

# 功能性电刺激联合治疗脑卒中后下肢运动功能障碍的研究进展

贺飞飞, 景蓉

延安大学附属医院, 陕西 延安

收稿日期: 2022年2月14日; 录用日期: 2022年3月8日; 发布日期: 2022年3月16日

## 摘要

功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)是使用低频电刺激激活失去神经控制的轻瘫或者瘫痪的肌肉群, 达到改善或者恢复被刺激肌肉或者肌群功能, 来帮助病患提高日常生活活动能力, 本文对FES联合治疗脑卒中后下肢运动功能障碍的研究进展进行综述, 能对脑卒中下肢运动功能障碍患者在康复治疗方面提供进一步帮助。

## 关键词

脑卒中, 下肢运动功能障碍, 功能性电刺激, 联合治疗, 综述

# Research Progress of Functional Electrical Stimulation Combined with Treatment of Lower Extremity Motor Dysfunction after Stroke

Feifei He, Rong Jing

The Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

Received: Feb. 14<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 8<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 16<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Functional electrical stimulation (FES) is the use of low-frequency electrical stimulation to activate paralyzed or paralyzed muscle groups without neural control to improve or restore the func-

tion of the stimulated muscles or muscle groups to help patients improve their daily life. This article reviews the research progress of combined FES in the treatment of lower extremity motor dysfunction after stroke, which can provide further help in the rehabilitation of stroke patients with lower extremity motor dysfunction.

## Keywords

Stroke, Lower Extremity Motor Dysfunction, Functional Electrical Stimulation, Combined Therapy, Review

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

脑卒中具有高发病率高致残率的特点,是老年人残疾的主要原因[1]。据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)统计,每年全世界脑卒中患者近1500万,而在中国每年约有150万人患脑卒中,其中约80%的患者出现不同程度的步行功能障碍,这些患者大多有平衡功能障碍及跌倒的风险,严重地影响了患者及其家庭的社会参与与生活质量[2]。脑卒中后早期、及时、合理的康复治疗,能够明显改善患者的预后及长期生活质量,降低致残率,因此,脑卒中后下肢步行能力的改善是康复治疗过程中非常重要的环节[3]。

近年来,临床上有关脑卒中后偏瘫肢体的治疗研究较多,其中功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)作为一种新型神经-肌肉调控手段为脑卒中患者的康复提供新途径。其利用低频或高频脉冲信号输出作用在躯体特定部位调节神经网络信号传递,促进神经可塑性,达到改善患者运动功能的目的,在急性脑卒中和慢性脑卒中治疗中均具有较高的临床应用价值和潜力。以FES为主的联合治疗成为当前热点。本文通过查阅国内外相关文献对FSE联合治疗脑卒中后下肢运动功能障碍的研究进展予以综述。

## 2. 功能性电刺激

功能性电刺激(FES)是使用低频电流刺激失去神经控制的肌肉,使其收缩,以替代或矫正器官及肢体已丧失的功能,产生即时效应直接恢复功能[4]。大量临床研究表明FES与常规治疗相比较,FSE能明显改善脑卒中足下垂患者步态时空参数[5]、下肢运动功能以及步行速度[4]、并通过对瘫痪肢体感觉和运动的输入,利用中枢神经的可塑性,促进大脑功能的重组,从而促进脑卒中患者步行功能的恢复[6]。

## 3. 功能性电刺激联合其他康复疗法

单一的疗法已经不能满足患者的康复需要,大量的临床研究表明,功能性电刺激联合其它的康复疗法对于有下肢运动障碍的患者的康复有极好的疗效[7]。将FES与其他康复训练联合应用,有高效省时的优点,是近年FES应用的新思路。其中FSE联合康复运动训练、中医理疗、物理疗法、药物治疗及手术治疗都有很好的临床疗效。

另外,早期康复训练可以加速脑侧支循环的建立,促进病灶周围组织或健侧脑细胞的重组或代偿,使患者肢体功能改善[8]。康复介入越早,患者的功能恢复和整体疗效就越好[9],早期的康复治疗可减小

梗死灶体积, 促进梗死灶周围组织或对侧大脑半球的重组或代偿, 更大程度地发挥脑的可塑性[10]。

### 3.1. 功能性电刺激联合康复运动训练

#### 3.1.1. 功能性电刺激踏车训练

功能性电刺激恢复性治疗踏车(function electrical stimulation-cycling, FES-cycling)通过预先设定的刺激程序对下肢参与踏车运动的主要肌群给予适时、恰当的序列低频电刺激, 从而驱动下肢肌群收缩完成踏车这一功能性运动[11]。FES-cycling 训练增加患者肌力和耐力, 重复不断的运动模式还可减低运动神经元的兴奋性, 改善患侧下肢的痉挛[12]。李哲等[13]通过对 FES-cycling 训练与智能循环运动系统作对比研究, 治疗 8 周后, FES-cycling 训练明显减轻了患侧下肢小腿三头肌的痉挛, 提高了患者下肢的主动运动功能、平衡功能及步行速度, 且效果优于单纯常规康复治疗及常规康复加智能循环运动训练。

#### 3.1.2. 功能性电刺激结合 MOTomed 智能运动训练

MOTomed 训练系统是软件控制、电机驱动下的应用程序系统, 有被动、助力、主动、抗阻 4 种运动模式的踩踏、圆周、循环运动, 各种运动模式根据患者的具体情况可个体化切换, 患者仰卧位、坐位均可进行肢体功能训练[14]。卢战等[15]给予观察组 MOTomed 结合 FES 治疗 4 周后, 观察组 Fugl-Meyer 量表下肢部分(FMA-L)和 Berg 平衡量表(BBS)评分高于对照组, 10 m 最大步行速度测试(10 mWWS)快于对照组, 提示 FES 结合 MOTomed 智能运动训练系统训练可有效改善脑卒中患者发病后早期下肢功能, 提高步行能力。孙洁等[16]也通过实验研究得出 FES 联合 MOTomed 训练, 可降低脑卒中患者肌张力, 发挥协同作用。

#### 3.1.3. 功能性电刺激联合康复机器人

康复机器人系统[17]是由机械腿引导患者双下肢进行类似于正常步行模式的运动, 通过调整减重量和辅助程度, 提高下肢活动主动参与程度。通过长时间大量的运动模式重复训练, 增加运动感觉输入, 激活中枢模式发生器(center pattern generator, CPG)神经网络, 可改善步行能力和重塑神经网络[18]。刘燕平等[19]给予实验组 FES 同步 Lokomat 下肢康复机器人, 对照组 FES 同步人工辅助步行训练, 治疗 4 周后, 实验组的踝背伸胫前肌积分肌电图(integrated EMG, iEMG)、踝跖屈腓肠肌 iEMG 均高于对照组, 提示 FES 同步下肢康复机器人辅助步行训练, 可以提高踝部背屈时的胫前 iEMG, 并且可以减低拮抗肌协同收缩率(EMG co-contraction ratio, CR), 尤其是降低踝部背屈时腓肠肌的 CR。不仅可以改善卒中后足下垂患者的后踝背屈力量和踝部痉挛情况, 矫正踝部足下垂, 还可以改善步行功能和步行速度。

#### 3.1.4. 功能性电刺激联合减重平板运动训练

减重平板训练(body weight supported treadmill training, BWSTT)通过结合人体步行的负重、迈步、平衡等三要素来建立起正常模式, 并利用装备中的悬吊作用来分担患者自身体重附加在其下肢的负荷, 同时结合电动跑步机来帮助患者下肢开展步行训练, 进而对患者运动皮质和脊髓节律性运动中枢反应起到刺激作用, 提高其步行效果和改善患者肢体平衡能力[20]。郗淑燕等[21]研究得出 FES 联合 BWSTT 治疗可以在脑卒中患者早期介入步行训练的同时, 实时激活踝外翻背屈肌群功能, 促进正确的踝关节运动模式的建立, 从而有效改善卒中后下肢平衡及步行功能。李岩等[22]研究得出 FES 结合 BWSTT 在改善步行能力的同时可以改善步态。

#### 3.1.5. 功能性电刺激联合踝足矫形器

踝足矫形器(Ankle-foot orthopaedic, AFO)可纠正和预防卒中患者下肢的异常步态[23]。AFO 可在矢状面、冠状面来控制踝关节的运动训练, 减轻踝跖屈肌肌肉痉挛、增加踝关节稳定性, 降低步行的能量消

耗[24]。尹维桢等[25]给予观察组在佩戴踝足矫形器基础上联合 FES 治疗, 治疗 8 周后, 观察组主动关节活动度(AROM)、10 s 踝足屈伸运动(AFEM)、FMA-L 评分、10 mMWS、BBS 评分、功能独立性评定量表(FIM)评分和改良 Barthel 指数评定量表(MBI)评分均高于对照组, 提示 FES 联合 AFO 可改善患者运动功能、平衡能力及日常生活活动能力等, 效果优于单纯 AFO 训练。

### 3.1.6. 功能性电刺激联合虚拟现实训练

虚拟现实训练具有沉浸、想象、交叉三大特点, 让训练者有身临其境的感受, 提高患者康复训练积极性[26]。虚拟现实可增加健侧运动皮层及双侧初级感觉皮层功能联系, 提高皮质脊髓兴奋性, 促进大脑皮层重组, 改善运动功能。通过单盲随机对照研究[27], 沉浸式虚拟现实步态训练可改善脑卒中患者综合活动能力, 并证实感觉反馈的参与对康复效果有促进作用。陈福强等[28]通过研究 FES 联合虚拟现实训练应用于脑卒中康复治疗 4 周后发现, 观察组 BBS、FMA-L 及 MBI 评分均显著增高, 起立 - 行走计时测试(time of up and go test, TUGT)显著降低, 表明虚拟现实训练可增加神经肌肉电刺激的康复效果, 具有协同作用, 促进动静平衡及下肢运动功能的恢复, 进一步提高患者治疗效果, 虚拟现实训练可增加运动幅度和速度。

### 3.1.7. 功能性电刺激联合运动想象

运动想象疗法是为了提高运动功能而进行的反复运动想象, 没有任何运动输出, 根据运动记忆在大脑中激活某一活动的特定区域, 从而达到提高运动功能的目的[29]。通过运动想象可能部分活化损伤的运动网络[30]。朱红军等[31]通过研究运动想象疗法联合肌电触发电刺激疗法治疗脑卒中偏瘫患者, 治疗 8 周后, 治疗组 iEMG、FMA 及 10 mMWS 改善最明显, 较对照组和电刺激组均有显著提高, 提示运动想象疗法结合肌电触发电刺激治疗更加有利于改善患者下肢肌肉功能和运动功能。

### 3.1.8. 功能性电刺激联合镜像视觉反馈

镜像疗法[32][33]通过视觉信息输入, 激活相关运动神经元以及脑镜像神经元系统, 改善脑功能重组[34]。镜像视觉反馈可以替代患侧肢体缺失的自体感觉[35], 起到感觉输入的作用。将镜像感觉输入和运动输出联系在一起, 可以增加脑卒中后运动控制表现。林邢波等[36]通过给予观察组患者镜像视觉反馈疗法联合 FES 治疗 4 周后, 观察组患者血清肌肉生成抑制素(myostatin, MSTN)、神经元特异性烯醇化酶(neuron-specific enolase, NSE)水平均显著降低, 屈髋肌力、伸膝肌力徒手肌力检查(manual muscle testing, MMT)评分显著升高, 得出联合治疗可有效改善下肢运动的灵活性及协调性, 从而提高下肢肌张力水平。黎伟雄等[37]也通过研究发现 FES 与镜像疗法结合对提高患者下肢功能更有效。

### 3.1.9. 功能性电刺激同步节奏性听觉刺激

节奏性听觉刺激(rhythmic auditory stimulation, RAS)通过外部节奏的提示作用促进节奏运动的训练, 可有效改善步态不对称性[38], 听觉刺激可绕过受损的解剖结构, 导致良好的肌肉表现和定时控制, 并调节由大脑代偿网络接收的运动定时控制信号[39]。王娟等[40]给予试验组在 FES 治疗同时配合 RAS, 治疗 4 周后得出通过规律、持续的外部听觉刺激, 患侧足跟离地得到规律性提示, 使双腿产生节奏性运动, 配合 FES 对患侧下肢运动模式的改善, 经过反复运动, 显著提高了步速、患侧负重比, 降低了步长差。

## 3.2. 功能性电刺激联合中医理疗

### 3.2.1. 经皮穴位电刺激

经皮穴位电刺激(transcutaneous electrical acupoint stimulation, TEAS)是通过一定强度的低频脉冲电流



刺激治疗穴区的神经肌肉[41], TAES 无创而有效地融合低频电刺激和针刺这两种方法, 通过腧穴区的电刺激不仅可以调和阴阳、补虚泻实从整体上调人体的机能, 而且可通过特殊的外周感觉器传入脊髓反射中枢引起肌肉的伸屈反射, 防止患肢因失去神经支配而造成肢体的废用, 有效促进肢体运动功能的恢复[42]。陈创等[43]给予观察组在常规康复治疗的基础上增加下肢 TAES 治疗, TAES 刺激部位为足三里、阳陵泉穴位, 治疗 4 周后, 显示 FMA-L、Holden 功能性步行分级(Holden functional ambulation classification, HFAC)、MBI 评分明显提高, TAES 可改善脑卒中患者下肢运动功能, 提高步行能力, 改善生活质量。

### 3.2.2. 功能性电刺激联合头皮针

头针治疗是取人体头皮穴位进行针刺以促进相应神经功能恢复的疗法[44], 我国中医中的经头皮穴从针刺治疗脑卒中后运动功能障碍的理论基础是由于全身十四经络循行, 最终均可达头部, 通过针刺头部穴, 可调节气血与阴阳, 从而治疗十四经络疾病[45]。针刺可直接作用于大脑皮层, 改善针刺部位组织间病理变化, 这些变化通过神经系统传递给机体相应部位[46]。同时针刺可改善脑部血流动力学与脑神经活动, 使脑部信号传导趋于正常, 对下肢神经中枢的控制作用增强[47]。头针疗法可诱导受损神经修复再生, 并重新建立突触, 上调抑制性神经递质甘氨酸表达[48], 同时减少痉挛肌兴奋性冲动传出, 提高脊髓中枢运动支配能力, 使痉挛肌群恢复正常舒缩。杨凤南等[44]通过研究得出神经肌肉电刺激联合头针疗法可显著改善缺血性脑卒中痉挛性偏瘫患者肢体肌肉强直症状, 减低下肢肌张力, 缓解肌痉挛状态。

### 3.2.3. 功能性电刺激联合电针

电针治疗是采用低频的脉冲电刺激患肢周边穴位, 结合了传统医学的针刺刺激和现代医学的电刺激作用, 通过穴位刺激及电刺激引起肌肉被动收缩, 增加局部肌肉力量, 防止肌萎缩, 从而达到改善患侧肢体运动功能的目的[49]。脑卒中患者早期电针治疗可增加病灶区神经元和突触数量, 为突触功能重塑提供重要物质基础[50]。同时电针刺激可激发神经支配的肌纤维主动收缩, 保持肌细胞固有的收缩和舒张特性, 促使细胞内新陈代谢, 减缓肌蛋白因失神经支配后的变性过程。电针治疗直接刺激下肢局部肌肉, 促进局部血液循环, 促进下肢运动反射弧的重建与恢复, 使下肢功能恢复[51]。杨海永等[52]给予试验组患者电针联合 FSE 治疗, 选取患侧阳陵泉、足三里、悬钟和丘墟 4 个穴位, 治疗 4 周后, 试验组患者步长、步速、步频、单支撑相百分比、FMA-L 均优于对照组, 提示针刺结合低频电刺激协同增强患侧肢体肌力、预防髋、膝、踝关节挛缩、抑制患侧肌肉痉挛、增加关节被动活动度、激发患侧肢体主动运动。两种疗法相结合能够多层次改善中风偏瘫患者下肢功能障碍。

### 3.2.4. 功能性电刺激联合针刺

针刺可疏通经络, 畅通气血, 调节脏腑气机, 对中风不同阶段均有较高的干预作用[53]。且针刺可直达肌肉深层组织, 刺激神经系统, 疏通经络, 补泻得宜, 调和阴阳、气血, 舒筋活络, 改善脑内血液循环, 加快气血循环, 提升肌力, 分离粘连[54]。针刺可纠正肌张力过大的问题, 刺激脑细胞, 重建神经网络, 减少梗死灶神经细胞损伤范围, 舒张血管, 增加脑血流量; 同时针刺具有镇痛作用, 可改善中风患者关节及肌肉疼痛程度。尹正录等[55]研究 FES 联合针刺治疗 8 周后, 得出 FES 结合针刺可以针对性提高足背屈、外翻肌群的兴奋性, 提高肌力和肌张力, 抑制和拮抗内翻、跖屈肌群, 达到调节肌张力平衡, 强化分离动作, 促进正常运动模式的建立。

## 3.3. 功能性电刺激联合物理疗法

### 3.3.1. 功能性电刺激联合经颅直流电刺激

经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)是一种极性依赖性调节大脑皮质兴奋性

的非侵入性脑刺激技术, 使用低强度的直流电, 在头部产生单向电流可调节大脑皮质的兴奋性[56], 通过调节神经细胞膜电位发挥作用[57]。当 tDCS 与 FES 相结合时, 更易发生动作电位从而促进神经功能恢复。陈汉波等[58]研究得出 tDCS 同步 FES 治疗部分评估指标优于单用 tDCS 和单用 FES, 可能是由于阳极 tDCS 激活了运动皮质兴奋性, 增加了脑血流灌注, 增强了神经可塑性水平, 提高了学习新技能的能力, tDCS 易化了 FES 重塑的进程, 提高了大脑功能重组的效率。何晓阔等[59]给予 tDCS 与 FES 不同时序组合治疗, 干预前后进行功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)检测, 静息态脑功能连接(resting state functional connectivity, RSFC)采用相关分析和基于图论的复杂网络分析。计算不同干预下氧合血红蛋白的脑激活图。得出 tDCS\_FES 时序治疗在增强静息态脑功能连接及提高平均局部效率、全局网络效率、小世界网络等连接效率方面的即时效应都优于 tDCS + FES 同步治疗。

### 3.3.2. 功能性电刺激联合重复经颅磁刺激

重复经颅磁刺激[60] (repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)是采用渐变式磁场作用于大脑皮质的特定位置, 激发出的感应电流可通过调控神经元的动作电位起到相应的治疗作用, rTMS 可通过磁刺激来唤醒受损脑区的运动神经元, 修复和再生突触小节, 从而重建两侧大脑协调关系及其原有功能[61]。王贤卫等[62]研究得出 rTMS 刺激结合 FES 治疗脑卒中后偏瘫, 能有效改善下肢的运动功能和日常生活活动能力, 由于高频磁刺激能够诱导神经元兴奋, 降低突触传导阈值, 使 FES 的治疗产生的突触可塑性和神经元的兴奋性进一步放大和增强。

### 3.3.3. 功能性电刺激联合经颅超声治疗

经颅超声疗法[63]是将声能量聚焦于颅内组织来提高脑细胞代谢水平, 促进脑部血液循环, 可以对患者特定脑部区域刺激, 促进脑卒中患者血液中纤维蛋白溶解, 使血液黏度降低, 改善脑部缺血情况, 促进神经功能恢复。与 FES 联合应用可强化疗效, 促进患者肢体功能和神经功能康复。刘伟等[63]给予研究组在 FES 基础上增加经颅超声治疗, 治疗 4 周后研究组的美国国立卫生研究院卒中量表(NIHSS)评分、FMA-L 评分较治疗前均有改善, 且研究组 NIHSS 评分比对照组低, FMA-L 评分比对照组高, 说明 FES 联合超声疗法可促进脑卒中患者神经功能和肢体运动功能恢复。

### 3.3.4. 功能性电刺激联合冲击波治疗

冲击波通过直接到达人体组织深部, 从而缓解肌肉痉挛, 冲击波能对人体结缔组织和肌肉产生一定的作用, 使痉挛肌肉的纤维化和弹性得到改善, 从而抑制痉挛[64]。叶慧敏等[65]收集 30 例脑卒中后腓肠肌痉挛患者, 观察组给予冲击波联合 FES 治疗, 观察指标采用腓肠肌肌束长度变化情况以及 FMA、日常生活能力(ADL)情况, 治疗 1 月后, 观察组踝关节 0°位、踝关节跖屈 30°位腓肠肌肌束长度明显高于对照组, 观察组 FMA、ADL 评分明显高于对照组, 得出冲击波联合 FES 可有效地促进患者运动功能的恢复。

## 3.4. 功能性电刺激联合药物治疗

### 3.4.1. 功能性电刺激联合前列地尔

前列地尔是一种抗血小板药物, 具有高效生物活性的天然前列腺素类物质, 可通过抗血小板聚集、减少氧化应激性损伤发挥保护神经的作用[66]。黄广为等[67]给予 FES 联合前列地尔治疗急性缺血性脑卒中患者, 治疗 6 周后, 联合治疗组的观察指标评分升高较其他组疗效更显著, 提示 FES 联合药物前列地尔应用于急性缺血性脑卒中患者的临床治疗效果显著, 对改善患者的下肢运动功能、提高患者生活能力方面均具有积极的治疗意义。

### 3.4.2. 功能性电刺激联合肌内贴

肌内效贴主要是利用贴布的粘弹性以及力学的方向, 配合肌动力学以及生物力学原理, 通过强化特定的肌肉, 达到良性的刺激, 使得患者获得感觉输入, 提高收缩能力[68]。能够提高步速和步行稳定性, 改善足下垂步态[69]。黄步哲等[68]研究肌内效贴联合 FES 训练, 患者 BBS 评分、AROM、10mMWS、6 min 步行距离(6MWT)、FAC 评分等均得到明显改善, 可有效改善步行能力。周敏等[70]研究得出肌内效贴联合 FES 对脑卒中患者膝关节稳定性有一定的作用。

### 3.4.3. 功能性电刺激联合中药熏敷

中药熏敷是采用中药先熏后敷的治疗方法, 集熏蒸疗法和中药湿热敷疗法为一体, 它具有热效应和中药疗效的双重作用。使局部毛细血管扩张, 并促进患处的血液循环, 有效地降低神经的兴奋性, 迅速降低肢体肌张力。因此中药熏敷既能直接缓解肌肉痉挛, 又能减轻患肢水肿和疼痛, 减少挛缩的发生[71]。蔡木辉等[72]给予观察组在常规康复治疗基础上给予 FES 联合中药熏敷, 可更有效地降低脑卒中偏瘫肢体肌张力, 两者具有协同、增效的作用。

### 3.5. 功能性电刺激联合手术治疗

针刀治疗结合解剖学知识, 以经筋理论为指导, 对肌腱、肌、腱结合部以及肌腹的松解, 改善症状, 具有创伤小、见效快、频次少、疗效稳定的优势[73]。针刀医学依据弓弦力学解剖系统及网眼理论, 通过对腓肠肌、比目鱼肌、胫骨后肌、跟腱的针刀松解, 可以使变短的跟腱得到松解延长, 可以有效降低张力, 降低其牵拉力。对于软组织损伤的治疗具有独特优势[74]。赵新新等[75]给予对照组神经肌肉电刺激治疗, 治疗组在对照组基础上结合针刀治疗, 治疗 4 周后, 治疗组 FMA、10 MWS 均较治疗前升高, 且治疗组高于对照组, 治疗后两组足内翻的症状评分均较治疗前降低, 且治疗组低于对照组, 提示针刀结合神经肌肉电刺激可有效改善脑卒中患者足内翻症状, 加快患者康复进程。

## 4. 小结

脑卒中后下肢运动功能障碍是脑卒中常见并发症。不仅影响患者的日常生活及步行能力, 也会给患者带来巨大的心理负担, 早期及时有效的康复治疗对功能的恢复具有重要意义。大量临床试验证实功能性电刺激能明显改善偏瘫患者的肢体功能, 提高患者的生活自理能力, 明显降低致残率。临床上除常规康复治疗外, 功能性电刺激还可通过联合康复运动训练、中医理疗、物理疗法、药物治疗及手术治疗对患者进行综合康复治疗。对比其它单一疗法在治疗效果上更加具有优势。虽然上述方法能够达到一定的治疗效果, 但效果间差异较大, 而且目前对于个体化患者没有最优的治疗选择, 因此对脑卒中后下肢运动功能障碍的功能性电刺激联合治疗仍需进一步研究。

## 参考文献

- [1] Virani, S., Alonso, A., Aparicio, H., Benjamin, E.J., Bittencourt M.S., Callaway, C.W., et al. (2021) Heart Disease and Stroke Statistics—2021 Update: A Report from the American Heart Association. *Circulation*, **143**, e254-e743. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000950>
- [2] Polese, J., Ada, L. and Teixeira-Salmela, L. (2018) Relationship between Oxygen Cost of Walking and Level of Walking Disability after Stroke: An Experimental Study. *Physiotherapy Research International*, **23**, e1688. <https://doi.org/10.1002/pri.1688>
- [3] Kamono, A. and Ogihara, N. (2018) Weight-Shift Ability Significantly Correlates with Walking Velocity in Post-Acute Stroke Patients. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of Engineering in Medicine*, **232**, 361-370. <https://doi.org/10.1177/0954411918757814>
- [4] 杨婷, 李雪萍, 林强, 杨倩, 许亮, 高政, 等. 步态诱发功能性电刺激对偏瘫足下垂患者步行能力的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2018, 33(2): 170-174.

- [5] 单莎瑞, 黄国志, 曾庆, 汪孝红. 步态诱发功能性电刺激对脑卒中后足下垂患者步态时空参数的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2013, 28(6): 558-563.
- [6] 苏彬, 黄桂兰, 房辉, 王琳. 功能性电刺激治疗脑卒中后步行功能障碍的临床应用及相关机制研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(1): 119-123.
- [7] 迟银鼎, 邹任玲, 徐秀林, 胡秀枋. 功能性电刺激结合其他疗法在下肢康复的研究现状[J]. 生物医学工程学进展, 2014, 35(3): 160-162.
- [8] 王晶晶, 李育新, 林雪宁. 早期康复训练联合电刺激对脑卒中患者步行能力恢复的效果观察[J]. 护理与康复, 2011, 10(1): 74-75.
- [9] Liu, N., Cadilhac, D., Andrew, N., Zeng, L., Li, Z., Li, J., *et al.* (2014) Randomized Controlled Trial of Early Rehabilitation after Intracerebral Hemorrhage Stroke: Difference in Outcomes within 6 Months of Stroke. *Stroke*, **45**, 3502-3507. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.114.005661>
- [10] Bernhardt, J., English, C., Johnson, L. and Cumming, T.B. (2015) Early Mobilization after Stroke: Early Adoption but Limited Evidence. *Stroke*, **46**, 1141-1146. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.114.007434>
- [11] Howlett, O., Lannin, N., Ada, L. and McKinstry, C. (2015) Functional Electrical Stimulation Improves Activity after Stroke: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **96**, 934-943. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2015.01.013>
- [12] Lo, H., Hsu, Y., Hsueh, Y. and Yeh, C.Y. (2012) Cycling Exercise with Functional Electrical Stimulation Improves Postural Control in Stroke Patients. *Gait & Posture*, **35**, 506-510. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.11.017>
- [13] 李哲, 范家宏, 郭钢花, 李晓丽, 关晨霞, 乐琳. 等. 功能性电刺激恢复性治疗踏板对脑卒中早期患者下肢主动运动的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2017, 32(6): 667-672.
- [14] 王宁, 杨信才, 隗麒麟, 覃亮, 邓赞, 王燕. 等. 虚拟情景 MOTomed 智能训练对脑卒中偏瘫患者下肢功能的影响[J]. 医学研究与教育, 2018, 35(1): 37-41.
- [15] 卢战, 樊留博, 曾超. 功能性电刺激结合 MOTomed 智能运动训练系统训练对脑卒中患者下肢功能的早期康复效果[J]. 中国乡村医药, 2019, 26(3): 3-4.
- [16] 孙洁, 陈伟, 张梅莹. 肌电触发电刺激联合 MOTomed 智能训练对卒中患者下肢肌张力的影响[J]. 求医问药(下半月), 2011, 9(10): 77-78.
- [17] Swinnen, E., Baeyens, J., Knaepen, K., Michielsens, M., Clijisen, R., Beckwée, D., *et al.* (2015) Robot-Assisted Walking with the Lokomat: The Influence of Different Levels of Guidance Force on Thorax and Pelvis Kinematics. *Clinical Biomechanics*, **30**, 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2015.01.006>
- [18] Nuyens, G., De weerd, W., Spaepen, A., Kiekens, C. and Feys, H.M. (2002) Reduction of Spastic Hypertonia during Repeated Passive Knee Movements in Stroke Patients. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **83**, 930-935. <https://doi.org/10.1053/apmr.2002.33233>
- [19] 刘燕平, 林茜, 陈登钟, 李中元, 马启寿, 杨煌. 功能性电刺激同步下肢康复机器人对脑卒中后足下垂患者踝部功能的疗效研究[J]. 中国当代医药, 2021, 28(13): 46-50.
- [20] 李浅峰, 王玉龙. 功能性电刺激联合减重平板训练对脑卒中患者步行能力的影响[J]. 现代电生理学杂志, 2018, 25(2): 79-83.
- [21] 郗淑燕, 王丛笑, 张丽华, 马全胜. 功能性电刺激结合减重平板训练对脑卒中偏瘫患者步行能力的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2015, 30(10): 1065-1067.
- [22] 李岩, 陈迎春, 顾旭东, 何雯雯, 李辉, 劳方金. 等. 功能性电刺激结合减重平板训练对脑卒中患者步行及步态的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(1): 83-85.
- [23] 黄肖群, 肖文武, 覃东. 功能性电刺激联合踝足矫形器对脑卒中下肢运动功能的疗效评价[J]. 中国康复, 2018, 33(4): 311-313.
- [24] White, H., Jenkins, J., Neace, W., Tylkowski, C. and Walker, J. (2002) Clinically Prescribed Orthoses Demonstrate an Increase in Velocity of Gait in Children with Cerebral Palsy: A Retrospective Study. *Developmental Medicine and Child Neurology*, **44**, 227-232.
- [25] 尹维楨. 功能性电刺激联合踝足矫形器训练在卒中偏瘫患者中的应用效果[J]. 中国民康医学, 2021, 33(15): 59-61.
- [26] Ghai, S., Ghai, I. and Lamontagne, A. (2020) Virtual Reality Training Enhances Gait Poststroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1478**, 18-42.
- [27] Mirelman, A., Patrissi, B., Bonato, P. and Deutsch, J.E. (2010) Effects of Virtual Reality Training on Gait Biomechanics of Individuals Post-Stroke. *Gait & Posture*, **31**, 433-437. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.01.016>



- [28] 陈福强, 庄妙玲, 陈宜阳. 神经肌肉电刺激联合虚拟现实训练对脑卒中患者平衡功能及生活质量的影响[J]. 中外医学研究, 2021, 19(24): 182-184.
- [29] Decety, J. and Grèzes, J. (1999) Neural Mechanisms Subserving the Perception of Human Actions. *Trends in Cognitive Sciences*, **3**, 172-178. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(99\)01312-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01312-1)
- [30] Page, S., Levine, P., Sisto, S. and Johnston, M.V. (2001) A Randomized Efficacy and Feasibility Study of Imagery in Acute Stroke. *Clinical Rehabilitation*, **15**, 233-240. <https://doi.org/10.1191/026921501672063235>
- [31] 朱红军, 何怀, 刘传道, 杨卫新. 运动想象与肌电触发电刺激联合对偏瘫患者下肢功能的作用[J]. 中国康复医学杂志, 2011, 26(10): 972-974.
- [32] 龙耀斌, 张红敏. 镜像疗法对急性期脑卒中吞咽障碍的效果[J]. 中国康复理论与实践, 2015, 21(9): 1078-1081.
- [33] Lee, H., Kim, Y. and Lee, D. (2017) The Effects of Action Observation Training and Mirror Therapy on Gait and Balance in Stroke Patients. *Journal of Physical Therapy Science*, **29**, 523-526. <https://doi.org/10.1589/jpts.29.523>
- [34] 庄卫生, 钱宝延, 曹留拴, 邹丽丽. 基于镜像神经元的动作观察疗法在运动功能康复中的应用[J]. 中国康复, 2013, 28(5): 387-389.
- [35] Yavuzer, G., Selles, R., Sezer, N., Sütbeyaz, S., Bussmann, J.B., Köseoğlu, F., et al. (2008) Mirror Therapy Improves Hand Function in Subacute Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **89**, 393-398. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2007.08.162>
- [36] 林邢波, 黄夏莲. 镜像视觉反馈疗法联合电刺激对脑卒中后下肢功能障碍的影响[J]. 中国医刊, 2020, 55(10): 1138-1141.
- [37] 黎伟雄, 龙耀斌. 镜像疗法对脑卒中偏瘫下肢功能的影响[J]. 中国康复理论与实践, 2018, 24(5): 571-574.
- [38] Roerdink, M., Lamoth, C., Van Kordelaar, J., Elich, P., Konijnenbelt, M., Kwakkel, G., et al. (2009) Rhythm Perturbations in Acoustically Paced Treadmill Walking after Stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, **23**, 668-678. <https://doi.org/10.1177/1545968309332879>
- [39] Ko, B., Lee, H. and Song, W. (2016) Rhythmic Auditory Stimulation Using a Portable Smart Device: Short-Term Effects on Gait in Chronic Hemiplegic Stroke Patients. *Journal of Physical Therapy Science*, **28**, 1538-1543. <https://doi.org/10.1589/jpts.28.1538>
- [40] 王娟, 赵凯, 徐梅. 功能性电刺激同步节奏性听觉刺激对脑卒中患者下肢运动功能的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2019, 34(5): 566-569.
- [41] Li, Q., Xu, F., Liang, F., Chen, R., Wu, S., Liu, J.M., et al. (2014) Effects of Electroacupuncture with Manifestation-Root Acupoint Combination on Ultrastructure and Biosynthesis in Mitochondrial of Quadriceps Femoris in Rats with Insulin Resistance. *Chinese Acupuncture & Moxibustion*, **34**, 578-582.
- [42] Kobayashi, T., Leung, A., Akazawa, Y. and Hutchins, S.W. (2016) Correlations between Berg Balance Scale and Gait Speed in Individuals with Stroke Wearing Ankle-Foot Orthoses—A Pilot Study. *Disability and Rehabilitation. Assistive Technology*, **11**, 219-222. <https://doi.org/10.3109/17483107.2014.932019>
- [43] 陈创, 李姗, 唐朝正, 陈昌成, 张晓莉, 吴毅, 等. 经皮穴位电刺激对脑卒中患者下肢运动功能和 ADL 能力的影响[J]. 中国康复, 2016, 31(3): 168-170.
- [44] 杨凤南. 神经肌肉电刺激联合头针对缺血性脑卒中痉挛性偏瘫患者下肢肌张力水平的影响[J]. 实用中西医结合临床, 2021, 21(11): 102-103.
- [45] 杜鑫, 刘迪生, 米尔艾合麦提江·吾拉木, 黄凤, 张涛, 胡俊霞, 等. 针灸在中风偏瘫后足下垂患者中的应用及对表面肌电图的影响[J]. 世界中医药, 2018, 13(11): 2851-2854.
- [46] 张静. 输合配穴法针刺对痉挛型脑瘫患儿下肢痉挛状态改善的临床研究[J]. 针灸临床杂志, 2016, 32(3): 21-23.
- [47] 董卫卫, 裴建, 张见平. 针灸联合康复锻炼改善缺血性脑卒中患者足下垂症状的临床疗效与安全性[J]. 四川中医, 2017, 35(6): 207-210.
- [48] 李金涛, 吴鹏, 王瑞辉. 头针同步结合神经肌肉刺激疗法治疗脑梗死后痉挛性偏瘫的疗效观察[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2020, 18(8): 1297-1300.
- [49] 陆琳, 杨万章, 周永进, 向云, 赵宁. 动态超声分析电针刺激卒中后偏瘫患者胫前肌的时间相关性研究[J]. 中医药导报, 2019, 25(3): 107-110+120.
- [50] 刘惠宇, 朱丽芳, 谢冬玲, 等. 早期电针对脑梗死患者肢体功能恢复的对照研究[J]. 中国康复理论与实践, 2006(1): 26-27.
- [51] 李芬, 李昌柳, 杨少华, 吴旻, 吴刚, 李争鸣. 神经肌肉电刺激与电针治疗脑卒中偏瘫患者下肢功能障碍的疗效观察[J]. 广西医学, 2014, 36(8): 1061-1063.

- [52] 杨海永, 王东岩. 电针结合屈伸肌交替刺激法改善脑卒中患者下肢功能障碍临床研究[J]. 针灸临床杂志, 2021, 37(1): 30-34.
- [53] 石素宁, 于洪宇, 丛壮, 刘慧. 靳三针结合运动疗法对脑卒中偏瘫患者下肢功能的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2014, 29(7): 669-671.
- [54] 马振宇. 针刺配合低频神经肌肉电刺激对卒中下肢偏瘫患者肢体功能的影响[J]. 上海针灸杂志, 2019, 38(9): 964-968.
- [55] 尹正录, 孟兆祥, 薛永骥, 陈波. 针刺对脑卒中偏瘫患者踝内翻的疗效观察[J]. 中国康复理论与实践, 2013, 19(12): 1163-1166.
- [56] 郑修元, 陈汉波, 吕晓, 倪莹莹, 丁丽娟, 郑文华, 等. 经颅直流电刺激同步多通道功能性电刺激对脑卒中偏瘫患者平衡与行走功能影响的研究[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(10): 1220-1226.
- [57] Bourzac, K. (2016) Neurostimulation: Bright Sparks. *Nature*, **531**, S6-S8. <https://doi.org/10.1038/531S6a>
- [58] 陈汉波, 郑修元, 吕晓, 丁丽娟, 贺灵慧, 刘晨, 等. 经颅直流电刺激同步多通道功能性电刺激对脑卒中偏瘫患者下肢运动功能影响的对照研究[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(10): 1227-1232.
- [59] 何晓阔, 刘慧华, 余果, 雷蕾, 燕铁斌, 陈善佳. 经颅直流电刺激与功能性电刺激的不同时序组合对脑卒中偏瘫患者脑功能连接的即时影响[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(10): 1213-1219.
- [60] 张禄菊, 蒋敏, 李娟, 罗伦. 重复经颅磁刺激联合功能性电刺激康复踏车训练对脑卒中患者下肢功能的影响[J]. 实用心脑血管病杂志, 2021(S2): 1-4.
- [61] 刘超猛, 孟瑶, 李浩浩, 张桂青. 重复经颅磁刺激对缺血性脑卒中患者运动功能和血清 MMP-9、hs-CRP 的影响[J]. 天津医药, 2019, 47(2): 184-188.
- [62] 王贤卫, 梁锦锋, 温则岳, 陈汉波, 冯重睿, 张新斐. 重复经颅磁刺激结合功能电刺激对脑卒中偏瘫下肢功能的影响[J]. 世界最新医学信息文摘, 2016, 16(93): 58.
- [63] 刘伟, 陈娜, 钟璐. 电刺激联合超声促进脑卒中患者功能恢复的效果观察[J]. 基层医学论坛, 2020, 24(23): 3315-3316.
- [64] Gao, R., Tang, C., Huang, S., Cao, J., Guo, Q.H., Zhang, Y., et al. (2017) Effects of Electroacupuncture on Apoptosis-Related Protein Expression of Gastrocnemius Muscle Cells in Rats with Denervated Sciatic Nerve. *Acupuncture Research*, **42**, 302-307.
- [65] 叶慧敏, 丁德权, 黎月桃. 冲击波联合经皮神经电刺激治疗脑卒中后腓肠肌痉挛的效果[J]. 中国当代医药, 2019, 26(16): 71-73.
- [66] Liu, J., Bu, W. and Shi, J. (2017) Chemical Design and Synthesis of Functionalized Probes for Imaging and Treating Tumor Hypoxia. *Chemical Reviews*, **117**, 6160-6224. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00525>
- [67] 黄广为. 低频神经肌肉电刺激联合前列地尔对 30 例急性缺血性脑卒中患者下肢运动功能的影响[J]. 上海医药, 2020, 41(15): 45-47+101.
- [68] 黄步哲, 黄燕芳, 罗林坡. 肌内效贴联合触发式功能性电刺激训练改善脑卒中偏瘫足下垂患者步行能力效果观察[J]. 中国实用医药, 2019, 14(14): 191-192.
- [69] 陈佩顺, 李豪, 李陶韬, 黄臻周, 海旺. 肌内效贴结合足下垂助行仪治疗脑卒中偏瘫患者足下垂步态的临床观察[J]. 神经损伤与功能重建, 2016, 11(6): 545-546.
- [70] 周敏. 神经肌肉电刺激联合肌内效贴对脑卒中患者膝关节稳定性的疗效分析[J]. 中国妇幼健康研究, 2017, 28(S3): 491-492.
- [71] 樊永红, 张春霞, 郭丽. 自制中药熏蒸治疗急性腰扭伤的前瞻性随机性对照研究[J]. 全科护理, 2012, 10(21): 1962-1963.
- [72] 蔡木辉. 中药熏敷联合中频电刺激降低脑卒中偏瘫肢体肌张力的临床观察及护理[J]. 中国中医药现代远程教育, 2016, 14(10): 117-119.
- [73] 王金, 刘建民, 张天民, 郑楠. 针刀治疗膝内翻畸形的体会和机制探讨[J]. 中医药导报, 2020, 26(6): 54-57.
- [74] 王永莉, 张树剑. 针刀医学理论回顾及与传统针灸理论之关系初探[J]. 辽宁中医杂志, 2017, 44(4): 831-834.
- [75] 赵新新, 肖洪波, 陈瑞全, 雍启正, 李博, 杨永晖, 等. 针刀结合神经肌肉电刺激治疗脑卒中后足内翻的临床效果[J]. 中国医药导报, 2020, 17(36): 167-171.