

## 机器人辅助手术治疗脊柱骨折伴脊髓神经损伤的研究进展

吴博宇, 范志海

(苏州大学附属第二医院骨外科 江苏 苏州 215000)

**摘要** 脊柱骨折作为骨科常见创伤之一, 多由直接或间接外力引起, 主要累及脊柱和周围软组织。脊柱骨折后正常生理结构改变, 常导致脊髓神经受损、受压, 且由于椎管内含脆弱神经, 解剖结构复杂, 对于手术精准性要求较高。机器人手术系统拥有自由度较高的机械臂, 术者可利用计算机实时导航跟踪、动态监测进针的精度与安全性, 并能提高穿刺及置钉成功率, 避免二次骨质破坏, 减轻术者工作负荷。同时, 机器人辅助治疗和康复方式在临床治疗中的应用, 可为患者提供持续性神经治疗和康复, 增加患者肌肉活动性, 改善神经损伤情况, 有利于患者肢体功能康复。本研究主要分析机器人辅助手术在脊柱骨折伴脊髓神经损伤中的应用, 旨在为脊柱骨折伴脊髓神经损伤治疗提供指导。

**关键词** 脊柱骨折; 脊髓损伤; 机器人辅助手术

**中图分类号** R608 R687.3 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2024) 02-0194-05

### Research progress of robot-assisted surgery in the treatment of spinal fracture with spinal cord injury

WU Boyu, FAN Zhihai

(Department of Orthopedic Surgery, the Second Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215000, China)

**Abstract** As a kind of common orthopedic injuries, spinal fracture is mostly caused by direct or indirect external forces, mainly involving the spine and surrounding soft tissues. Normal physiological structure changes after spinal fracture can lead to spinal cord injury and compression. Since the vertebral canal is the vertebral column that stores an integral portion of the central nervous system, its anatomical structure is complex and requires high surgical accuracy during surgery. With the high degree of freedom of robot arm in the robotic surgical system, surgeons can use the real-time tracking system to dynamically monitor the insertion of spinal needle accurately and safely. It could also improve the success rate of puncturing and nail placement, avoid secondary bone destruction, and lighten surgeons' work load. Meanwhile, the application of robot-assisted surgery and rehabilitation way in clinical practice could provide patients with continuous neurological treatment and rehabilitation, improve patients' muscle activity and reduce nerve damage, which is conducive to rehabilitation of patients' limb function. The application of robot-assisted surgery in spinal fracture with spinal cord injury was mainly analyzed in this study, hoping to provide guidance for the treatment of spinal fracture with spinal cord injury.

**Key words** Spinal Fracture; Spinal Cord Injury; Robot-assisted Surgery

收稿日期: 2023-11-13 录用日期: 2024-01-15

Received Date: 2023-11-13 Accepted Date: 2024-01-15

基金项目: 苏州市临床重点病种诊疗技术专项项目 (LCZX202205)

Foundation Item: Key Clinical Diseases Diagnosis and Treatment Technology Special Project of Suzhou City (LCZX202205)

通讯作者: 范志海, Email: fanzh2006@163.com

Corresponding Author: FAN Zhihai, Email: fanzh2006@163.com

引用格式: 吴博宇, 范志海. 机器人辅助手术治疗脊柱骨折伴脊髓神经损伤的研究进展 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2024, 5 (2): 194-198.

Citation: WU B Y, FAN Z H. Research progress of robot-assisted surgery in the treatment of spinal fracture with spinal cord injury[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(2): 194-198.

随着现代交通和建筑行业的发展，脊柱骨折发生率越来越高，部分患者伴有脊髓神经损伤，易造成剧烈疼痛<sup>[1]</sup>。脊柱周围毗邻脊髓、神经根，骨折后正常生理结构改变，可导致脊髓神经受损、受压，导致患者出现感觉障碍、运动障碍、大小便失禁等症状，存在较高的致残和致死风险，需要及时采取相应治疗措施<sup>[2]</sup>。临床上用于治疗脊柱骨折伴脊髓神经损伤的方法较多，包括手术复位、药物治疗等，不同治疗方法各有其优劣。根据患者实际情况选择合适的治疗方法，能够更好地发挥疗效，减轻脊柱和脊髓神经损伤<sup>[3]</sup>。但是，由于脊柱血运丰富，椎管内含脆弱神经，解剖结构复杂，对于手术精准性要求较高。机器人手术系统结合了现代计算机技术，拥有较高的安全性及精准性，能够减少对组织结构的损伤，已广泛运用于微创治疗和外科手术规划。目前，作为科技发展背景下的新型康复治疗方式，机器人手术系统在脊柱骨折和脊髓神经受损的治疗和康复中发挥着越来越重要的作用。本研究通过查阅相关文献，对目前机器人辅助手术治疗脊柱骨折伴脊髓神经损伤的应用现状进行综述。

## 1 脊髓神经损伤评估

脊柱骨折伴脊髓神经损伤具有症状复杂、病情发展快等特点，临床上常用的损伤评估手段包括病史采集、体格检查、影像学检查等，其中影像学检查因其无创、准确、直观等优势得到广泛应用<sup>[4]</sup>。X线检查作为最基本的脊柱骨折诊断方法，能够帮助医师观察患者是否存在脊柱骨骼断裂，但对脊髓神经损伤的检出效果较差<sup>[5]</sup>。磁共振成像（Magnetic Resonance Imaging, MRI）检查无需移动患者位置，能够从多个角度、断面扫描患者脊柱，清晰地显示脊髓神经受压和水肿情况，辅助评估脊髓神经损伤，且有利于医师区分可逆性和不可逆性损伤<sup>[6]</sup>。周德明等人<sup>[7]</sup>对60例脊柱骨折患者进行检查，发现相较于X线平片和螺旋CT检查，MRI检查椎体压缩损伤的检出率更高。除影像学检查外，实验室检查也可在一定程度上辅助评估脊髓神经损伤情况。包乾录等人<sup>[8]</sup>在研究中指出，肿瘤坏死因子（TNF- $\alpha$ ）、外周血miR-124表达水平与

创伤性脊柱骨折合并脊髓损伤患者的脊髓损伤程度存在显著相关性。为保障治疗的顺利进行，需要首先评估脊柱骨折伴脊髓神经损伤患者的损伤情况，再根据损伤程度、类型等制定最佳治疗方案。应用影像学检查、实验室检查等均可达到损伤评估目的，临床可根据患者具体情况决定是否采用联合检查进行诊断。

## 2 手术治疗

手术作为治疗脊柱骨折伴脊髓神经损伤的主要方法，能够复位脊柱解剖结构、解除神经压迫，同时增加患者脊柱稳定性，而对于手术时机的选择会直接影响手术治疗效果<sup>[9]</sup>。随着脊髓神经受压时间的延长，脊髓神经水肿、炎症情况呈进行性加重，可能造成永久性神经损伤。因此，临床上多认为脊髓损伤24h内为急性期，需要尽快开展手术治疗<sup>[10]</sup>。早期手术治疗能够迅速实现对伤椎的减压、固定，解除脊髓神经所受机械性压迫，保护患者脊髓神经功能，还能够更好地防止椎体高度丢失，促进患者术后恢复。经亚威等人<sup>[11]</sup>对64例胸腰椎伴脊髓神经损伤患者进行分析，发现相较于择期手术（病情稳定后3~7d），急诊手术（入院6h内）更有利于患者神经功能恢复及患者体感诱发电位波幅、神经感觉评分、神经运动评分等指标的改善。值得注意的是，对于合并其他脏器损伤的患者而言，早期手术可能加重机体应激反应，引发患者微循环障碍，需要等待患者情况稳定后再进行手术治疗。总体而言，早期手术治疗更有利于脊柱骨折伴脊髓神经损伤患者术后恢复，但具体选择何种手术时机，需要结合患者实际情况来考虑。

## 3 机器人辅助手术

### 3.1 机器人手术系统工作原理

机器人手术系统主要由主控台车、光学跟踪系统、机械臂、手术计划和控制软件、配套工具、导航系统及空间标定组件等构成，包括机械臂、主机通信模块、移动平台、连接线缆、控制机箱、稳定支撑系统、电源模块等。空间标定组件包括平面标定专用标定器、三维标定专用标定器；光学跟踪系统包括相机支架、连接线缆、电源、光学跟踪相

机等；配套工具包括机器人跟踪支架、导向器、标记物、患者跟踪支架；主控台车包括计算机系统、机器人控制面板。机器人手术计划与控制软件涉及主控软件，通信模块与手术数据管理，机器人控制与交互模块，三维图像手术规划模块与随动控制模块。

手术机器人以机械臂坐标为世界坐标系，根据不同方向得到 X 线透视图像，并根据手术路径确定手术点，获取手术点世界坐标，然后获取三维图像（三维标定专用标定器）及手术点坐标，控制机械臂精准运动，指向手术路径。借助电磁、可见光、红外线等跟踪器，及时纠正术中偏差，同时做到机器人闭环控制。

**3.2 脊柱手术机器人的应用** 早期骨科手术机器人多用于关节外科手术<sup>[12]</sup>。随着技术不断发展，2001 年逐渐出现可应用于脊柱手术的机器人。2005 年 MBARS 机器人开发后，骨科机器人手术开始从关节外科延伸至脊柱外科<sup>[13-14]</sup>。以色列 Technion 公司在其 MARS 引导系统基础上，研发出了 SpineAssist 系统。该系统可为脊柱椎弓根螺钉置入提供精确的导引，是较早的脊柱骨科手术系统。2011 年，Kantelhardt S R 等人<sup>[15]</sup>通过分析 112 例病例资料与 CT 数据，对传统的开放式、开放式机器人引导下和经皮机器人引导下椎弓根螺钉置入术进行比较，结果表明机器人辅助下微创手术与开放手术的手术效果、手术时间无统计学差异，但较传统开放手术组的置钉准确率提高了 3.1%，且镇痛药物用量减少、住院时间缩短、不良事件发生率降低。一项研究还指出<sup>[16]</sup>，Renaissance 机器人是目前欧盟（EU）和美国 FDA 唯一认证通过的脊柱手术专用机器人，其具备学习曲线平缓、辐射少的特点，可显著提高置钉精准性，现阶段尚未见出现不可逆性神经损伤的情况。

我国脊柱手术机器人的研发起步较晚，但发展较快。2016 年底，“天玑”骨科手术机器人获得了国家药品监督管理局认证<sup>[17]</sup>，并于一年后正式应用于临床。“天玑”骨科手术机器人拥有自由度较高的机械臂，其 3D-C 臂显著优于传统 C 型臂，能够依靠光学示踪器进行导航定位。手术规划输出由导航系统机器人执行，术者可利用计算机实时导航跟踪，设计手术所

需钉棒信息（如螺钉方向、粗细、长度等）。此外，郑州大学医学院研发的无框架脊柱手术机器人，可在椎弓根标准轴位透视引导下，准确地置入导针，经椎弓根轴位引导置针，可实时动态监测进针的精度与安全性，并且操作简单，无需进行各种烦琐的匹配与注册等操作。2019 年的一项研究表明<sup>[18]</sup>，一站对多地 5G 远程控制骨科机器人手术已经开展，目前在操控性及精准性方面已达到国际领先水平。

**3.3 脊柱手术机器人的优势** 吴瑞等人<sup>[19]</sup>提出，后路微创椎弓根钉内固定术中，可能会由于变异、术者经验不足、个体差异等问题造成椎弓根螺钉置入失误风险上升，且置入套管、螺钉后进行位置调整时容易降低螺钉把持力的稳定性。与传统置钉相比，应用 Renaissance 脊柱手术机器人系统能够明显提升螺钉置入准确性和安全性。Devito D P 等人<sup>[20]</sup>的研究表明，应用该系统进行椎弓根螺钉置入，明显优于传统手术，且可以有效地降低术后并发症风险。于笑笙等人<sup>[21]</sup>也证实，机器人辅助脊柱外科手术应用于无神经症状的胸腰段骨折，其置钉准确率为 96.6%，高于传统开放手术，提示机器人辅助置钉成功率较高，且可以减少术中螺钉调整次数，有助于术后恢复。另一项研究结果表明<sup>[22]</sup>，经皮椎体成形术（Percutaneous Vertebroplasty, PVP）可缓解骨质疏松性椎体压缩骨折患者疼痛症状，具有一定临床疗效，但存在学习曲线陡峭、术者工作负荷大、术中射线暴露多等缺陷。而将 Mazor 脊柱机器人应用于 PVP 手术中，可使骨水泥弥散更加均匀，有助于咬合断裂的骨小梁，填充骨折裂隙，形成骨折线界面与骨水泥的嵌合，从而更好地恢复椎体刚度，缓解椎体不对称负荷。机器人辅助手术还能对出口神经根及重要脏器位置进行分析，规划出最佳穿刺路径，从而实现工作通道精准置入，最大程度地降低手术风险，还可以减轻术者工作负荷，避免术者暴露于射线辐射，目前已被广泛运用于脊柱手术。

**3.4 机器人的局限性** 脊柱手术机器人在手术稳定性、精准性方面存在优势，但也存在一定局限性：①脊柱手术机器人手术费用较高，涉及耗材使用、设备维护、术者培训等，不利于

医疗费用控制；②脊柱手术机器人工作空间较大，偏向于工业型机器人，需要占用手术室的较大空间进行布局，容易造成设备间遮挡和碰撞；③机器人手术存在一定学习曲线<sup>[23]</sup>，包括手术步骤、路径规划、三维影像判读等；④机器人辅助操作对于稳定性及精确性要求较高，而不同经验的脊柱外科医生在设计穿刺路径和置钉通道时有所不同，易出现较大误差，影响机器人手术的精确性。

#### 4 康复治疗

脊柱骨折伴脊髓神经损伤的康复治疗措施较多，包括四肢关节活动、感觉刺激、肌力训练等，其目的在于锻炼患者肢体协调性，同时提高神经细胞兴奋性，使其通过轴突再生，尽快实现功能重组<sup>[24]</sup>。外骨骼机器人则能用于脊髓损伤等神经系统疾病造成的下肢运动障碍，可以改善患者神经功能，提高患者生活质量<sup>[25]</sup>。康复治疗也可促进脊柱骨折伴脊髓神经损伤患者的良好预后，但起效速度相对较慢，需要积极督促患者坚持长期康复治疗。

腾明辉等人<sup>[26]</sup>发现在康复训练基础上进行下肢智能康复机器人训练，可以提高患者日常生活活动能力和下肢运动功能，改善患者步行能力和平衡功能。姚嘉欣等人<sup>[27]</sup>研究发现，脊髓神经损伤患者在与机器人互动模式下，患者会有更多的时间、空间动力学参数变异及力矩交互作用表现出来，提示患者和机器人之间的互动能够提高不完全脊髓神经损伤患者的运动学表现。神经受到损伤后，患者的康复预后会受到生理机制等多因素影响，探究神经损伤后的康复治疗方案已成为热点话题。手术机器人在神经康复治疗中的应用功能在不断改进，由于单一的机器人训练难以达到患者的满意度，越来越多的研究者开始研究机器人联合其他康复治疗方式的疗效。向小娜等人<sup>[28]</sup>的研究指出，下肢外骨骼机器人能够提高脊髓损伤患者的步行能力，改善患者下肢力量及独立性，适用于生命体征平稳的患者。上述研究表明，机器人与其他康复治疗方式相结合是脊髓神经受损患者康复治疗的发展趋势。

石芝喜等人<sup>[29]</sup>研究发现，C-D级脊髓损伤

患者存在一定的步行功能障碍，往往是由于屈肌反射、伸肌反射或力量不足、肌痉挛等问题，只能通过助行设备才能实现步行，这可能会影响患者正常步行功能的恢复进程。介入下肢机器人后能够明显改善患者步行能力和日常生活能力，可为C-D级脊髓损伤患者的康复治疗提供新思路。王锋等人<sup>[30]</sup>也指出，脊髓损伤患者伴有行走功能障碍，可能出现体位性低血压、肌肉萎缩、痉挛、疼痛、骨质疏松等一系列并发症，严重影响患者生活质量。Lokomat、ALEX、LOPES等机器人可辅助患者进行步态训练，帮助其实现自主行走，有助于患者下肢运动能力的恢复。ReWalk、EKSO、HAL、Indego等机器人可增加患者康复训练时间，帮助其完成跨越障碍、上下楼梯等轮椅无法完成的任务，辅助其进行远距离行走。大量研究表明<sup>[31-34]</sup>，机器人辅助训练适用于脊髓损伤，其能够加强康复训练，增加总持续时间，对患者步行能力和生活质量的改善具有积极作用。

#### 5 小结

机器人辅助脊柱手术具有精确的路径规划，能够完成更为精准的操作，提高穿刺及置钉成功率，避免二次骨质破坏，并能减少术中射线暴露，降低手术并发症风险，加快患者术后康复进程。随着科学技术的不断进步，骨科手术机器人在脊柱外科中的临床价值日益凸显。此外，机器人辅助训练能够循序渐进地改善患者步行能力，提高其生活质量。这表明骨科手术机器人在脊柱微创手术中优势明显，虽然其目前仍存在手术费用高、术者学习曲线陡峭、术前准备时间长等问题，但随着未来科技的发展及医疗政策的改革，上述问题有望得到解决。骨科手术机器人未来将向更智能、更精巧、更易操作的方向发展，从而为更多患者带来获益。

**利益冲突声明：**本文不存在任何利益冲突。

**作者贡献声明：**①吴博宇负责起草论文，论文修改；②范志海负责指导撰写文章并最后定稿。

#### 参考文献

- [1] Mazzone G L, Coronel M F, Mladinic M, et al. An update to pain management after spinal cord injury: from pharmacology to circRNAs[J]. Rev Neurosci, 2022, 34(6): 599-611.

- [2] Myers M A, Hall S, Wright A, et al. Spinal fractures incurred by sports-related injuries[J]. *World Neurosurg*, 2021. DOI: 10.1016/j.wneu.2021.04.111.
- [3] 冯俊飞, 何江涛. 脊髓圆锥损伤诊断与治疗的进展[J]. *临床骨科杂志*, 2019, 22(6): 758-761.
- [4] Funayama T, Tsukanishi T, Fujii K, et al. Characteristic imaging findings predicting the risk of conservative treatment resistance in fresh osteoporotic vertebral fractures with poor prognostic features on magnetic resonance imaging[J]. *J Orthop Sci*, 2022, 27(2): 579-584.
- [5] LIU B C, GAO Y T, YE K F, et al. Cervical spine fracture prediction by simple plain X-ray in ankylosing spondylitis patients after low-energy trauma[J]. *Orthop Surg*, 2022, 14(11): 2939-2946.
- [6] Poullain F, Champsaur P, Pauly V, et al. Vertebral trabecular bone texture analysis in opportunistic MRI and CT scan can distinguish patients with and without osteoporotic vertebral fracture: a preliminary study[J]. *Eur J Radiol*, 2023. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110642.
- [7] 周德明, 颀奎, 张涛, 等. X线平片、螺旋CT、MRI检查在脊柱骨折临床诊断中的应用价值[J]. *中国医学创新*, 2020, 17(5): 109-112.
- [8] 包乾录, 王力军, 杨豪. 外周血 miR-124 和 TNF- $\alpha$  水平检测对创伤性脊柱骨折合并脊髓损伤的诊断价值[J]. *中国实用医刊*, 2020, 47(11): 54-57.
- [9] Sousa A, Rodrigues C, Barros L, et al. Early versus late spine surgery in severely injured patients-which is the appropriate timing for surgery?[J]. *Global Spine J*, 2021, 12(8): 2192568221989292.
- [10] Ahern D P, McDonnell J, Doinn T Ó, et al. Timing of surgical fixation in traumatic spinal fractures: a systematic review[J]. *The Surgeon*, 2020, 18(1): 37-43.
- [11] 经亚威, 徐继胜, 陈坤峰, 等. 急诊手术与择期手术对胸腰椎骨折伴脊髓神经损伤患者神经功能的影响对比[J]. *四川解剖学杂志*, 2020, 28(4): 83-84.
- [12] Pransky J. ROBODOC-surgical robot success story[J]. *Industrial Robot*, 1997, 24(3): 231-233.
- [13] Wolf A, Jaramaz B, Lisien B, et al. MBARS: mini bone-attached robotic system for joint arthroplasty[J]. *Int J Med Robot*, 2005, 1(2): 101-121.
- [14] 梁国穗, 王军强. 外科机器人的发展历程及临床应用[J]. *中华骨科杂志*, 2006, 26(10): 707-710.
- [15] Kantelhardt S R, Martinez R, Baerwinkel S, et al. Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement[J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(6): 860-868.
- [16] 王亚楠, 刘海军, 邵诗泽, 等. Renaissance 脊柱手术机器人在胸腰椎骨折中的临床应用[J]. *脊柱外科杂志*, 2021, 19(2): 89-93.
- [17] 刘建全, 刘黎军, 黄俊锋, 等. 机器人导航定位系统辅助下经皮空心螺钉内固定治疗股骨颈骨折[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2015, 17(8): 692-698.
- [18] 田伟, 张琦, 李祖昌, 等. 一站对多地 5G 远程控制骨科机器人手术的临床应用[J]. *骨科临床与研究杂志*, 2019, 4(6): 349-354.
- [19] 吴瑞, 周纪平, 杨凯, 等. 脊柱手术机器人在胸腰椎骨折微创手术中的应用[J]. *中国骨伤*, 2022, 35(2): 118-122.
- [20] Devito D P, Kaplan L, Dietl R, et al. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot: retrospective study[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2010, 35(24): 2109-2115.
- [21] 于笑笙, 陈修远, 陈皓, 等. 骨科机器人辅助微创精准手术治疗胸腰段骨折的初步经验[J]. *脊柱外科杂志*, 2020, 18(6): 369-375.
- [22] 郭松, 付强, 杭栋华, 等. Mazor 脊柱机器人辅助改良经皮椎体成形术治疗腰椎骨质疏松性骨折的疗效分析[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2021, 31(9): 818-824.
- [23] 范明星, 刘亚军, 段芳芳, 等. 机器人辅助胸腰椎椎弓根螺钉内固定术的学习曲线和临床意义[J]. *骨科临床与研究杂志*, 2018, 3(4): 213-217.
- [24] Meshkini A, Sarpoolaki M K, Vafaei A, et al. The efficacy of intrathecal methyl-prednisolone for acute spinal cord injury: a pilot study[J]. *Heliyon*, 2023, 9(4): e15548.
- [25] 王侃, 朱泽宇, 朱德生, 等. 外骨骼机器人在下肢运动障碍患者中的临床研究进展[J]. *中华神经科杂志*, 2020, 53(6): 454-459.
- [26] 腾明辉, 郑幼珍, 蒙爱逊. 下肢智能康复机器人联合 PNF 技术在不完全性截瘫脊髓损伤患者中的应用价值研究[J]. *反射疗法与康复医学*, 2022(2): 41-44, 48.
- [27] 姚嘉欣, 李哲. 下肢康复机器人在脊髓损伤康复中的应用[J]. *中国现代医生*, 2020, 58(35): 187-192.
- [28] 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.
- [29] 石芝喜, 蔡朋, 刘明检, 等. 下肢步行机器人对脊髓损伤后日常生活能力及步行能力的影响[J]. *中国康复*, 2018, 33(3): 211-214.
- [30] 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.
- [31] 杨瑞雪, 王佳, 李坚, 等. 机器人辅助步态训练对完全性脊髓损伤患者功能状态、行走和生活质量的影响[J]. *颈腰痛杂志*, 2022, 43(6): 885-887.
- [32] 李勇强, 张霞, 邱怀德, 等. 下肢康复机器人用于治疗中枢神经损伤的研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2023, 38(7): 1012-1016.
- [33] SUN X P, SHI J J, BAO Y, et al. Safety and effectiveness of electromyography-induced rehabilitation treatment after epidural electrical stimulation for spinal cord injury: study protocol for a prospective, randomized, controlled trial[J]. *Neural Regen Res*, 2023, 18(4): 819-824.
- [34] Garc í aAl é n L, Kumru H, CastilloEscario Y, et al. Transcutaneous cervical spinal cord stimulation combined with robotic exoskeleton rehabilitation for the upper limbs in subjects with cervical SCI: clinical trial[J]. *Biomedicine*, 2023, 11(2): 589.

编辑: 刘静凯