 (n=30)  | $F/\chi^2$ 值 | P 值   |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------|
| 年龄 (岁)    | 62.49 ± 8.69  | 63.19 ± 9.08  | 61.82 ± 8.91  | 62.93 ± 9.30  | 0.149        | 0.928 |
| 性别 (男/女)  | 18/12         | 17/13         | 19/11         | 18/12         | 0.273        | 0.965 |
| 病程 (d)    | 35.63 ± 12.38 | 34.88 ± 11.82 | 36.24 ± 13.11 | 35.29 ± 12.67 | 0.071        | 0.980 |
| 梗死部位      |               |               |               |               | 1.867        | 0.932 |
| 基底节区      | 12 (40.00)    | 13 (43.33)    | 11 (36.67)    | 14 (46.67)    |              |       |
| 大脑半球      | 10 (33.33)    | 9 (30.00)     | 12 (40.00)    | 8 (26.67)     |              |       |
| 脑干        | 8 (26.67)     | 8 (26.67)     | 7 (23.33)     | 8 (26.67)     |              |       |
| NIHSS 评分  | 9.33 ± 2.82   | 9.47 ± 3.09   | 9.08 ± 2.94   | 9.43 ± 3.02   | 0.115        | 0.949 |
| 偏瘫侧 (左/右) | 16/14         | 15/15         | 17/13         | 16/14         | 0.268        | 0.966 |

表 2 四组患者 FMA-LE 评分比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

Table 2 Comparison of FMA-LE scores among the four groups of patients ( $\bar{x} \pm s$ )

| 组别     | 例数 | 治疗前          | 治疗 4 周                      | 治疗 8 周                      |
|--------|----|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 对照组    | 30 | 15.23 ± 3.51 | 19.82 ± 4.11 <sup>a</sup>   | 23.46 ± 4.57 <sup>a</sup>   |
| 机器人组   | 30 | 15.49 ± 3.66 | 22.74 ± 4.33 <sup>ab</sup>  | 27.57 ± 4.75 <sup>ab</sup>  |
| tDCS 组 | 30 | 15.32 ± 3.61 | 21.93 ± 4.24 <sup>ab</sup>  | 26.81 ± 4.70 <sup>ab</sup>  |
| 联合治疗组  | 30 | 15.42 ± 3.83 | 24.62 ± 4.53 <sup>abc</sup> | 30.19 ± 4.88 <sup>abc</sup> |

注：与本组治疗前比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ ；与对照组同期比较，<sup>b</sup> $P < 0.05$ ；与机器人组和 tDCS 组同期比较，<sup>c</sup> $P < 0.05$

表 3 四组患者 BBS 评分比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

Table 3 Comparison of BBS scores among the four groups of patients ( $\bar{x} \pm s$ )

| 组别     | 例数 | 治疗前          | 治疗 4 周                      | 治疗 8 周                      |
|--------|----|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 对照组    | 30 | 28.33 ± 5.24 | 35.64 ± 6.13 <sup>a</sup>   | 41.22 ± 6.82 <sup>a</sup>   |
| 机器人组   | 30 | 28.72 ± 5.40 | 39.83 ± 6.31 <sup>ab</sup>  | 46.52 ± 7.14 <sup>ab</sup>  |
| tDCS 组 | 30 | 28.54 ± 5.31 | 38.87 ± 6.15 <sup>ab</sup>  | 45.72 ± 7.01 <sup>ab</sup>  |
| 联合治疗组  | 30 | 28.57 ± 5.45 | 42.67 ± 6.46 <sup>abc</sup> | 50.27 ± 7.28 <sup>abc</sup> |

注：与本组治疗前比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ ；与对照组同期比较，<sup>b</sup> $P < 0.05$ ；与机器人组和 tDCS 组同期比较，<sup>c</sup> $P < 0.05$

表 4 四组患者 10MWT 比较 ( $\bar{x} \pm s, s$ )

Table 4 Comparison of 10 MWT results among the four groups of patients ( $\bar{x} \pm s, s$ )

| 组别     | 例数 | 治疗前          | 治疗 4 周                      | 治疗 8 周                      |
|--------|----|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 对照组    | 30 | 32.53 ± 6.82 | 26.90 ± 5.72 <sup>a</sup>   | 22.82 ± 5.13 <sup>a</sup>   |
| 机器人组   | 30 | 32.14 ± 6.68 | 23.42 ± 5.18 <sup>ab</sup>  | 18.63 ± 4.54 <sup>ab</sup>  |
| tDCS 组 | 30 | 32.28 ± 6.87 | 24.14 ± 5.43 <sup>ab</sup>  | 19.23 ± 4.71 <sup>ab</sup>  |
| 联合治疗组  | 30 | 32.24 ± 6.82 | 21.53 ± 4.91 <sup>abc</sup> | 16.32 ± 4.19 <sup>abc</sup> |

注：与本组治疗前比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ ；与对照组同期比较，<sup>b</sup> $P < 0.05$ ；与机器人组和 tDCS 组同期比较，<sup>c</sup> $P < 0.05$

和8周后，四组患者 MBI 评分均较治疗前提高，机器人组、tDCS 组和联合治疗组 MBI 评分高于对照组，联合治疗组高于 tDCS 组，差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )，但联合治疗组与机器人组比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )，机器人组与 tDCS 组比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )，见表 6。

**2.6 生活质量** 四组患者治疗前 SS-QOL 总分比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。治疗 4 周和 8 周后，四组患者 SS-QOL 总分均较治疗前提高，机器人组、tDCS 组和联合治疗组 SS-QOL 总分高于对照组，联合治疗组高于机器人组和 tDCS 组，差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )，机器人组与 tDCS 组比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )，见表 7。

**2.7 神经可塑性**

**2.7.1 MEP 潜伏期** 四组患者治疗前 MEP 潜伏期比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。治疗 4 周和 8 周后，四组患者 MEP 潜伏期均较治疗前缩短，机器人组、tDCS 组和联合治疗组 MEP 潜伏期短于对照组，联合治疗组短于机器人组和 tDCS 组，差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )，机器人组与 tDCS 组比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )，见表 8。

**2.7.2 MEP 波幅** 四组患者治疗前 MEP 波幅比较，差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。治疗 4 周和 8 周后，四组患者 MEP 波幅均较治疗前增加，机器人组、tDCS 组和联合治疗组 MEP 波幅高于对照组，联合治疗组高于机器人组和 tDCS 组，差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )，机器人组与

表 5 四组患者 FAC 评分比较 [n (%) ]  
Table 5 Comparison of FAC scores among the four groups of patients [n (%) ]

| 组别     | 例数 | 时间     | 0 级                     | 1 级                      | 2 级                      | 3 级                       | 4 级                      | 5 级                      |
|--------|----|--------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 对照组    | 30 | 治疗前    | 10 (33.33)              | 12 (40.00)               | 8 (26.67)                | 0 (0.00)                  | 0 (0.00)                 | 0 (0.00)                 |
|        |    | 治疗 4 周 | 2 (6.67) <sup>a</sup>   | 8 (26.66) <sup>a</sup>   | 12 (40.00) <sup>a</sup>  | 6 (20.00) <sup>a</sup>    | 2 (6.67) <sup>a</sup>    | 0 (0.00) <sup>a</sup>    |
|        |    | 治疗 8 周 | 0 (0.00) <sup>a</sup>   | 3 (10.00) <sup>a</sup>   | 8 (26.66) <sup>a</sup>   | 11 (36.67) <sup>a</sup>   | 6 (20.00) <sup>a</sup>   | 2 (6.67) <sup>a</sup>    |
| 机器人组   | 30 | 治疗前    | 9 (30.00)               | 13 (43.33)               | 8 (26.67)                | 0 (0.00)                  | 0 (0.00)                 | 0 (0.00)                 |
|        |    | 治疗 4 周 | 0 (0.00) <sup>ab</sup>  | 5 (16.68) <sup>ab</sup>  | 10 (33.33) <sup>ab</sup> | 10 (33.33) <sup>ab</sup>  | 4 (13.33) <sup>ab</sup>  | 1 (3.33) <sup>ab</sup>   |
|        |    | 治疗 8 周 | 0 (0.00) <sup>ab</sup>  | 1 (3.33) <sup>ab</sup>   | 4 (13.32) <sup>ab</sup>  | 9 (30.00) <sup>ab</sup>   | 11 (36.67) <sup>ab</sup> | 5 (16.68) <sup>ab</sup>  |
| tDCS 组 | 30 | 治疗前    | 10 (33.33)              | 12 (40.00)               | 8 (26.67)                | 0 (0.00)                  | 0 (0.00)                 | 0 (0.00)                 |
|        |    | 治疗 4 周 | 1 (3.33) <sup>ab</sup>  | 6 (20.00) <sup>ab</sup>  | 11 (36.67) <sup>ab</sup> | 9 (30.00) <sup>ab</sup>   | 3 (10.00) <sup>ab</sup>  | 0 (0.00) <sup>ab</sup>   |
|        |    | 治疗 8 周 | 0 (0.00) <sup>ab</sup>  | 2 (6.66) <sup>ab</sup>   | 5 (16.68) <sup>ab</sup>  | 10 (33.33) <sup>ab</sup>  | 10 (33.33) <sup>ab</sup> | 3 (10.00) <sup>ab</sup>  |
| 联合治疗组  | 30 | 治疗前    | 9 (30.00)               | 13 (43.33)               | 8 (26.67)                | 0 (0.00)                  | 0 (0.00)                 | 0 (0.00)                 |
|        |    | 治疗 4 周 | 0 (0.00) <sup>abc</sup> | 3 (10.00) <sup>abc</sup> | 8 (26.67) <sup>abc</sup> | 12 (40.00) <sup>abc</sup> | 4 (13.33) <sup>abc</sup> | 3 (10.00) <sup>abc</sup> |
|        |    | 治疗 8 周 | 0 (0.00) <sup>abc</sup> | 0 (0.00) <sup>abc</sup>  | 2 (6.66) <sup>abc</sup>  | 18 (60.00) <sup>abc</sup> | 5 (16.67) <sup>abc</sup> | 5 (16.67) <sup>abc</sup> |

注：组间比较采用 Kruskal-Wallis H 检验；与本组治疗前比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ ；与对照组同期比较，<sup>b</sup> $P < 0.05$ ；与机器人组和 tDCS 组同期比较，<sup>c</sup> $P < 0.05$

表 6 四组患者 MBI 评分比较 ( $\bar{x} \pm s$ )  
Table 6 Comparison of MBI scores among the four groups of patients ( $\bar{x} \pm s$ )

| 组别     | 例数 | 治疗前          | 治疗 4 周                       | 治疗 8 周                       |
|--------|----|--------------|------------------------------|------------------------------|
| 对照组    | 30 | 42.32 ± 8.51 | 58.62 ± 10.18 <sup>a</sup>   | 71.48 ± 11.76 <sup>a</sup>   |
| 机器人组   | 30 | 43.11 ± 8.72 | 65.75 ± 10.67 <sup>ab</sup>  | 80.27 ± 12.31 <sup>ab</sup>  |
| tDCS 组 | 30 | 42.72 ± 8.57 | 63.85 ± 10.47 <sup>ab</sup>  | 77.84 ± 12.11 <sup>ab</sup>  |
| 联合治疗组  | 30 | 42.86 ± 8.78 | 68.65 ± 11.03 <sup>abc</sup> | 83.57 ± 12.46 <sup>abc</sup> |

注：与本组治疗前比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ ；与对照组同期比较，<sup>b</sup> $P < 0.05$ ；与 tDCS 组同期比较，<sup>c</sup> $P < 0.05$

tDCS 组比较, 差异无统计学意义 ( $P>0.05$ ), 见表 9。

**2.8 不良反应** 在治疗过程中四组均未观察到严重不良反应。tDCS 组和联合治疗组中各有 2 例患者出现轻微头皮刺痛或瘙痒感, 均在治疗结束后自行缓解。机器人组和联合治疗组中各有 1 例患者出现轻微肌肉酸痛, 经适当调整训练强度后症状消失。所有不良反应均未影响治疗的进行。

### 3 讨论

本研究探讨了外骨骼机器人步态训练系统联合 tDCS 对脑梗死患者下肢运动能力及步行能力恢复的疗效。研究结果显示, 相比单一治疗方法, 联合治疗在改善患者下肢运动功能、平衡能力、步行能力、日常生活活动能力和生活质量等方面具有更显著的效果。这种联合治疗

方案可能通过促进神经可塑性, 加速运动功能的恢复, 为脑梗死患者的康复治疗提供了新的思路和临床依据。

首先, 在下肢运动功能方面, 联合治疗组 FMA-LE 评分的改善程度显著高于其他三组。这可能是由于外骨骼机器人步态训练系统提供的高强度、重复性训练与 tDCS 促进大脑皮层可塑性的协同作用<sup>[24-26]</sup>。机器人辅助步态训练可以帮助患者重建正确的步行模式, 激活相关运动神经网络<sup>[27]</sup>, 而 tDCS 则可能通过调节大脑皮层的兴奋性, 增强运动学习和运动控制的恢复<sup>[28]</sup>。外骨骼机器人步态训练系统的作用机制可能包括以下几个方面: ①提供精确、可重复的步态模式, 有助于重塑正确的运动模式; ②通过高强度、高重复次数的训练, 促进神经可塑性; ③提供适当的体重支持, 减轻患者负担, 使其

表 7 四组患者 SS-QOL 总分比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

Table 7 Comparison of SS-QOL total scores among the four groups of patients ( $\bar{x} \pm s$ )

| 组别     | 例数 | 治疗前            | 治疗 4 周                        | 治疗 8 周                        |
|--------|----|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 对照组    | 30 | 123.45 ± 18.65 | 152.84 ± 22.37 <sup>a</sup>   | 178.30 ± 25.62 <sup>a</sup>   |
| 机器人组   | 30 | 124.17 ± 19.08 | 165.68 ± 23.75 <sup>ab</sup>  | 195.64 ± 27.32 <sup>ab</sup>  |
| tDCS 组 | 30 | 123.76 ± 18.88 | 162.87 ± 23.52 <sup>ab</sup>  | 192.38 ± 26.93 <sup>ab</sup>  |
| 联合治疗组  | 30 | 124.03 ± 19.02 | 173.54 ± 24.61 <sup>abc</sup> | 206.82 ± 28.54 <sup>abc</sup> |

注: 与本组治疗前比较, <sup>a</sup> $P<0.05$ ; 与对照组同期比较, <sup>b</sup> $P<0.05$ ; 与机器人组和 tDCS 组同期比较, <sup>c</sup> $P<0.05$

表 8 四组患者 MEP 潜伏期比较 ( $\bar{x} \pm s$ , ms)

Table 8 Comparison of MEP latencies among the four groups of patients ( $\bar{x} \pm s$ , ms)

| 组别     | 例数 | 治疗前          | 治疗 4 周                      | 治疗 8 周                      |
|--------|----|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 对照组    | 30 | 28.72 ± 3.53 | 26.94 ± 3.22 <sup>a</sup>   | 25.33 ± 3.04 <sup>a</sup>   |
| 机器人组   | 30 | 28.94 ± 3.62 | 25.42 ± 3.01 <sup>ab</sup>  | 23.14 ± 2.72 <sup>ab</sup>  |
| tDCS 组 | 30 | 28.75 ± 3.53 | 25.73 ± 3.12 <sup>ab</sup>  | 23.46 ± 2.78 <sup>ab</sup>  |
| 联合治疗组  | 30 | 28.82 ± 3.64 | 24.20 ± 2.91 <sup>abc</sup> | 21.57 ± 2.53 <sup>abc</sup> |

注: 与本组治疗前比较, <sup>a</sup> $P<0.05$ ; 与对照组同期比较, <sup>b</sup> $P<0.05$ ; 与机器人组和 tDCS 组同期比较, <sup>c</sup> $P<0.05$

表 9 四组患者 MEP 波幅比较 ( $\bar{x} \pm s$ ,  $\mu V$ )

Table 9 Comparison of MEP amplitudes among the four groups of patients ( $\bar{x} \pm s$ ,  $\mu V$ )

| 组别     | 例数 | 治疗前            | 治疗 4 周                        | 治疗 8 周                        |
|--------|----|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 对照组    | 30 | 215.57 ± 45.23 | 268.68 ± 53.17 <sup>a</sup>   | 315.44 ± 60.82 <sup>a</sup>   |
| 机器人组   | 30 | 218.32 ± 46.14 | 302.53 ± 57.61 <sup>ab</sup>  | 378.91 ± 68.42 <sup>ab</sup>  |
| tDCS 组 | 30 | 217.21 ± 45.74 | 296.82 ± 56.90 <sup>ab</sup>  | 371.47 ± 67.29 <sup>ab</sup>  |
| 联合治疗组  | 30 | 217.82 ± 46.01 | 325.70 ± 59.83 <sup>abc</sup> | 412.56 ± 71.52 <sup>abc</sup> |

注: 与本组治疗前比较, <sup>a</sup> $P<0.05$ ; 与对照组同期比较, <sup>b</sup> $P<0.05$ ; 与机器人组和 tDCS 组同期比较, <sup>c</sup> $P<0.05$

能够完成更多训练量。tDCS的作用机制可能涉及：①调节皮层神经元的兴奋性；②促进长时程增强和长时程抑制，从而增强神经可塑性；③调节神经递质的释放，如谷氨酸和 $\gamma$ -氨基丁酸的平衡。这两种技术的结合可能产生协同效应，更有效地促进神经重塑和功能恢复。

其次，在平衡功能和步行能力方面，联合治疗组同样表现出更好的改善效果。BBS评分、10MWT结果和FAC评分均支持这一发现。外骨骼机器人步态训练系统可以提供精确的体重支持和步态引导，有助于患者重建平衡感和步行模式<sup>[29]</sup>。同时，tDCS可能通过增强运动皮层的可塑性，促进平衡和步行相关神经网络的重组<sup>[30]</sup>。这种双重作用可能是联合治疗在改善平衡功能和步行能力方面优于单一治疗的原因。我们的研究将这一发现扩展到脑梗死患者群体，并结合tDCS技术，获得了更好的治疗效果。平衡功能和步行能力的改善可能与以下几个因素有关：①机器人辅助训练提供的感觉输入和本体感觉反馈，有助于重建身体平衡感；②tDCS可能增强了与平衡和步行相关的皮质区域的可塑性，如初级运动皮层、补充运动区和前运动皮层；③联合治疗可能促进了皮质脊髓束和皮质网状体束等下行运动通路的重组和功能恢复。未来的研究可以通过功能性神经影像技术，如功能性磁共振成像或弥散张量成像进一步探索这些机制。

在日常生活活动能力方面，虽然联合治疗组的MBI评分显著高于对照组和tDCS组，但与机器人组相比差异并不显著。这可能是由于日常生活活动能力的恢复不仅依赖于下肢功能的改善，还与上肢功能、认知功能等多个因素相关<sup>[31]</sup>。这一结果提示我们，在未来的研究中，可以考虑增加上肢训练和认知训练，以进一步提高患者的日常生活活动能力。

生活质量的改善是康复治疗的重要目标之一。本研究发现，联合治疗组在SS-QOL评分方面显著优于其他三组。这可能是由于联合治疗在改善患者运动功能、日常生活活动能力等方面的综合效果，进而提高了患者的生活质量<sup>[32]</sup>。这一结果强调了全面康复的重要性，不仅要关注身

体功能的恢复，还要注重患者整体生活质量的提升。Aprile I等人<sup>[32]</sup>的研究也发现，机器人辅助步态训练可以改善亚急性期脑卒中患者的临床和步态结果，我们的研究进一步证实了这一点。在神经可塑性指标方面，联合治疗组表现出MEP潜伏期的显著缩短和波幅的显著增加，这反映了皮质脊髓束兴奋性的提高和功能的改善<sup>[33]</sup>。这一结果支持了联合治疗可能通过促进神经可塑性来改善运动功能的假设，为理解联合治疗的作用机制提供了重要的神经生理学证据。

本研究还有一些局限性需要在未来的研究中进一步改进，主要有以下几个方面。①样本量相对较小，未来可以增加样本量以提高研究的统计效力；②随访时间较短，本研究仅观察了8周的治疗效果，未来研究可以延长随访时间，评估长期疗效；③本研究未探讨不同治疗方案的最佳组合方式和剂量，未来可以设计更精细的实验方案，探索最佳的治疗参数和组合方式；④本研究未涉及神经影像学评估，如功能性磁共振成像等，未来研究可以结合神经影像学技术，深入探讨治疗的神经机制；⑤本研究仅关注了下肢功能的恢复，未来可以扩展到上肢功能、认知功能等方面，全面评估联合治疗对脑梗死患者康复的影响。

综上所述，外骨骼机器人步态训练系统联合tDCS能够显著改善脑梗死患者的下肢运动功能、平衡能力、步行能力、日常生活活动能力和生活质量，其效果优于单一治疗方法。这种联合治疗方案可能通过促进神经可塑性，加速了运动功能的恢复。本研究为脑梗死患者的康复治疗提供了新的思路和临床依据，有望在未来的康复实践中得到广泛应用，但仍需进一步的大样本、长期随访研究来验证这一治疗方案的长期效果和安全性。

**利益冲突声明：** 本文不存在任何利益冲突。

**作者贡献声明：** 郑春利负责设计论文框架，起草论文；金岩春、张大伟负责实验操作，研究过程的实施；郑春利、金岩春、张大伟均负责数据收集，统计学分析，绘制图表；金岩春负责论文修改；郑春利、金岩春负责拟定写作思路，指导撰写文章并最终定稿。

## 参考文献

- [1] 王薇, 蔡宾, 刘广志. 脑梗死急性期抗凝治疗研究进展[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2022, 24(3): 335-336.
- [2] GBD 2016 Stroke Collaborators. Global, regional, and national burden of stroke, 1990-2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016[J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(5): 439-458.
- [3] 王贤慧, 周亦, 刘晓蓉, 等. 应用新型抗凝药物预防脑梗死患者的脑微出血进展情况及影响因素研究[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2023, 25(2): 175-178.
- [4] 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): 518-534.
- [5] Calafiore D, Negri F, Tottoli N, et al. Efficacy of robotic exoskeleton for gait rehabilitation in patients with subacute stroke: a systematic review[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2022, 58(1): 1-8.
- [6] Longatelli V, Pedrocchi A, Guanziroli E, et al. Robotic exoskeleton gait training in stroke: An electromyography-based evaluation[J]. *Front Neurobot*, 2021, 15: 733738.
- [7] Karunakaran K K, Gute S, Ames G R, et al. Effect of robotic exoskeleton gait training during acute stroke on functional ambulation[J]. *NeuroRehabilitation*, 2021, 48(4): 493-503.
- [8] Baronchelli F, Zucchella C, Serrao M, et al. The effect of robotic assisted gait training with Lokomat<sup>®</sup> on balance control after stroke: systematic review and Meta-analysis[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 661815.
- [9] Swank C, Sikka S, Driver S, et al. Feasibility of integrating robotic exoskeleton gait training in inpatient rehabilitation[J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2020, 15(4): 409-417.
- [10] Solomons C D, Shanmugasundaram V. Transcranial direct current stimulation: a review of electrode characteristics and materials[J]. *Med Eng Phys*, 2020, 85: 63-74.
- [11] Chase H W, Boudewyn M A, Carter C S, et al. Transcranial direct current stimulation: a roadmap for research, from mechanism of action to clinical implementation[J]. *Mol Psychiatry*, 2020, 25(2): 397-407.
- [12] Elsner B, Kugler J, Pohl M, et al. Transcranial direct current stimulation (tDCS) for improving activities of daily living, and physical and cognitive functioning, in people after stroke[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2020, 11(11): CD009645.
- [13] Kavianejad R, Karimian S M, Riahi E, et al. The neuroprotective effects of transcranial direct current stimulation on global cerebral ischemia and reperfusion via modulating apoptotic pathways[J]. *Brain Res Bull*, 2022, 186: 70-78.
- [14] Salehinejad M A, Ghanavati E, Glinski B, et al. A systematic review of randomized controlled trials on efficacy and safety of transcranial direct current stimulation in major neurodevelopmental disorders: ADHD, autism, and dyslexia[J]. *Brain Behav*, 2022, 12(9): e2724.
- [15] Edwards D J, Cortes M, Rykman-peltz A, et al. Clinical improvement with intensive robot-assisted arm training in chronic stroke is unchanged by supplementary tDCS[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2019, 37(2): 167-180.
- [16] QIU S W, XU Y. Guidelines for acute ischemic stroke treatment[J]. *Neuroscience Bulletin*, 2020, 36(10): 1229-1232.
- [17] BIAN M J, SHEN Y X, HUANG Y J, et al. A non-immersive virtual reality-based intervention to enhance lower-extremity motor function and gait in patients with subacute cerebral infarction: a pilot randomized controlled trial with 1-year follow-up[J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 985700.
- [18] LIU S H, YU H X, WANG Z X, et al. Correlation analysis of balance function with plantar pressure distribution and gait parameters in patients with cerebral infarction in the basal ganglia region[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1099843.
- [19] Cheng D K, Nelson M, Brooks D, et al. Validation of stroke-specific protocols for the 10-meter walk test and 6-minute walk test conducted using 15-meter and 30-meter walkways[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2020, 27(4): 251-261.
- [20] Yi H J, Lee D H, Hong B Y, et al. The long-term functional effect of thrombectomy on patients with middle cerebral artery occlusion who exhibit moderate to severe disability[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2021, 57(5): 509.
- [21] JIA F, ZHAO Y, WANG Z, et al. Effect of graded motor imagery combined with repetitive transcranial magnetic stimulation on upper extremity motor function in stroke patients: a randomized controlled trial[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2024, 105(5): 819-825.
- [22] Rocha L S O, Gama G C B, Rocha R S B, et al. Constraint induced movement therapy increases functionality and quality of life after stroke[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2021, 30(6): 105774.
- [23] LI P P, CHEN C Y, HUANG B Z, et al. Altered excitability of motor neuron pathways after stroke: more than upper motor neuron impairments[J]. *Stroke Vasc Neurol*, 2022, 7(6): 518-526.
- [24] 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.
- [25] Gupta A, Prakash N B, Honavar P R. Gait training with robotic exoskeleton assisted rehabilitation system in patients with incomplete traumatic and non-traumatic spinal cord injury: a pilot study and review of literature[J]. *Ann Indian Acad Neurol*, 2023, 26(Suppl 1): S26-S31.
- [26] Christodoulou V N, Varvarousis D N, Ntritsos G, et al. Robotic assisted and exoskeleton gait training effect in mental health and fatigue of multiple sclerosis patients. A systematic review and a meta-analysis[J]. *Disabil Rehabil*, 2024, 14: 1-12.
- [27] Changcheng C, Li Y R, Chen C T. Assistive mobility control of a robotic hip-knee exoskeleton for gait training[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(13): 5045.
- [28] Boscutti A, Juliana Mendonca De Figueiredo, Dana Razouq, et al. Noninvasive brain stimulation techniques for treatment-resistant depression: transcranial magnetic stimulation and transcranial direct current stimulation[J]. *Psychiatr Clin North Am*, 2023, 46(2): 307-329.
- [29] XIE R M, ZHANG Y L, JIN H N, et al. Effects of soft robotic exoskeleton for gait training on clinical and biomechanical gait outcomes in patients with sub-acute stroke: a randomized controlled pilot study[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1296102.
- [30] Hong-Yu L, Zhi-Jie Z, Juan L, et al. Effects of cerebellar transcranial direct current stimulation in patients with stroke: a systematic review[J]. *Cerebellum*, 2023, 22(5): 973-984.
- [31] LYU Z, LIU F, XIU H, et al. Transcranial direct current stimulation for global cognitive functioning and ability in daily life activities in poststroke cognitive impairment: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2023, 102(11): 965-974.
- [32] Aprile I, Iacovelli C, Goffredo M, et al. Efficacy of end-effector Robot-Assisted Gait Training in subacute stroke patients: clinical and gait outcomes from a pilot bi-centre study[J]. *NeuroRehabilitation*, 2019, 45(2): 201-212.
- [33] Williamson J N, James S A, He D, et al. High-definition transcranial direct current stimulation for upper extremity rehabilitation in moderate-to-severe ischemic stroke: a pilot study[J]. *Front Hum Neurosci*, 2023, 17: 1286238.

收稿日期: 2024-07-11

编辑: 崔明璠