



电子、语音版

·综述·

## 脑机接口联合电刺激用于脊髓损伤后康复治疗的研究进展

肖硕勤<sup>1</sup>, 贾贵军<sup>2</sup>

1. 山西医科大学附属山西省人民医院全科医疗科, 山西 太原 030012
2. 山西医科大学附属山西省人民医院神经外科, 山西 太原 030012

**摘要:** 脊髓损伤(SCI)是一种低发病率、高致残性的疾病。基于中枢神经系统在运动技能的获得、保留和巩固过程中自我重组的能力,SCI后干预的重点主要在于运动功能恢复(包括行走能力和肢体功能)、功能性神经康复和生活质量的改善。脑机接口(BCI)和电刺激技术单独用于SCI后都有不错的研究进展。该文涉及这些先进技术的整合,其中可植入的BCI提供了具有增加空间分辨率的神经记录能力,并且已经将复杂的神经解码算法和能力越来越强的电刺激技术相结合,以推进朝着更好改善SCI患者预后的方向努力,同时为后续的研究提供一定参考和理论支持。

**关键词:** 脊髓损伤;脑机接口;脑-脊髓接口;功能性电刺激治疗;神经可塑性

中图分类号:R744

DOI:10.16636/j.cnki.jinn.1673-2642.2025.03.010

### Research advances in brain-computer interfaces combined with electrical stimulation in rehabilitation treatment after spinal cord injury

XIAO Shuoqin<sup>1</sup>, JIA Guijun<sup>2</sup>

1. Department of General Medicine, Shanxi People's Hospital Affiliated to Shanxi Medical University, Taiyuan, Shanxi 030012, China

2. Department of Neurosurgery, Shanxi People's Hospital Affiliated to Shanxi Medical University, Taiyuan, Shanxi 030012, China

Corresponding author: JIA Guijun, Email: niuniujia2@163.com

**Abstract:** Spinal cord injury (SCI) is a condition with a low incidence rate and a high disability rate. Based on the ability of the central nervous system to reorganize itself during the acquisition, retention, and consolidation of motor skills, post-SCI interventions mainly focus on the recovery of motor function (including walking ability and limb function), functional neurological rehabilitation, and the improvement of quality of life. Both brain-computer interfaces (BCI) and electrical stimulation techniques have achieved great advances when used alone after SCI. This article discusses the integration of these advanced techniques; implantable BCI provide neural recording capabilities with increased spatial resolution and have combined complex neural decoding algorithms with increasingly powerful electrical stimulation techniques, in order to better improve the prognosis of SCI patients and provide a certain reference and theoretical support for subsequent research.

**Keywords:** spinal cord injury; brain-computer interfaces; brain-spinal interface; functional electrical stimulation therapy; neural plasticity

脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)是一种高度致残性疾病,每年全球约有1.8万例新发患者,因为识别标准的

差异性,高收入国家报告的发病率范围为每百万居民12.1~57.8例,低收入国家为12.7~29.7例<sup>[1-2]</sup>。SCI后会

基金项目:山西省卫生健康委员会医学重点攻关专项基金(2021XM26)。

收稿日期:2024-11-17;修回日期:2025-04-09

作者简介:肖硕勤(1997—),男,医师,硕士研究生,主要研究方向为神经外科脊柱脊髓;Email:2924708364@qq.com。

通信作者:贾贵军(1973—),男,主任医师,硕士学位,主要从事神经外科脊髓脊柱常见病及疑难病的诊治;Email:niuniujia2@163.com。

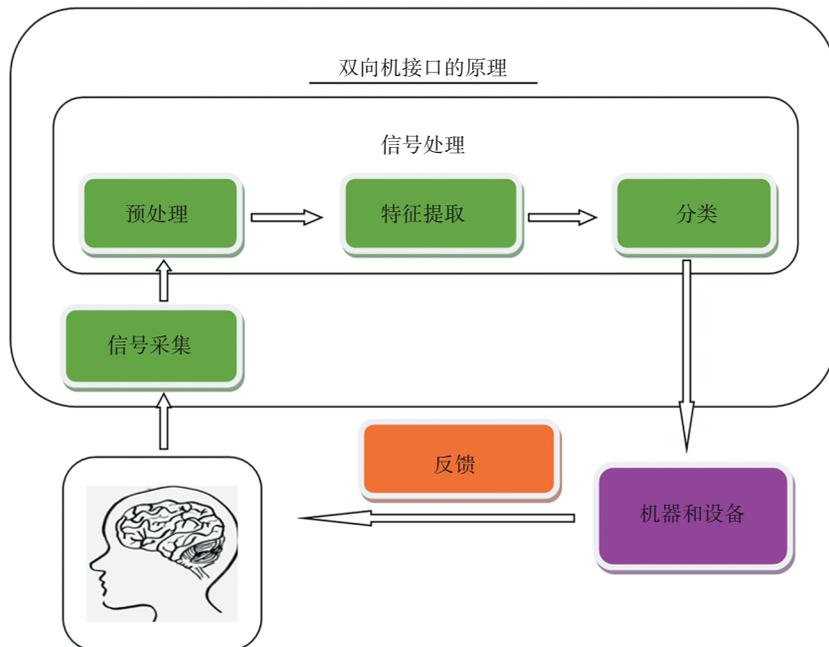
导致不同程度的神经元和神经胶质细胞坏死、凋亡、轴突断裂、脱髓鞘、神经胶质疤痕形成、神经传递受损和炎症等病理改变。同时伴有肌痉挛、慢性疼痛、自主神经功能障碍、心理障碍等临床并发症<sup>[3-4]</sup>,造成了家庭及社会的重大负担。

### 1 脑机接口技术在SCI后的应用

#### 1.1 原理和步骤

脑机接口(brain-computer interfaces, BCI)是一种将中枢神经系统脑电信号转换为外部或内部设备的命令信号的系统<sup>[5]</sup>。自1924年首次发现可以从头皮测量人脑的电信号,之后不断发展归类成为脑电波类型,同时将与脑电波类型相关的精神状态也已确定<sup>[6]</sup>。BCI的基本结构

包括信号采集、预处理、特征提取、分类和设备控制。信号采集为连接大脑和计算机以及从信号中收集知识铺平了道路,预处理、特征提取和分类负责保证相关信号的可靠性。最后,通过设备控制完成主要思维动机(图1)<sup>[7-8]</sup>。BCI根据其作用方向分为单向和双向类别。单向BCI只能从大脑接收信号,或者将信号发送给大脑,而双向BCI允许双向信息交换,从而使大脑能够控制外部设备,允许SCI患者仅使用思想来控制机器和设备<sup>[9]</sup>。外部设备不仅有电刺激技术,还包括机器人外骨骼等一系列辅助肢体运动及感觉的设备,而具有持续弯曲能力的软外骨骼适合个人体型,使用起来更舒适等优点,在恢复功能性运动能力及预防肌肉痉挛和萎缩方面极具应用价值<sup>[10]</sup>。



机器和设备包括电刺激、机器人外骨骼等,当设备为硬膜外电刺激控制下肢运动为脑-脊髓接口(brain spinal interface, BSI),当设备为功能性电刺激控制下肢运动为脑机接口联合功能性电刺激治疗(brain-computer interface-triggered functional electrical stimulation therapy, BCI-FEST)。

图1 BCI原理

#### 1.2 分类及优缺点

##### 1.2.1 侵入性BCI

侵入性BCI通过手术将电极植入皮质或/和大脑深部结构中来记录脑电活动,常用电极有微电极阵列、皮质电图电极、立体脑电图电极、深部脑刺激电极等<sup>[11]</sup>。BCI早已用于SCI的神经康复治疗,临床应用效果方面,Levet等<sup>[12]</sup>通过对21例颈椎SCI患者的数据分析,所有患者的运动功能在每次神经康复运动都得到了恢复,但不能完全恢复SCI患者的功能自主性。

侵入式BCI具有本质优势:①它可以获得具有更高空间和时间分辨率的神经信号<sup>[12]</sup>;②具有更高的信噪比,并且有更强的抗电性噪声干扰和抗运动伪影;③电极接

近或直接放置在目标皮质区域或皮质下结构中,这对于开发能够解码特定信息和调节特定大脑功能的BCI至关重要。当然,当前侵入式BCI技术的缺点同样明显。首先,将电极直接植入神经组织需要进行外科手术,并且增加了并发症的风险。其次,系统一旦植入,很难修复硬件问题或更新任何组件。最后,由于手术过程本身的复杂性以及术后必要的护理,导致成本很高<sup>[11, 13-14]</sup>,因此现在主要用于失明和瘫痪患者<sup>[13]</sup>。随着具有更高级的电学结构、化学和生物学性能的碳纳米及柔性材料和神经解码的应用,通过改善电信号和化学信号的传感器信号质量,增强刺激电极的阻抗和稳定性,以及通过药物精确释放调节神经功能或抑制炎症反应<sup>[15-16]</sup>,同时随着植入外科

手术的成熟,侵入式BCI必然具有更高层次的应用前景。

1.2.2 非侵入性BCI

非侵入性BCI通过将脑电极放置在头皮表面,可以在不侵入脑组织的情况下记录脑电图、脑磁图、功能磁共振成像和功能性近红外光谱等<sup>[16-17]</sup>。非侵入性BCI的优点刚好与侵入性BCI相反,非侵入性BCI最大的优点就是安全性较高。不足之处就是因为收集脑部信息较远,所以脑电图信号总是成为破坏性干扰(称为伪影)的目标。同时由于电极之间的差异以及放大器性能的限制,残留的噪声仍然会导致结果失真<sup>[17]</sup>。

2 电刺激基础及原理

SCI是一种不连续性综合征,扰乱传出和传入通路,包括从运动皮质到脊髓运动神经元的下行运动纤维,周围神经系统通过脊髓到达大脑的上行感觉纤维<sup>[18]</sup>。一方面相比于颈胸椎脊髓,位于腰椎脊髓的神经元并没有直接受到损伤<sup>[19]</sup>,另一方面幸存和受伤轴突的侧生萌芽、突触重塑和轴突再生等一系列修复机制可以使轴突生长,

但这是个极为漫长的过程<sup>[20]</sup>。

自从1961年电刺激首次应用于腓神经以来,发展出经皮电神经刺激、神经肌肉电刺激、功能性电刺激、膈神经起搏、脊髓刺激等一系列不同用途、不同脊髓节段的电刺激技术,脊椎部位放置可分为硬膜外脊髓电刺激、经皮脊髓电刺激、硬膜下电刺激、椎管内微刺激等<sup>[21]</sup>。

功能性电刺激是通过对肌肉施加电刺激来实现的,产生具有功能的运动(图2),而硬膜外电刺激是通过外科手术在硬膜外放置电极实现肢体运动。电刺激不仅直接刺激肌肉收缩,减轻SCI并发症,同时伴有调节运动神经回路的可塑性及恢复运动神经元的神经支配的作用<sup>[22]</sup>。一项荟萃分析表明<sup>[23]</sup>,不同电刺激应用于步行速度和距离、功能性上肢独立及改善行走功能和活动方面的疗效已得到证实,而且机器人辅助跑步机训练结合电刺激可能会产生难以想象的效果。常用的电刺激的临床应用见表1。

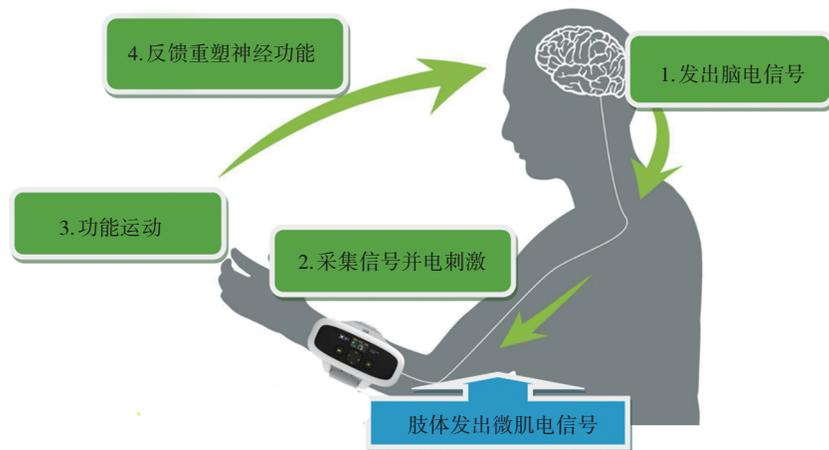


图2 功能性电刺激机制图

表1 常见电刺激的临床应用

刺激种类	作者	病例数/例	发表时间	结果	结论
硬膜外脊髓电刺激	Chalif等 <sup>[24]</sup>	306	2024年	44%的患者实现了辅助或独立行走或站立;87%的患者肌肉活动增强;65%的患者行走速度加快;80%的患者在地上行走方面得到改善	硬膜外脊髓刺激是治疗慢性SCI的一种有效且安全方法,尤其是在与强化物理康复相结合时
神经肌肉电刺激	Bekhet等 <sup>[25]</sup>	414	2022年	肌肉横截面积增加范围为5.7%~75.0%,平均26.0%;负荷运动后每周训练量的增加导致体重增加	SCI后肌肉肥大和体重增加
功能性电刺激	Gurcay等 <sup>[26]</sup>	15	2022年	功能独立性测量、诺丁汉健康状况、6 min步行试验和20 m步行试验的运动和总分、身体活动性量表得到改善	改善慢性SCI患者的运动和总功能独立性测量评分、步态参数和用力肺活量值
经皮脊髓电刺激	Savenkova等 <sup>[27]</sup>	15	2019年	研究组的6例患者和对照组1例患者肌力增加;研究组2例患者的深部和本体感受敏感性改善,在对照组中未观察到敏感性变化;研究组3例患者残余尿量减少,并出现控制和尿急感,对照组未观察到	短期经皮脊髓电刺激周期性康复治疗有助于严重运动障碍的恢复,并伴有泌尿功能的改善

### 3 BCI技术结合电刺激在SCI的临床应用

#### 3.1 SCI病理变化及神经回路重构的理论基础

SCI后急性期出血性损伤和缺血导致损伤部位会形成一个空腔,随着其扩张,轴突、神经元和神经胶质细胞会移位,同时伴有髓鞘损伤,导致脱髓鞘和传导阻滞<sup>[28]</sup>。研究表明受伤的中枢神经系统在慢性损伤期间保留了一种中枢神经系统在获得、保留和巩固运动技能期间重组自身的能力,即神经可塑性<sup>[29]</sup>。SCI损伤后多年仍能通过大脑和脊髓之间的剩余连接诱导神经可塑性,以改善运动感觉功能。但是自发运动恢复会受到胶质瘢痕和多种生理反应(小胶质细胞活化、促炎细胞因子的上调和细胞毒性水肿等)影响,而主动重复的运动已被证明可纠正无方向的神经可塑性和神经网络的更多功能重组,加快SCI后的神经功能康复<sup>[29-30]</sup>。

BCI结合电刺激启动肢体运动来暂时替代受损的神经回路,然而神经回路重建是一个长期的过程,也是神经修复的首要目标。脊髓是皮质脊髓系统活动依赖性神经可塑性的关键部位,已经确定了以下几种活动依赖性可塑性:①运动皮质电刺激后皮质脊髓束轴突萌芽;②皮质脊髓束和本体感觉传入纤维末端之间的突触竞争;③皮质脊髓束-脊髓中间神经元突触的长时程增强,同时利用BCI技术中的神经反馈来影响大脑可塑性<sup>[28, 31]</sup>。BCI与电刺激技术结合相对于使用单一技术的使用具有明显优势<sup>[32]</sup>,通过BCI和电刺激技术的结合实现的,形成的电子神经旁路不仅可以在短期内针对机体进行康复训练,而且还加快对活动依赖性神经可塑性的形成<sup>[33]</sup>。

#### 3.2 BSI

##### 3.2.1 BSI原理

BSI是一种通过硬件和软件的集成链在大脑和脊髓之间的数字桥梁,即通过BCI收集大脑运动指令信号后,再通过刺激对应部位,同时加快神经回路重构。首先,在感觉运动皮质硬膜外放置皮质植入物,以收集皮质信号,随后处理单元预测运动意图,最后并将这些预测转化为针对腰骶脊髓背根的进入区硬膜外电刺激程序,实现大脑控制行走。

##### 3.2.2 BSI优势

在对SCI患者进行单一硬膜外电刺激治疗或者动物实验,使受试者重新获得对瘫痪肌肉活动适应性控制的能力已经有一定研究基础。Angelin等<sup>[34]</sup>对SCI时间达2个月的老鼠模型进行数周硬膜外电刺激治疗后,得出硬膜外电刺激通过调节纺锤体传入回路,增加神经元群体和信号对应的突触结构及上调生长促进因子,增强轴突发芽,促进新突触的形成等电生理机制对大鼠撞击诱导的创伤性SCI具有再生和保护作用的结论。

这种恢复已在各种独立研究中得到证实。但是仅硬膜外电刺激治疗也伴有一系列的局限性:①刺激参数必

须根据目标肌肉或期望的运动功能进行微调;②刺激的开始必须与运动意图精确同步;③对肌肉活动的精细分级控制需要调节刺激的幅度<sup>[35]</sup>,但是BSI可以补充以上不足。Rowald等<sup>[36]</sup>通过BSI治疗了3例患有完全感觉运动麻痹的个体,短时间内特定活动的刺激程序使这3例能够站立、行走、骑自行车、游泳和控制躯干运动。同时BSI具有较高的稳定性,电刺激幅度的最佳范围取决于电极和目标肌肉的具体配置,通过量化了皮质信号和解码器随时间的稳定性。BSI在1年的使用中,这些刺激幅度范围保持稳定,刺激阈值不随时间变化<sup>[35]</sup>。现在BSI需要外科手术放置,所以其临床应用受限导致临床应用较少,但是随着相关技术进步,SCI在未来的临床应用必然是潜力无穷的。

#### 3.3 BCI-FEST的临床应用

##### 3.3.1 BCI-FEST原理

BCI-FEST是通过BCI技术收集相关信息,并经神经解码方法和神经肌肉刺激装置,在身体和大脑中受损的神经通路中组成的电子神经旁路技术,可以帮助恢复SCI和中风或创伤性脑损伤患者失去的功能。相比BSI,BCI-FEST不仅临床应用更多,而且应用范围更广,到现在其应用潜力还远远未被发掘。BCI-FEST临床应用详见表2。

在神经系统中,信息通过时间(神经元的放电率)和空间(神经元组)变化来编码,当BCI检测到大脑想象的或尝试的运动时触发刺激对应肌肉,使用BCI可更好地确保患者在治疗期间主动产生运动指令,这反映在用于确定何时触发刺激的脑电图活动中,之后并将其与恢复运动的肌肉激活的功能性电刺激联系起来。通过这种方式,BCI不仅可以使中枢神经系统参与运动功能的再学习。而且重复运动命令-躯体感觉反馈耦合也被认为是可诱导的中枢神经系统可塑性的重要步骤<sup>[33, 37]</sup>。

##### 3.3.2 BCI-FEST在SCI的临床应用

BCI-FEST已经在脑卒中康复治疗中取得不错的成果,但在SCI应用较少,现阶段功能性电刺激主要采用非侵入性放置,Jovanovic等<sup>[38]</sup>治疗5例亚急性SCI患者使用BCI-FEST完成12~40次康复治疗,得出BCI-FEST干预是安全可行的。

King等<sup>[39]</sup>在2015年对1例SCI患者进行19周的非侵入性BCI-FEST,在非侵入性BCI-FES控制的地上行走测试中,证明了该技术的能力。Levett等<sup>[12]</sup>对既往应用侵入性BCI-FEST的文献总结,虽然其不能完全恢复SCI患者的功能自主性,但是所有患者的运动功能在每次分配的任务中都得到了恢复。更重要的是这种非侵入性系统在人群研究中得到成功测试,那么追求永久性、侵入性BCI-FEST也是合理的。随着植入材料及工艺进步,侵入性BCI-FEST也早早实现,但安全性还缺乏相关临床应用

表2 BCI-FEST临床应用总结

作者	发表时间	病例数/例	疾病	结果	结论
Kumari等 <sup>[45]</sup>	2025年	10	SCI	BCI-FEST启动感觉运动系统的平均准确率为85%。在实验组中,闭眼与睁眼脑电图活动之间的比值增加,表明神经学结局更好	在康复运动治疗前预充大脑是可行的,但可能需要超过15 min。但需要进一步研究,增加样本量
Jovanovic等 <sup>[38]</sup>	2021年	5	SCI	参与者完成平均29.8次锻炼,没有不良事件。在主要结局中,3/5的参与者显示出大于最小临床重要差异的变化	BCI-FEST干预是安全的,可行的
Ren等 <sup>[42]</sup>	2024年	290	脑卒中	通过BCI-FEST上肢功能恢复的效果中等;训练前的BCI阈值显著改善了中风患者的运动功能、运动想象和动作观察,可以显著改善脑卒中患者的上肢功能	BCI-FEST对亚急性和慢性卒中患者的上肢功能有即时影响,但其长期影响的证据仍然有限
Ramirez-Nava等 <sup>[43]</sup>	2023年	14	脑卒中	非随机研究通过Fugl-Meyer评估表评估功能障碍,采用改良Ashworth量表评估功能独立性和痉挛,量表的差异具有统计学意义	BCI-FEST比传统疗法更有效地改善中风后的上肢运动障碍
Sinha等 <sup>[41]</sup>	2021年	23	脑卒中	运动网络中的半球间和网络静息状态功能连接增加,患者在运动研究手臂测试有显著改善	BCI-FEST促进大脑半球间连接的变化和上肢运动功能的恢复
Biswas等 <sup>[44]</sup>	2024年	66	脑卒中	66例受试者(每个治疗组33例患者)的拟定研究具有83%~87%的把握度检测35%的效应量/改善	BCI-FEST有望改善脑卒中患者的步态速度

证明。

### 3.3.3 BCI-FEST在脑卒中的临床应用

近年来,脑卒中发病率呈增长趋势,总体病死率呈下降改变,脑卒中患者治疗后常遗留运动功能障碍、感觉障碍、认知功能障碍、心脏病变、卒中相关感染等并发症<sup>[40]</sup>。传统康复治疗往往治疗效果不佳,而BCI-FEST在对脑卒中治疗效果方面前景可期。Sinha等<sup>[41]</sup>对23例脑卒中后上肢运动功能障碍患者采用BCI-FEST进行1个月干预后,它能改善大脑半球间静息状态功能连接变化和手臂运动,能促进大脑半球间连接的变化和上肢运动功能的恢复。相比于BCI-FEST应用于脑卒中后下肢的康复研究,其应用于上肢的康复疗效已经取得不错的临床进展<sup>[42-43]</sup>。Biswas等<sup>[44]</sup>通过一项两组、随机、对照、纵向研究中66例处于步态障碍慢性(>6个月)阶段的脑卒中患者进行传统物理治疗与BCI-FEST的安全性及治疗效果对比,BCI-FEST是安全且潜在有效的,但是对于步态障碍的潜在疗效,需要大规模的、确定性的试验,以确定BCI-FEST作为改善慢性脑卒中患者步态速度的康复范例的疗效。

### 4 BCI技术结合电刺激在SCI临床应用的局限

既往SCI的治疗是一大难点,传统治疗对SCI效果较差,随着技术进步及对人体神经解剖加深,侵入性或非侵入性的BSI和BCI-FEST为SCI的康复治疗提供了新的方案,值得进一步研究和推广,但是这两种组合技术仍然存在相关技术及伦理问题。

对于BSI临床应用较少,同时伴有一些局限,在BSI的数字桥梁需要打破几项技术壁垒。首先,皮质植入物的实际应用将需要基站、计算单元和不易察觉的天线小型化。压缩感知与采样电极和特征的动态调整可以进一

步减少皮质设备占用空间。其次,脊柱植入物必须具有超高速通信能力、多种刺激参数和可穿戴计算单元的直接无线控制。最后,皮质和脊柱植入物可以通过单个低功耗集成电路进行控制,该集成电路嵌入具有自校准能力的神经形态处理器,该处理器可以自动将皮质活动转换为刺激程序的更新<sup>[35]</sup>。

其次,BCI-FEST也因为一些技术挑战无法大面积推广,这些挑战包括植入记录电极的信号退化、神经解码算法随时间的准确性、系统的小型化、使用功能性电刺激时的肌肉疲劳以及整个系统的易用性。另一方面,侵入性BCI尽管该技术前景看好,但是植入大脑皮质的侵入性BCI系统和神经调节装置会伴随出血、感染和信号质量随时间推移而下降等并发症。而非侵入性BCI-FEST通常难以到达更深的肌肉目标,而且电极在皮肤和目标肌肉上的相对位置易发生改变,导致改变目标处的电流<sup>[33]</sup>。期待随着BCI和电刺激技术的发展及相关应用材料的更新完善以上不足,可以更多需要神经康复患者从中受益。

### 5 小结与展望

BCI和电刺激在单独应用于SCI已经有一定的时间,同时也取得较好的效果,同时越来越多的证据表明,与单独使用这些技术相比,这些技术的组合可能会产生更好的结果<sup>[46]</sup>。BCI联合电刺激现阶段主要包括BSI及BCI-FEST,这两种组合技术作为神经损伤后康复训练技术,既可诱发神经可塑性,又可减少并发症。

近年来,单独应用BCI和电刺激技术在医学领域应用中各自做出了重要突破,为SCI后神经康复治疗提供了新的思路,同时也取得了一系列的成果。目前,将BCI和电刺激技术进行整合形成一种新的康复训练系统是一种极具应用前景的技术,但是现在无法大面积应用。随着

对人体神经系统解剖发掘,更先进材料研究,传导系统完善,BSI和BCI-FEST一定可能大面积推广,在更广泛的领域实现新的突破。

## 参 考 文 献

- [1] BARBIELLINI AMIDEI C, SALMASO L, BELLIO S, et al. Epidemiology of traumatic spinal cord injury: a large population-based study[J]. *Spinal Cord*, 2022, 60(9): 812-819.
- [2] 李健,于朝春,杨周,等.基于Wnt/ $\beta$ -catenin通路及相关蛋白表达对脊髓损伤及其治疗的机制探讨[J]. *国际神经病学神经外科学杂志*, 2022, 49(5): 82-86.
- [3] ALCÁNTAR-GARIBAY OV, INCONTRI-ABRAHAM D, IBARRA A. Spinal cord injury-induced cognitive impairment: a narrative review[J]. *Neural Regen Res*, 2022, 17(12): 2649-2654.
- [4] BANNERMAN CA, DOUCHANT K, SEGAL JP, et al. Spinal cord injury in mice affects central and peripheral pathology in a severity-dependent manner[J]. *Pain*, 2022, 163(6): 1172-1185.
- [5] CHAI XK, CAO TQ, HE QH, et al. Brain - computer interface digital prescription for neurological disorders[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(2): e14615.
- [6] VÄRBÜ K, MUHAMMAD N, MUHAMMAD Y. Past, present, and future of EEG-based BCI applications[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(9): 3331.
- [7] BELWAFI K, GANNOUNI S, ABOALSAMH H. Embedded brain computer interface: State-of-the-art in research[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(13): 4293.
- [8] DADARLAT MC, CANFIELD RA, ORSBORN AL. Neural plasticity in sensorimotor brain-machine interfaces[J]. *Annu Rev Biomed Eng*, 2023, 25: 51-76.
- [9] PEKSA J, MAMCHUR D. State-of-the-art on brain-computer interface technology[J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23(13): 6001.
- [10] COLUCCI A, VERMEHREN M, CAVALLO A, et al. Brain-computer interface-controlled exoskeletons in clinical neurorehabilitation: ready or not[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2022, 36(12): 747-756.
- [11] ZHAO ZP, NIE C, JIANG CT, et al. Modulating brain activity with invasive brain-computer interface: a narrative review[J]. *Brain Sci*, 2023, 13(1): 134.
- [12] LEVETT JJ, ELKAIM LM, NIAZI F, et al. Invasive brain computer interface for motor restoration in spinal cord injury: a systematic review[J]. *Neuromodulation*, 2024, 27(4): 597-603.
- [13] MRIDHA MF, DAS SC, KABIR MM, et al. Brain-computer interface: advancement and challenges[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(17): 5746.
- [14] SAHA S, MAMUN KA, AHMED K, et al. Progress in brain computer interface: challenges and opportunities[J]. *Front Syst Neurosci*, 2021, 15: 578875.
- [15] LI JN, CHENG YH, GU ML, et al. Sensing and stimulation applications of carbon nanomaterials in implantable brain-computer interface[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(6): 5182.
- [16] LUO SY, RABBANI Q, CRONE NE. Brain-computer interface: applications to speech decoding and synthesis to augment communication[J]. *Neurotherapeutics*, 2022, 19(1): 263-273.
- [17] YUAN HW, LI Y, YANG JJ, et al. State of the art of non-invasive electrode materials for brain-computer interface[J]. *Micromachines (Basel)*, 2021, 12(12): 1521.
- [18] KARAMIAN BA, SIEGEL N, NOURIE B, et al. The role of electrical stimulation for rehabilitation and regeneration after spinal cord injury[J]. *J Orthop Traumatol*, 2022, 23(1): 2.
- [19] KATHE C, SKINNIDER MA, HUTSON TH, et al. The neurons that restore walking after paralysis[J]. *Nature*, 2022, 611(7936): 540-547.
- [20] SOFRONIEW MV. Dissecting spinal cord regeneration[J]. *Nature*, 2018, 557(7705): 343-350.
- [21] 郭小军,常佳琪,何乐玮,等.硬膜外脊髓电刺激在脊髓损伤后下肢运动恢复的研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(6): 898-904.
- [22] LIU JL, CHEN ZH, WU RJ, et al. Effects of tail nerve electrical stimulation on the activation and plasticity of the lumbar locomotor circuits and the prevention of skeletal muscle atrophy after spinal cord transection in rats[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(3): e14445.
- [23] DUAN RM, QU MJ, YUAN YS, et al. Clinical benefit of rehabilitation training in spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2021, 46(6): E398-E410.
- [24] CHALIF JI, CHAVARRO VS, MENSAH E, et al. Epidural spinal cord stimulation for spinal cord injury in humans: a systematic review[J]. *J Clin Med*, 2024, 13(4): 1090.
- [25] BEKHET AH, JAHAN AM, BOCHKAZIAN V, et al. Effects of electrical stimulation training on body composition parameters after spinal cord injury: a systematic review[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2022, 103(6): 1168-1178.
- [26] GURCAY E, KARAAHMET OZ, CANKURTARAN D, et al. Functional electrical stimulation cycling in patients with chronic spinal cord injury: a pilot study[J]. *Int J Neurosci*, 2022, 132(4): 421-427.
- [27] SAVENKOVA AA, SARANA AM, SHCHERBAK SG, et al. [Noninvasive spinal cord electrical stimulation in the complex rehabilitation of patients with spinal cord injury] [J]. *Vopr Kurortol Fizioter Lech Fiz Kult*, 2019, 96(5): 11-18.
- [28] MARTIN JH. Neuroplasticity of spinal cord injury and repair[J]. *Handb Clin Neurol*, 2022, 184: 317-330.
- [29] SAMEJIMA S, HENDERSON R, PRADARELLI J, et al. Activity-dependent plasticity and spinal cord stimulation for motor recovery following spinal cord injury[J]. *Exp Neurol*, 2022, 357: 114178.
- [30] TIAN T, ZHANG SS, YANG MJ. Recent progress and challenges in the treatment of spinal cord injury[J]. *Protein Cell*, 2023, 14(9): 635-652.
- [31] CHENG JW, GUAN NN. A fresh look at propriospinal interneurons plasticity and intraspinal circuits remodeling after

- spinal cord injury[J]. *IBRO Neurosci Rep*, 2023, 14: 441-446.
- [32] ETHIER C, GALLEGO JA, MILLER LE. Brain-controlled neuromuscular stimulation to drive neural plasticity and functional recovery[J]. *Curr Opin Neurobiol*, 2015, 33: 95-102.
- [33] BOUTON CE. Merging brain-computer interface and functional electrical stimulation technologies for movement restoration[J]. *Handb Clin Neurol*, 2020, 168: 303-309.
- [34] ANGELIN LG, CARREÑO MNP, OTOCH JP, et al. Regeneration and plasticity induced by epidural stimulation in a rodent model of spinal cord injury[J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(16): 9043.
- [35] LORACH H, GALVEZ A, SPAGNOLO V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface[J]. *Nature*, 2023, 618(7963): 126-133.
- [36] ROWALD A, KOMI S, DEMESMAEKER R, et al. Activity-dependent spinal cord neuromodulation rapidly restores trunk and leg motor functions after complete paralysis[J]. *Nat Med*, 2022, 28(2): 260-271.
- [37] JOVANOVIĆ LI, POPOVIĆ MR, MARQUEZ-CHIN C. KITE-BCI: a brain-computer interface system for functional electrical stimulation therapy[J]. *J Spinal Cord Med*, 2021, 44(S1): S203-S214.
- [38] JOVANOVIĆ LI, KAPADIA N, ZIVANOVIĆ V, et al. Brain-computer interface-triggered functional electrical stimulation therapy for rehabilitation of reaching and grasping after spinal cord injury: a feasibility study[J]. *Spinal Cord Ser Cases*, 2021, 7(1): 24.
- [39] KING CE, WANG PT, MCCRIMMON CM, et al. The feasibility of a brain-computer interface functional electrical stimulation system for the restoration of overground walking after paraplegia[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2015, 12: 80.
- [40] 钟佳琪, 曹雯霏, 周慧中, 等. 急性缺血性脑卒中后自主神经功能障碍导致的多系统并发症的研究进展[J]. *上海交通大学学报(医学版)*, 2024, 44(7): 928-934.
- [41] SINHA AM, NAIR VA, PRABHAKARAN V. Brain-computer interface training with functional electrical stimulation: facilitating changes in interhemispheric functional connectivity and motor outcomes post-stroke[J]. *Front Neurosci*, 2021, 15: 670953.
- [42] REN CL, LI XM, GAO Q, et al. The effect of brain-computer interface controlled functional electrical stimulation training on rehabilitation of upper limb after stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *Front Hum Neurosci*, 2024, 18: 1438095.
- [43] RAMIREZ-NAVA AG, MERCADO-GUTIERREZ JA, QUINZAÑOS-FRESNEDO J, et al. Functional electrical stimulation therapy controlled by a P300-based brain-computer interface, as a therapeutic alternative for upper limb motor function recovery in chronic post-stroke patients. A non-randomized pilot study[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1221160.
- [44] BISWAS P, DODAKIAN L, WANG PT, et al. A single-center, assessor-blinded, randomized controlled clinical trial to test the safety and efficacy of a novel brain-computer interface controlled functional electrical stimulation (BCI-FES) intervention for gait rehabilitation in the chronic stroke population[J]. *BMC Neurol*, 2024, 24(1): 200.
- [45] KUMARI R, DYBUS A, PURCELL M, et al. Motor priming to enhance the effect of physical therapy in people with spinal cord injury[J]. *J Spinal Cord Med*, 2025, 48(2): 312-326.
- [46] CAJIGAS I, VEDANTAM A. Brain-computer interface, neuromodulation, and neurorehabilitation strategies for spinal cord injury[J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2021, 32(3): 407-417.

责任编辑:王荣兵