

表面肌电图在脊髓损伤康复评估中的应用进展

孙晨曦 刘霖 朱琳 宋为群

100053 北京,首都医科大学宣武医院康复医学科

通信作者:朱琳, Email: linda0858@163.com

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6574.2024.07.011

【摘要】 脊髓损伤是脊柱损伤后最严重的并发症,会导致损伤平面以下出现感觉功能和运动控制功能障碍,尤其是完全性脊髓损伤,其会导致损伤平面以下运动、感觉、括约肌功能完全丧失。表面肌电图作为一种客观、定量的评估工具,已被应用于脊髓损伤患者神经肌肉功能障碍的评定中。本文就表面肌电图在分析脊髓损伤神经肌肉功能的常用参数及脊髓损伤所致肌肉功能障碍临床评估中的应用进行综述,旨在为未来对脊髓损伤患者开展更多临床评估与治疗提供参考。

【关键词】 脊髓损伤; 康复评定; 表面肌电图; 综述

Application progress of surface electromyography in rehabilitation evaluation of spinal cord injury Sun Chenxi, Liu Lin, Zhu Lin, Song Weiqun

Department of Rehabilitation Medicine, Xuanwu Hospital, Capital Medical University, Beijing 100053, China

Corresponding author: Zhu Lin, Email: linda0858@163.com

【Abstract】 Spinal cord injury is the most severe complication of spinal injury, which can lead to sensory and motor control dysfunction below the level of injury, especially complete spinal cord injury, which can result in complete loss of motor, sensory, and sphincter function below the injury plane. Surface electromyography, as an objective and quantitative assessment tool, has been applied in the evaluation of neuromuscular dysfunction in patients with spinal cord injury. This paper reviews the application of surface electromyography in analyzing commonly used parameters of neuromuscular function in spinal cord injury and clinical evaluation of muscle dysfunction caused by spinal cord injury, aiming to provide reference for future clinical evaluation and treatment of spinal cord injury patients.

【Key words】 Spinal cord injuries; Rehabilitation evaluation; Electromyography; Review

- [28] Wen W, Sun C, Chen Z, et al. Alcohol induces zebrafish skeletal muscle atrophy through HMGB1/TLR4/NF- κ B signaling[J]. Life (Basel), 2022, 12(8): 1211. DOI: 10.3390/life12081211.
- [29] Liu S, Wu J, Chen P, et al. TAK-242 ameliorates hepatic fibrosis by regulating the liver-gut axis[J]. Biomed Res Int, 2022, 2022: 4949148. DOI: 10.1155/2022/4949148.
- [30] Matsunaga N, Tsuchimori N, Matsumoto T, et al. TAK-242 (resatorvid), a small-molecule inhibitor of Toll-like receptor (TLR) 4 signaling, binds selectively to TLR4 and interferes with interactions between TLR4 and its adaptor molecules[J]. Mol Pharmacol, 2011, 79(1): 34-41. DOI: 10.1124/mol.110.068064.
- [31] Ono Y, Maejima Y, Saito M, et al. TAK-242, a specific inhibitor of Toll-like receptor 4 signalling, prevents endotoxemia-induced skeletal muscle wasting in mice[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 694. DOI: 10.1038/s41598-020-57714-3.
- [32] Zaafan MA, Zaki HF, El-Brairy AI, et al. Pyrrolidinedithiocarbamate attenuates bleomycin-induced pulmonary fibrosis in rats: modulation of oxidative stress, fibrosis, and inflammatory parameters[J]. Exp Lung Res, 2016, 42(8/10): 408-416. DOI: 10.1080/01902148.2016.1244578.
- [33] Miao C, Lv Y, Zhang W, et al. Pyrrolidine dithiocarbamate (PDTTC) attenuates cancer cachexia by affecting muscle atrophy and fat lipolysis[J]. Front Pharmacol, 2017, 8: 915. DOI: 10.3389/fphar.2017.00915.
- [34] Finkel RS, Finanger E, Vandenborne K, et al. Disease-modifying effects of edasalonexent, an NF- κ B inhibitor, in young boys with Duchenne muscular dystrophy: results of the MoveDMD phase 2 and open label extension trial[J]. Neuromuscul Disord, 2021, 31(5): 385-396. DOI: 10.1016/j.nmd.2021.02.001.
- [35] Zhang GY, Lu D, Duan SF, et al. Hydrogen sulfide alleviates lipopolysaccharide-induced diaphragm dysfunction in rats by reducing apoptosis and inflammation through ROS/MAPK and TLR4/NF- κ B signaling pathways[J]. Oxid Med Cell Longev, 2018, 2018: 9647809. DOI: 10.1155/2018/9647809.

(收稿日期: 2023-12-12)

(本文编辑: 赵金鑫)

数据显示,国内脊髓损伤患者数量呈逐年递增的趋势^[1]。脊髓损伤是脊柱损伤后最严重的并发症,常导致患者损伤平面以下肌肉运动控制障碍、行动困难、二便控制障碍和感觉障碍^[2]。表面肌电图(surface electromyography, sEMG)采用皮肤表面电极,将电极放置在目标肌肉表面,通过对单块、一组或多组肌肉集合性肌电活动的同时记录,采集肌肉活动时的肌电信号。相较于有创的针式肌电图,sEMG更易被患者接受,且其记录电位的面积更大,可通过无线技术实现多场景应用。sEMG可以显示肌肉的激活程度和肌肉的收缩力量,主要适用于康复疗效评价、肌肉运动中疲劳、分析等方面,或用于临床症状学定位,其与传统的临床检查相比,检测目标肌肉运动变化的敏感度更高,更具客观性^[3-5]。目前,临床中对脊髓损伤患者肌肉检查常用的评定量表存在明显的局限,且评定者的主观意识可能影响评定结果。sEMG检测可以客观地量化被测肌肉的功能,弥补传统评定方式的局限性^[6]。在对肌肉存在痉挛的评定中,sEMG可以更加客观、敏感地捕捉到肌张力的变化。已有研究证实,sEMG作为评估患者肌肉痉挛情况的指标优于传统肌张力测试的评定结果^[7]。相较于传统的评定量表,sEMG可以对神经肌肉功能进行定量和定性分析,评估患者康复愈后的进展情况。目前研究中,sEMG被广泛使用,但其不再是对单一肌肉状态进行检查,已经发展到可以与多种设备联合使用以提高检查质量和治疗效果。本文对近年来sEMG在脊髓损伤康复中的临床应用进展综述。

一、脊髓损伤中sEMG的常用分析参数

sEMG评估脊髓损伤分为时域分析和频域分析。

(1)时域分析:时域分析是将肌电信号看作时间的函数,时域参数均可在时间维度方面反映sEMG信号振幅的变化特征,间接反映肌肉的力量大小。脊髓损伤患者常用的sEMG分析时域指标有以下几种。①均方根值:常用于实时反映肌肉的活动状态,其数值变化与肌肉收缩力的大小有关;也可应用于评定患者肌肉的痉挛程度^[8]。②积分肌电值(integrated EMG, IEMG):主要评估肌肉在单位时间内的收缩特性,在肌肉收缩时IEMG信号大小与肌力及肌张力呈正相关^[9]。③平均肌电值(average EMG, AEMG):AEMG意义与均方根值基本相同,主要反映运动下sEMG的输出强度。(2)频域分析:频域分析主要反映sEMG信号在不同频率分量的变化^[10]。脊髓损伤患者常用的sEMG频域分析参数如下。①平均功率频

率(mean power frequency, MPF):MPF是反映信号频率特征的生物物理指标,其高低与外周运动单位动作电位的传导速度、参与活动的运动单位类型及其同步化程度有关。②中位频率:中位频率是指骨骼肌收缩过程中肌纤维放电频率的中间值,主要受肌肉组织中的快、慢肌纤维的组成比例影响。快肌纤维兴奋主要表现为高频放电,慢肌纤维则以低频电位活动为主。频域指标主要用于判定临床活动时肌肉的疲劳度。

二、sEMG在脊髓损伤评估及治疗中的应用

通过sEMG可分析出被测肌肉的激活程度^[11]。在早期应用中,sEMG仅被用于观察患者训练前后的肌电值、肌肉疲劳变化。但目前研究发现,sEMG可以结合下肢康复机器人、脑机接口等时下热门设备对患者进行评估,还可通过内科及药理学等方面的研究为脊髓损伤患者的康复效果提供客观证据。通过使用sEMG评估设备干预后的康复疗效已经成为脊髓损伤临床研究的热点^[12]。以下就目前sEMG在脊髓损伤患者康复中的几个最新临床应用进展(运动训练、机器人外骨骼、肌电生物反馈、非侵入式脑干预、脊髓电刺激、其他)展开综述。

1. sEMG在脊髓损伤患者运动训练评估中的应用:运动训练是指通过传统康复治疗手段采用运动器械如跑步机、等速肌力训练器等方式帮助脊髓损伤患者恢复丧失功能的训练方法。(1)目前,在使用sEMG对不完全性脊髓损伤患者的应用进展研究中,宋希猛等^[13]发现,患者腰背屈伸肌sEMG数值与坐位平衡有显著相关性,可以通过观察腰背屈伸肌的sEMG对称指数来评价患者的坐位平衡参数。在与运动器械相关的研究中,符彩萍等^[14]等应用sEMG观察D级胸腰段脊髓损伤患者竖脊肌训练前后的改变,结果显示,四肢联动训练可以有效促进此类患者躯干运动功能的恢复。陈彦等^[15]在以上研究的基础上,增加了对患者IEMG参数的研究,结果显示,相较于徒手肌力评测,sEMG可以通过量化的方式评估脊髓损伤患者下肢肌力和肌耐力的改变。何泉源等^[16]应用sEMG分析患者训练前后IEMG、中位频率、均方根值的变化,结果显示,功能电刺激联合MOTOmed训练可有效恢复患者运动功能。(2)在应用sEMG对完全性脊髓损伤患者运动训练的研究中,王一吉等^[17]应用sEMG对胸11节段脊髓损伤患者躯干肌进行研究,结果显示,提高胸段损伤患者损伤平面以上躯干肌肌肉利用率有助于患者完成步行代偿。唐烁等^[18]通过分析颈胸段脊髓损伤患者

胸锁乳突肌及斜角肌均方根值的研究发现,肺功能联合康复疗法可有效提升颈胸段完全性脊髓损伤患者的生活质量。综上所述,在对脊髓损伤患者运动训练疗效的评估中,sEMG现阶段已经可以完成对患者平衡功能及评估训练设备效果的联合应用。在对完全性脊髓损伤的研究中,徒手肌力评定在短时间内不能评估患者下肢的肌肉改变,但通过sEMG可以观察患者的恢复迹象。这为脊髓损伤患者运动训练的研究提供了重要的实证数据。

2. sEMG在脊髓损伤患者穿戴机器人外骨骼的应用:机器人外骨骼可以帮助脊髓损伤患者重建步行功能。目前的研究中,sEMG已被用于观察患者外骨骼训练中对肌肉的控制情况。在对上肢外骨骼的研究中,Lu等^[19]应用sEMG研究了脊髓损伤患者的手部运动模式意图,并证实应用sEMG信号识别并实时控制机械外骨骼手的可行性。在对下肢外骨骼的研究中,雷俊芳和汤继芹^[20]提出应将下肢康复机器人与肌电设备共同应用于脊髓损伤患者的研究中,以提供更充分的证据。Alamro等^[21]应用sEMG观察胸段运动完全性脊髓损伤患者躯干肌的研究发现,相较于使用LOKOMAT机器人,使用EKSO机器人外骨骼在地面辅助行走,可以更有效地激发躯干肌的活动,并改善姿势的稳定性。除了外骨骼本身给患者带来的运动改变外,患者的自身参与程度也是影响sEMG振幅的原因之一。Sylos-Labini等^[22]通过观察sEMG振幅也得出了以上结论。脊髓损伤患者在穿戴外骨骼行走时,sEMG显示上肢活动幅度明显大于下肢,出现这一状况可能与患者穿戴外骨骼行走时上肢肌肉代偿有关。综上所述,sEMG已被应用到分析脊髓损伤患者在外骨骼运动状态的研究中,并可通过分析患者不同程度的恢复状态选用最适合的外骨骼装置进行训练。

3. sEMG生物反馈疗法在治疗与评估脊髓损伤患者中的应用:sEMG生物反馈疗法是一种在治疗过程中集合采集、反馈患者神经肌肉状态及评估于一体的治疗方法,通过传感器将采集到的肌电信号放大后转换成患者能够认知的信号,直观反馈给患者,从而达到训练患者失去控制的肌肉运动或关节运动的效果。裴少保等^[23]通过对老年脊髓损伤患者使用生物反馈疗法观察sEMG值,发现生物反馈疗法配合康复训练可有效改善老年脊髓损伤患者的脊柱神经功能和生活质量。方芳等^[24]对不完全性脊髓损伤患者使用肌电生物反馈联合高压氧治疗方法,通过观察sEMG值发现,治疗4、8周后,通过肌

电生物反馈联合高压氧治疗的患者,其恢复情况优于传统康复组患者,说明此方法对不完全性脊髓损伤患者起到了显著的恢复作用。Guo等^[25]的研究结果也支持上述观点,并发现sEMG可在肢体动作发生之前精确量化单个肌肉肌力的变化,与传统康复训练相比,sEMG生物反馈疗法产生了更显著的恢复作用。在后续的研究中,杜宁等^[26]将sEMG生物反馈疗法应用于踝背伸功能障碍患者的治疗,通过sEMG波幅证实sEMG生物反馈疗法对脊髓损伤患者胫前肌恢复有促进作用。俞兵等^[27]在研究脊髓损伤步态参数中观察sEMG数值得出,肌电生物反馈疗法联合康复训练可以使患者更大程度地取得肌力、行走能力的恢复。综上所述,目前sEMG生物反馈疗法逐渐与各种康复设备联合应用到脊髓损伤患者日常生活和步态等的研究及评估中,并取得显著疗效,其可作为一种有效促进脊髓损伤患者功能恢复的方法。

4. sEMG在脊髓损伤患者脑功能调控中的应用:脊髓损伤后脑可发生神经可塑性改变,而基于神经可塑性原理的非侵入性脑刺激有望帮助患者更好地恢复神经功能^[28]。非侵入性刺激具有安全、无创等优点,如经颅磁刺激、经颅直流电刺激。目前,sEMG常被用于确定刺激强度,并观察患者治疗前后的改变。Wincek等^[29]采用经颅磁刺激治疗颈段和上胸段不完全性脊髓损伤患者的研究中,通过分析sEMG振幅发现,经颅磁刺激治疗可以有效降低脊髓损伤患者肌肉的痉挛程度和改善肌肉活动。Murray等^[30]应用经颅直流电刺激干预疗法激活了慢性脊髓损伤患者皮质脊髓束的兴奋性并增加其运动诱发电位,但研究者使用3种方法观察到的sEMG均方根值并没有改变。另一种为脑机接口治疗方式,Donati等^[31]应用sEMG评估胸段完全性脊髓损伤患者损伤平面下臀大肌、股骨近端肌肉的改善程度,在进行脑机接口联合运动康复训练后7个月,sEMG显示,所有患者均开始出现运动功能恢复的迹象,患者能够主动控制至少1块损伤平面以下的肌肉。训练12个月后,患者可以选择性地控制肌肉。分析sEMG数值得出,胸段完全性脊髓损伤患者损伤肌肉存在恢复的可能性。此外,Pinheiro等^[32]也为脊髓损伤患者提供了新的恢复策略。通过对放置在耳廓肌肉的sEMG信号联合面部训练,再通过人机接口记录和解码,并移动电脑屏幕中的光标,解码被测者控制外部设备的运动意图,使脊髓损伤患者控制轮椅或神经机器人进行移动。sEMG的技术加入

更进一步证明了脑功能调控对脊髓损伤患者的恢复效果,尤其对于完全性脊髓损伤患者。

5. sEMG在脊髓电刺激治疗中的应用:随着科学技术的发展,通过脊髓电刺激改善脊髓损伤患者的肌肉功能受到广泛关注。脊髓电刺激是一种有创刺激方式,是指将电极植入椎管内,应用有一定通断的脉冲电流刺激脊髓治疗疾病的方法。目前,sEMG也逐渐被用于观察脊髓电刺激前后脊髓损伤患者肌肉主动控制的变化。Hofstoetter等^[33]给予脊髓损伤患者经皮脊髓刺激干预治疗,与刺激前比较,sEMG振幅刺激后明显减小,提示脊髓电刺激能降低脊髓损伤患者的肌肉痉挛程度。Sayenko等^[34]的研究发现,通过硬膜外电刺激完全性脊髓损伤患者,患者主动控制肌肉的sEMG振幅发生了明显变化,表明硬膜外电刺激有助于完全性脊髓损伤患者肌肉功能的恢复。Peña Pino等^[35]应用sEMG观察硬膜外刺激对完全性脊髓损伤患者双下肢肌肉的影响,发现通过一段时间的刺激后患者在无须主动刺激的情况下出现了运动恢复的迹象。这一研究也进一步证明了完全性脊髓损伤患者存在着运动恢复的可能。sEMG目前不仅用于评价肌肉功能,还可通过观察数值帮助确定刺激强度,进而对脊髓损伤患者进行治疗。

6. sEMG在脊髓损伤其他方面的应用:研究表明,sEMG在脊髓损伤其他方面也有应用,如沈以昕等^[36]通过采集患者上肢sEMG数据,分别对高(T₁~T₉)、低(T₁₀~L₃)节段脊髓损伤患者在轮椅推进过程中肩关节负荷进行了分析,结果显示,肌肉疲劳可能是高节段脊髓损伤患者肩痛高发的主要原因。在脊髓损伤患者药理学研究中,sEMG还被用于观察给药后患者的变化。Vaquero等^[37]对脊髓损伤患者进行干细胞治疗,通过sEMG证实了44%的受试者在治疗中出现了肌肉主动控制的改善。sEMG还可协助医生和治疗师评估脊髓损伤患者盆底肌及肠功能障碍。丛芳等^[38]的研究表明,sEMG数值的高低与脊髓损伤肠功能问卷、ASIA分级和Glazer评估中各个收缩阶段肛门括约肌肌力之间存在相关性,sEMG对于反映盆底肌痉挛程度具有特别重要的参考意义,但肛门括约肌的sEMG数值大小与脊髓损伤患者二便控制障碍之间的关系还需要进一步研究。在sEMG与上肢康复设备联合应用中,Besio等^[39]利用检查颈段脊髓损伤患者腕伸肌的sEMG信号控制功能电刺激的刺激强度,以此改变患者抓握强度。

三、sEMG在临床应用中的局限性

sEMG在临床应用中也存在着局限性。有研究表明,大部分临床工作者表示在专业课程中接受的sEMG系统使用培训较少^[40]。Merletti等^[41]提出sEMG在应用中缺乏国际标准,在技术水平、文化教育、实验规模、经济方面存在障碍。

针对以上的使用障碍内容,Campanini等^[11]提出了改进建议:(1)增加专业人员的技术培养;(2)临床和研究之间的双向交流;使用专家编写的教科书和手册如“SENIAM”;为研究者提供资金,在大规模的临床试验中证明sEMG的临床意义;增加研究者的资金提供。通过以上方法改善sEMG存在的临床局限性,以此改善sEMG的临床使用效率。

四、总结与展望

在脊髓损伤患者的康复过程中,sEMG具有显著的应用价值。最初,sEMG主要用于评估脊髓损伤患者的肌肉强度。然而,随着研究的不断深入,sEMG的应用范围得到了进一步的扩展,并能与多种设备及多学科结合开展临床研究。sEMG可以评估患者的康复进展,为调整康复计划提供参考,从而促进患者运动功能的恢复。随着脊髓损伤患者数量的不断增加以及对功能障碍评定方法的重视程度不断提高,尤其是完全性脊髓损伤患者,sEMG越来越多地应用于临床研究中。完全性脊髓损伤即损伤平面以下患者的运动、感觉完全丧失,但目前学者通过sEMG观察到完全性脊髓损伤患者恢复的可能性,积极应用sEMG评估在脊髓损伤患者康复治疗中显得尤为重要。随着技术的进步和研究的多元化,在未来对脊髓损伤患者的研究中,应用sEMG与多种设备结合进行研究已经成为热门趋势。目前,针对不完全性脊髓损伤患者恢复进展的研究已受到广泛关注,但与完全性脊髓损伤患者相关的大规模临床研究还存在探索的潜力。这些发现为未来研究脊髓损伤患者神经肌肉恢复水平以及量化康复进展提供了研究方向,sEMG可以为临床提供依据,并根据不同患者的具体情况进行评估并开展针对性的训练。

利益冲突 文章所有作者共同认可文章无相关利益冲突

作者贡献声明 文章设计、论文撰写、数据搜集、文献调研与整理、论文修订为孙晨曦、刘霖、宋为群,文章修改、质量控制及审校为孙晨曦、朱琳、宋为群

参 考 文 献

- [1] 王超宇,亢毅,娄永富,等.多中心创伤性颈脊髓损伤流行病学分析[J].中国脊柱脊髓杂志,2023,33(5):408-416. DOI:10.3969/j.issn.1004-406X.2023.05.05.

- Wang CY, Kang Y, Lou YF, et al. Multicenter epidemiological analysis of traumatic cervical spinal cord injury[J]. Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2023, 33(5): 408-416.
- [2] Balbinot G, Joner Wiest M, Li G, et al. The use of surface EMG in neurorehabilitation following traumatic spinal cord injury: a scoping review[J]. Clin Neurophysiol, 2022, 138: 61-73. DOI: 10.1016/j.clinph.2022.02.028.
- [3] 孙利, 刘兴洲, 黄光. 表面肌电图在局灶性癫痫双侧强直发作中的定侧价值[J]. 神经疾病与精神卫生, 2017, 17(7): 483-487. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6574.2017.07.007.
- Sun L, Liu XZ, Huang G. Lateralizing value of surface electromyography in bilateral seizures of focal epilepsy[J]. Journal of Neuroscience and Mental Health, 2017, 17(7): 483-487.
- [4] Tamburella F, Scivoletto G, Cosentino E, et al. Walking in water and on land after an incomplete spinal cord injury[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2013, 92(10 Suppl 2): e4-e15. DOI: 10.1097/PHM.0b013e3182a1e6c3.
- [5] Saito H, Yamanaka M, Kasahara S, et al. Relationship between improvements in motor performance and changes in anticipatory postural adjustments during whole-body reaching training[J]. Hum Mov Sci, 2014, 37: 69-86. DOI: 10.1016/j.humov.2014.07.001.
- [6] Noreau L, Vachon J. Comparison of three methods to assess muscular strength in individuals with spinal cord injury[J]. Spinal Cord, 1998, 36(10): 716-723. DOI: 10.1038/sj.sc.3100646.
- [7] Sherwood AM, Graves DE, Priebe MM. Altered motor control and spasticity after spinal cord injury: subjective and objective assessment[J]. J Rehabil Res Dev, 2000, 37(1): 41-52.
- [8] 李雪萍, 陈安亮, 周俊, 等. 完全性脊髓损伤后肠道功能障碍患者盆底肌表面肌电特征的研究[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2008, 30(12): 816-818. DOI: 10.3321/j.issn: 0254-1424.2008.12.008.
- Li XP, Chen AL, Zhou J, et al. Study of surface electromyographic signal features of pelvic floor muscles in patients with complete spinal cord injury[J]. Chin J Phys Med Rehabil, 2008, 30(12): 816-818.
- [9] Onishi H, Yagi R, Akasaka K, et al. Relationship between EMG signals and force in human vastus lateralis muscle using multiple bipolar wire electrodes[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2000, 10(1): 59-67. DOI: 10.1016/s1050-6411(99)00020-6.
- [10] 李建华, 王健. 表面肌电图诊断技术临床应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2015.
- [11] Campanini I, Disselhorst-Klug C, Rymer WZ, et al. Surface EMG in clinical assessment and neurorehabilitation: barriers limiting its use[J]. Front Neurol, 2020, 11: 934. DOI: 10.3389/fneur.2020.00934.
- [12] Balbinot G, Joner Wiest M, Li G, et al. The use of surface EMG in neurorehabilitation following traumatic spinal cord injury: a scoping review[J]. Clin Neurophysiol, 2022, 138: 61-73. DOI: 10.1016/j.clinph.2022.02.028.
- [13] 宋希猛, 张卫红, 史国栋. 不完全性脊髓损伤患者腰背屈伸肌表面肌电与坐位平衡的关系[J]. 颈腰痛杂志, 2023, 44(2): 274-276. DOI: 10.3969/j.issn.1005-7234.2023.02.039.
- Song XM, Zhang WH, Shi GD. Relationship between electromyography and sitting balance on the surface of the lumbar dorsiflexor extensor muscles in patients with incomplete spinal cord injury[J]. The Journal of Cervicodynia and Lumbodynia, 2023, 44(2): 274-276.
- [14] 符彩萍, 吴家欣, 张军, 等. 四肢联动训练对SCI患者躯体功能及心理控制源的影响[J]. 中国康复, 2022, 37(4): 223-227. DOI: 10.3870/zgkf.2022.04.007.
- Fu CP, Wu JX, Zhang J, et al. Effects of linkage training of limbs on physical function and locus of control in patients with spinal cord injury[J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2022, 37(4): 223-227.
- [15] 陈彦, 吴霜, 王志涛, 等. 表面肌电联合等速肌力测试用于不完全腰髓损伤患者的精准评估研究[J]. 中国康复, 2018, 33(1): 15-18. DOI: 10.3870/zgkf.2018.01.004.
- Chen Y, Wu S, Wang ZT, et al. Surface electromyography combined with isokinetic muscle test for accurate evaluation of patients with incomplete lumbar spinal cord injury[J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2018, 33(1): 15-18.
- [16] 何泉源, 段智霞, 马民. 多通道功能性电刺激联合MOTomed运动训练系统在外伤性脊髓损伤运动功能障碍患者中的应用[J]. 医药论坛杂志, 2021, 42(23): 100-103.
- He QY, Duan ZX, Ma M. Application of multi-channel functional electrical stimulation combined with MOTomed exercise training system in patients with motor dysfunction of traumatic spinal cord injury[J]. Journal of Medical Forum, 2021, 42(23): 100-103.
- [17] 王一吉, 李建军, 周红俊, 等. 脊髓损伤患者与健康人步行时躯干肌肉利用率的对照研究[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2016, 38(1): 19-23. DOI: 10.3760/ema.j.issn.0254-1424.2016.01.004.
- Wang YJ, Li JJ, Zhou HJ, et al. Trunk muscle utilization during walking after spinal cord injury[J]. Chin J Phys Med Rehabil, 2016, 38(1): 19-23.
- [18] 唐烁, 王先斌, 陈源, 等. 肺康复联合训练对颈胸段脊髓损伤患者的临床效果[J]. 贵州医科大学学报, 2021, 46(11): 1321-1326, 1332. DOI: 10.19367/j.cnki.2096-8388.2021.11.013
- Tang S, Wang XB, Chen Y, et al. Clinical effect of lung rehabilitation combined training in patients with cervicothoracic spinal cord injury[J]. Journal of GUI ZHOU medical university, 2021, 46(11): 1321-1326, 1332.
- [19] Lu Z, Stampas A, Francisco GE, et al. Offline and online myoelectric pattern recognition analysis and real-time control of a robotic hand after spinal cord injury[J]. J Neural Eng, 2019, 16(3): 036018. DOI: 10.1088/1741-2552/ab0cf0.
- [20] 雷俊芳, 汤继芹. 下肢康复机器人对脊髓损伤患者步行能力改善的现状及应用[J]. 医学信息, 2022, 35(19): 159-162. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1959.2022.19.046.
- Lei JF, Tang JQ. Current status and application of lower limb rehabilitation robot in improving walking ability of patients with spinal cord injury[J]. Journal of Medical information, 2022, 35(19): 159-162.
- [21] Alamro RA, Chisholm AE, Williams A, et al. Overground walking with a robotic exoskeleton elicits trunk muscle activity in people with high-thoracic motor-complete spinal cord injury[J]. J Neuroeng Rehabil, 2018, 15(1): 109. DOI: 10.1186/s12984-018-0453-0.
- [22] Sylos-Labini F, La Scaleia V, d'Avella A, et al. EMG patterns during assisted walking in the exoskeleton[J]. Front Hum Neurosci, 2014, 8: 423. DOI: 10.3389/fnhum.2014.00423.

- [23] 裴少保, 尹宗生, 张之栋, 等. 生物反馈疗法联合功能康复训练对老年脊髓损伤患者脊柱功能、神经功能和生活质量的影响[J]. 中国老年学杂志, 2022, 42(7): 1694-1696. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9202.2022.07.046.
Pei SB, Yin ZS, Zhang ZD, et al. Effect of biofeedback therapy combined with functional rehabilitation training on spinal function, neurological function and quality of life in elderly patients with spinal cord injury[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2022, 42(7): 1694-1696.
- [24] 方芳, 赵继华, 封亚平, 等. 生物反馈疗法联合高压氧对不完全性脊髓损伤患者康复效果的分析[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2019, 11(8): 69-73. DOI: 10.12037/YXQY.2019.08-13.
Fang F, Zhao JH, Feng YP, et al. Analysis of rehabilitation effect of biofeedback therapy combined with hyperbaric oxygen on patients with incomplete spinal cord injury[J]. Chinese Journal of the Frontiers of Medical Science (Electronic Version), 2019, 11(8): 69-73.
- [25] Guo Y, Gao F, Li J, et al. Effect of electromyographic biofeedback training on motor function of quadriceps femoris in patients with incomplete spinal cord injury: a randomized controlled trial[J]. NeuroRehabilitation, 2021, 48(3): 345-351. DOI: 10.3233/NRE-201647.
- [26] 杜宁, 崔松子, 王自强, 等. 表面肌电联合生物反馈在脊髓损伤踝背伸功能康复中的应用[J]. 中国康复医学杂志, 2018, 33(10): 1188-1189, 1230. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2018.10.011.
Du N, Cui SZ, Wang ZQ, et al. Application of surface electromyography combined with biofeedback in the rehabilitation of ankle dorsal extension function of spinal cord injury[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2018, 33(10): 1188-1189, 1230.
- [27] 俞兵, 周涛, 吴健, 等. 肌电生物反馈联合康复训练对不完全性脊髓损伤下肢肌力及步态的影响[J]. 临床骨科杂志, 2020, 23(5): 618-621. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0287.2020.05.004.
Yu B, Zhou T, Wu J, et al. Effects of electromyography biofeedback combined with rehabilitation training on lower limb muscle strength and gait in patients with incomplete spinal cord injury[J]. Journal of Clinical Orthopaedics, 2020, 23(5): 618-621.
- [28] 王豪楠, 李霖荣, 陈倩, 等. 非侵入性脑刺激技术在脊髓损伤相关并发症治疗中的应用进展[J]. 山东医药, 2022, 62(35): 89-93. DOI: 10.3969/j.issn.1002-266X.2022.35.022.
Wang HN, Li LR, Chen Q, et al. Advances in the use of non-invasive brain stimulation techniques in the treatment of spinal cord injury-related complications[J]. Shandong Medical Journal, 2022, 62(35): 89-93.
- [29] Wincek A, Huber J, Leszczyńska K, et al. The long-term effect of treatment using the transcranial magnetic stimulation rTMS in patients after incomplete cervical or thoracic spinal cord injury[J]. J Clin Med, 2021, 10(13): 2975. DOI: 10.3390/jcm10132975.
- [30] Murray LM, Edwards DJ, Ruffini G, et al. Intensity dependent effects of transcranial direct current stimulation on corticospinal excitability in chronic spinal cord injury[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2015, 96(4 Suppl): S114-121. DOI: 10.1016/j.apmr.2014.11.004.
- [31] Donati AR, Shokur S, Morya E, et al. Long-term training with a brain-machine interface-based gait protocol induces partial neurological recovery in paraplegic patients[J]. Sci Rep, 2016, 6: 30383. DOI: 10.1038/srep30383.
- [32] Pinheiro D, Faber J, Micera S, et al. Human-machine interface for two-dimensional steering control with the auricular muscles[J]. Front Neurobot, 2023, 17: 1154427. DOI: 10.3389/fnbot.2023.1154427.
- [33] Hofstoetter US, Freundl B, Danner SM, et al. Transcutaneous spinal cord stimulation induces temporary attenuation of spasticity in individuals with spinal cord injury[J]. J Neurotrauma, 2020, 37(3): 481-493. DOI: 10.1089/neu.2019.6588.
- [34] Sayenko DG, Angeli C, Harkema SJ, et al. Neuromodulation of evoked muscle potentials induced by epidural spinal-cord stimulation in paralyzed individuals[J]. J Neurophysiol, 2014, 111(5): 1088-1099. DOI: 10.1152/jn.00489.2013.
- [35] Peña Pino I, Hoover C, Venkatesh S, et al. Long-term spinal cord stimulation after chronic complete spinal cord injury enables volitional movement in the absence of stimulation[J]. Front Syst Neurosci, 2020, 14: 35. DOI: 10.3389/fnsys.2020.00035.
- [36] 沈以昕, 齐燕, 解海霞, 等. 高低节段脊髓损伤截瘫患者轮椅推进的生物力学特征[J]. 应用力学学报, 2022, 39(4): 797-806. DOI: 10.11776/j.issn.1000-4939.2022.04.023.
Shen YX, Qi Y, Xie HX, et al. Biomechanical characteristics of paraplegia individuals with high or low level spinal cord injury on during manual wheelchair propulsion[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(4): 797-806.
- [37] Vaquero J, Zurita M, Rico MA, et al. Intrathecal administration of autologous mesenchymal stromal cells for spinal cord injury: safety and efficacy of the 100/3 guideline[J]. Cytotherapy, 2018, 20(6): 806-819. DOI: 10.1016/j.jcyt.2018.03.032.
- [38] 丛芳, 李建军, 周红俊, 等. Glazer盆底表面肌电评估方案在脊髓损伤患者中的应用[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2012, 34(3): 201-205. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2012.03.012.
Cong F, Li JJ, Zhou HJ, et al. Application of the Glazer pelvic floor muscle evaluation protocol to patients with spinal cord injury[J]. Chin J Phys Med Rehabil, 2012, 34(3): 201-205.
- [39] Besio W, Tarjan P, Tepavac D, et al. Command generation for FES enhanced grasping in persons with cervical spinal cord injury utilizing surface EMG[EB/OL]. (2022-08-17) [2023-08-23]. https://web.uri.edu/wp-content/uploads/sites/1839/Besio_BSI99.pdf.
- [40] Feldner HA, Howell D, Kelly VE, et al. "Look, Your Muscles Are Firing!": a qualitative study of clinician perspectives on the use of surface electromyography in neurorehabilitation[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2019, 100(4): 663-675. DOI: 10.1016/j.apmr.2018.09.120.
- [41] Merletti R, Campanini I, Rymer WZ, et al. Editorial: surface electromyography: barriers limiting widespread use of sEMG in clinical assessment and neurorehabilitation[J]. Front Neurol, 2021, 12: 642257. DOI: 10.3389/fneur.2021.642257.

(收稿日期: 2023-08-28)

(本文编辑: 赵金鑫)