

# 脑-肢协同对脑卒中后步行功能影响的研究进展\*

田腾飞<sup>1,4</sup> 孙倩倩<sup>2,3</sup> 郭新毅<sup>3</sup> 李秀毅<sup>3</sup> 赵双艳<sup>3</sup> 燕铁斌<sup>2,5</sup>

近年来,随着神经危重症治疗技术的突破,脑卒中患者死亡率下降,生存者中致残率显著升高<sup>[1-2]</sup>。同时,由于脑卒中的发病率逐年升高,卒中后功能障碍患者多达1700多万<sup>[3-4]</sup>。据中国学者在Lancet上报告有关国人1990—2019脑卒中的流行病学资料,仅2019年我国新增脑卒中患者就高达近400万人,脑卒中的发生率、发生风险及疾病负担全球第一,且呈现出年轻化趋势<sup>[5]</sup>。

脑卒中后约50%—80%的幸存者存在步行功能障碍,即使给予积极的康复治疗6个月后仍有20%—40%的患者无法独立行走<sup>[6]</sup>。脑卒中患者步行功能障碍的这种高发病率<sup>[6]</sup>、低恢复率<sup>[7]</sup>现象,为家庭及社会增加了巨大的负担。国内外脑卒中康复指南均明确提出,脑卒中管理的目标是通过尽早康复干预最大限度的恢复受损功能<sup>[8-9]</sup>。国内学者近年来提出了“脑-肢协同”的治疗理念,受到了业内专家们的认可并在临床中推广应用<sup>[10]</sup>。多项研究证实了“脑-肢协同”的治疗效果优于单一的外周或单一的中枢治疗,是一种更有效的治疗方案。因此,本文从“脑-肢协同”治疗的不同组合模式作为切入点,综述基于助行训练的“脑-肢协同”康复治疗对脑卒中后步行功能的干预疗效,旨在为优化后续该模式的持续推进提供新思路。

## 1 行走的模式及脑-肢多靶点的干预策略

### 1.1 行走是一种模式而不是单纯的关节活动

行走的基本运动模式产生于脊髓,精细控制则来自于脊髓上水平的调控<sup>[11]</sup>。根据目前临床上常用的改善脑卒中后行走功能的康复治疗方法,可以分为自下(外周)而上(中枢)和自上而下的两大类干预方式。常规的外周类康复治疗技术,如改善下肢功能的运动疗法、步行机训练、功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)、下肢机器人等干预方法,通过外周环路上行到中枢,提高脑局部组织血流,增强皮质兴奋性,引起脑的可塑性改变,从而改善脑卒中后脑的下行运动控制能力<sup>[12]</sup>。同时,非侵入中枢刺激技术如经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)和经颅直流电

刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)等,越来越多的应用于脑卒中后步行功能障碍,并证明是有效的治疗<sup>[13-14]</sup>,由此而开展的基础神经科学和临床应用研究也日益增多<sup>[15]</sup>,由此推动了改善脑卒中后行走功能的康复治疗由治疗脑或治疗肢体的单一治疗模式逐渐转变为多器官、多靶点的协同治疗<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2 脑-肢协同治疗的同步与非同步

近年来,本团队探索了“脑-肢协同”治疗提高卒中后步行功能的效应机制,证明了采用阳极tDCS刺激M1区后给予FES辅助步行的干预模式较单独FES、单独tDCS,对感觉-运动皮层环路脑区连接效率的改善效果更显著。基于“脑-肢协同”理念,根据干预时间顺序的不同,可以将改善脑卒中后行走障碍患者的“脑-肢协同”技术分为同步治疗或非同步治疗。所谓同步治疗是指在给予脑部刺激的同时进行辅助行走训练;而非同步治疗是指在辅助行走训练后再给予脑部刺激,或先给予脑部刺激然后进行辅助行走训练,且非同步治疗在时间上是连贯性的。

由此可见,在设计“脑-肢协同”治疗方案时,既需要考虑脑和肢体的多靶点干预,还需考虑干预的时序(同步治疗、非同步治疗),方能达到最佳的治疗效果。

## 2 “脑-肢协同”治疗的不同组合模式对步行功能的影响

### 2.1 中枢性干预联合助行FES步行训练

2.1.1 国外研究报告:Mitsutake T等<sup>[18]</sup>观察了tDCS同步助行FES对脑卒中患者亚急性期的步行能力的疗效。脑卒中患者被随机分为阳极tDCS同步助行FES组、阳极tDCS组同步安慰助行FES组、安慰tDCS同步助行FES组。干预方法为tDCS刺激的阳性电极片置于患侧初级运动区(primary motor area, M1),阴性电极置于健侧眶上缘,电流为2.0mA;假tDCS电极片位置与阳极tDCS相同,仅在开始与最后的30s有电流刺激;助行FES为患者佩戴FES治疗仪进行步行训练。阳极tDCS组仅予tDCS刺激。干预时长为20min,每天1次,共干预1周。观察指标包括10m步行计时测试

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2024.04.023

\*基金项目:国家自然科学基金项目(81772447)

1 广州中医药大学针灸康复临床医学院,广东省广州市,510006; 2 中山大学孙逸仙纪念医院; 3 湖北文理学院附属医院襄阳市中心医院; 4 深圳市罗湖区人民医院; 5 通讯作者  
第一作者简介:田腾飞,女,主治医师; 收稿日期:2023-12-23

(10m walk test, 10WMT)测量步行速度、躯干加速度;步态参数方面运用惯性传感器检测躯干加速度在前后轴、中外侧轴、垂直轴的改变情况(无偏谐波比、自相关系数和均方根)。分别在治疗前、治疗后各进行1次评估。Mitsutake等人发现,阳极tDCS同步助行FES组与其他两组相比在步态相关系数的前后轴和中外侧轴方向明显增加( $P<0.01$ )。提示tDCS同步助行FES改善脑卒中患者步行功能的步态参数方面优于单独tDCS、假tDCS同步FES。

**2.1.2 国内改善行走及平衡功能研究报告:**本团队近年来致力于tDCS联合助行FES治疗对脑卒中患者步行功能的影响及相关脑机制的研究。陈汉波等<sup>[19]</sup>探索了tDCS同步助行FES对恢复期脑卒中患者步行功能及平衡功能的影响。将纳入患者分层后随机分成3组:同步组(tDCS同步助行FES治疗)、tDCS组(tDCS同步安慰助行FES治疗)、FES组(安慰tDCS同步下肢FES治疗)。tDCS刺激时阳性电极片置于患侧M1区,阴性电极片置于健侧眶上缘,电流强度2.0mA;安慰tDCS刺激电极片位置与tDCS刺激相同,电流为设备自带的安慰刺激;助行FES的四组电极片分别置于患侧下肢的胫前肌、股四头肌、腓肠肌及股二头肌运动点部位,刺激频率30Hz,脉宽200ms,对称方波,电流强度以患者耐受为度,治疗时佩戴FES治疗仪进行步行训练;安慰FES治疗的电极片位置与助行FES相同,但无电流输出。20min/次、1次/d、连续12d。采用“起立-行走”测试、脑卒中患者姿势评定量表、Fugl-Meyer下肢运动功能评定量表、Berg平衡量表(Berg balance scale, BBS)、改良Barthel指数(modified Barthel index, MBI)评价疗效。结果发现,治疗6次后同步组与tDCS组、FES组比较,MBI差异均有显著性(均 $P<0.05$ )。治疗12次后同步组与tDCS组比较,脑卒中患者姿势评分、MBI(下肢)差异有显著性( $P<0.05$ );同步组与FES组比较,BBS变化率差异有显著性( $P<0.05$ )。提示tDCS同步FES治疗患者的步行功能的疗效优于单独tDCS或单独FES治疗。郑修元等<sup>[20]</sup>观察在助行FES治疗的基础上,同步tDCS与同步伪tDCS对亚急性期脑卒中患者步行功能与平衡功能的影响。tDCS与伪tDCS的干预方法与陈汉波<sup>[6]</sup>相同,连续治疗2周。结果发现,tDCS同步FES组2周后Holden步行功能分级、1周后BBS变化率较伪tDCS组增加,差异有显著性(均 $P<0.05$ )。说明tDCS同步FES治疗较单独FES治疗可以显著提高脑卒中患者的步行功能、平衡功能。

**2.1.3 国内影像学机制研究:**最近的研究采用功能影像学进行了这方面的机制探讨。何晓阔<sup>[21]</sup>采用功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)观察tDCS与助行FES不同时序组合对恢复期脑卒中偏瘫患者初级运动皮质(M1区)脑功能连接的即刻效应。采用自身对照方法,脑卒中患者分别给予1次的tDCS治疗、FES治疗、

tDCS和FES同步治疗、先tDCS后FES时序治疗,每种干预之后经历2d的洗脱期再进行下一种治疗,每次干预前后均进行fNIRS检测,结果发现4种治疗均能提高患者的运动皮质兴奋性,但组间比较发现脑功能连接和效率增强的程度各有不同,发现先tDCS后FES时序治疗在脑区连接率改善最显著。

## 2.2 中枢性干预联合步行机训练

Manji A<sup>[22]</sup>探讨tDCS治疗联合减重支持步行机(body-weight-supported treadmill gait training, BWSTT)对脑卒中患者步行功能的影响。采用交叉对照设计,纳入的30名脑卒中患者随机分为2组。第一组:BWSTT同步tDCS治疗1周,间隔3d后进行BWSTT同步安慰tDCS治疗1周;第2组的治疗顺序与第1组相反。tDCS阳极电极片置于辅助运动区(supplementary motor area, SMA),阴极电极片置于枕骨粗隆,电流强度1mA,20min/次,1次/d。每次干预前和干预后第2天进行10MWT和“起立-行走”计时测试(Timed Up and Go test, TUG),结果发现BWSTT同步tDCS组较BWSTT同步安慰tDCS组在10 MWT、TUG差异具有显著性意义(均 $P<0.05$ )。说明BWSTT同步tDCS治疗可显著改善脑卒中患者的步行功能。Wong PL<sup>[23]</sup>探讨先tDCS后步行机训练的时序治疗对慢性期脑卒中患者双任务步态和皮质兴奋性的影响。患者被随机分为3组:双侧tDCS和步行机训练组、阴极tDCS和步行机训练组、假tDCS和步行机训练组。双侧tDCS和步行机训练组的阳性电极片置于患侧M1区,阴性电极片置于健侧M1区;阴极tDCS和步行机训练组的阳性电极片置于患侧眶上区域,阴性电极片置于健侧M1区;假tDCS和步行机训练组的电极片放置方法同阴极tDCS和步行机训练组。在tDCS治疗20min之后,再进行30min的步行机训练,每周干预3次,共4周。结果发现,阴极tDCS+步行机训练组较其他组在提高速度方面,差异均有显著性意义( $P<0.05$ ),阴极tDCS+步行机训练组的MEP波幅变化较假tDCS+步行机训练组差异有显著性意义( $P<0.05$ )。说明先阴极tDCS后进行步行机训练对提高患者行走速度更明显,对降低健侧皮质活动兴奋性更显著。金明滢等<sup>[24]</sup>观察tDCS联合Walker View步行训练系统对早期脑卒中患者步行能力的影响。患者随机分为对照组和观察组,对照组给予常规康复治疗,观察组在对照组的基础上增加tDCS同步Walker View步行训练。阳极电极片置于于头部C3或C4运动区,阴极电极片置于肩部,电流1.0—20mA,同步进行Walker View步行训练。治疗时间为30min,6次/周,连续治疗8周。结果发现,治疗后观察组步行功能(functional ambulation category scale, FAC)等级,FMA-LE、BBS评分、患者的步速、患侧负重均高于对照组,且差异有显著性意义( $P<0.05$ )。说明tDCS同步Walker View步行训练能提高脑中患者步行功能。

临床研究表明,康复干预有助于改善特定脑区间连

接<sup>[25-27]</sup>。卒中后恢复期间,运动网络连接发生重组,且与行为学的改善有关<sup>[28-29]</sup>。动物实验也证实了连续3天,每天1次,电流强度为250 $\mu$ A,持续时间20min的tDCS可以提高运动皮层梗死的亚急性期(梗死72h后)小鼠的运动功能<sup>[30]</sup>的恢复速度,增加运动和体感皮层之间的功能连接。

### 2.3 中枢性干预联合下肢机器人步行训练

**2.3.1 头针联合下肢机器人:**陈菲<sup>[31]</sup>研究了头针同步下肢机器人对脑卒中患者步行功能、平衡功能的影响。头针穴位选取健侧顶颞前斜线上1/5段及顶颞后斜线上1/5段,每次针刺行针后需留针,留针期间进行康复训练,治疗时长为40min,1次/d,1周连续治疗6d,休息1d,共治疗6周。结果发现,所有患者FAC、BBS、FMA-LE、MBI经治疗2周、4周及6周后均有明显改善,差异有显著性意义( $P<0.05$ );说明头针同步下肢机器人对改善脑卒中患者步行功能的疗效更优。武云昊<sup>[32]</sup>研究头针同步下肢机器人对脑卒中后患者步行功能的影响。患者被随机分为A、B、C组,A组:头针治疗组,B组:下肢机器人组,C组:头针同步下肢机器人组。治疗方案:头针取穴按照国际头针标准化方案,留针30min,下肢机器人步行速度根据患者病情控制在0.5—1.2km/h,治疗时间30min;1次/d,6d/周,总治疗4周。在治疗前、治疗4周后进行步态分析仪检测患者步态等功能评估。结果:①3组患者治疗前后对比,步长、步速均差异具有显著性意义(均 $P<0.05$ ),治疗4周后C组的步长、步速、步宽与A、B组比较差异均具有显著性意义(均 $P<0.05$ )。说明头针同步下肢机器人的治疗方法能更有效提高脑卒中患者步行能力。Zhang SH等<sup>[33]</sup>研究了头皮针同步或非同步下肢机器人步行训练对亚急性期脑卒中患者步态、步行功能、平衡功能及下肢运动功能的影响。头针穴位选择病灶侧顶颞前斜线(MS6)、顶颞后斜线(MS7)上1/5区域,留针时间为30min/次,1次/d,6次/周,连续治疗8周。在治疗8周后及随访时,均发现同步组的6min步行试验(6-minute walking test,6MWT)、BBS、FMA-LE、MBI优于干预前及非同步组(均 $P<0.05$ );且干预后维持效果优于非同步组。吴月峰<sup>[34]</sup>等人的研究观察了不同头针穴位同步下肢机器人辅助步行训练对脑卒中患者步态的影响。该研究的头针穴位取病灶侧的顶颞前斜线上2/5区、平衡区、运动前区,每次留针45min,1次/d,5d/周,共治疗8周。结果发现,头针同步下肢机器人辅助步行训练可以改善脑卒中患者步幅、步速等步态参数及髋、膝、踝关节峰值力矩,提示头针同步下肢机器人辅助步行训练能更好地改善脑卒中患者步态。有人对头针改善步行功能的机制进行了研究,发现针刺可以激活运动相关皮层,调控脑功能重组<sup>[35]</sup>。最近的一项研究结果表明,针刺也可以调控存在运动功能障碍的脑卒中患者的动态脑网络连接<sup>[36]</sup>。

**2.3.2 tDCS联合下肢机器人:**Seo HG<sup>[37]</sup>探讨tDCS联合机器

人辅助步态训练(robotic-assisted gait training,RAGT)对脑卒中患者步行功能的疗效。将符合条件的患者随机分配至安慰tDCS刺激协同RAGT组或tDCS协同RAGT组,两组患者分别进行20min的安慰tDCS刺激或20min、2mA的tDCS治疗(阳极电极片置于患侧M1区,阴极电极片置于健侧眼眶上缘)后,再进行45min的RAGT治疗,1次/d,共治疗2周。分别于治疗前、治疗2周后和治疗结束后4周进行FAC、10MWT、6MWT等评估。结果显示,tDCS协同RAGT组的FAC及6MWT变化率较安慰tDCS协同RAGT组差异有显著性意义(均 $P<0.05$ ),而其他指标2组间差异均无显著性意义(均 $P>0.05$ )。说明tDCS联合RAGT能改善脑卒中患者的步行功能。

**2.3.3 镜像疗法联合下肢机器人:**曲斯伟等<sup>[38]</sup>研究镜像疗法(mirror therapy,MT)联合下肢康复机器人对早期脑卒中患者步行功能、平衡功能及下肢运动功能的影响。患者随机分为对照组、机器人组和联合组,对照组给予常规药物及康复治疗,机器人组在对照基础上给予下肢康复机器人辅助步行训练,联合组在机器人组基础上增加MT。观察指标:FAC、BBS、FMA-LE。每次治疗20min,1次/d,5天/周,连续治疗4周。结果发现,3组治疗后患者的FAC、BBS、FMA-LE评分较治疗前有所改善,在改善程度上,联合组>机器人组>对照组,差异有显著性意义( $P<0.05$ )。说明MT联合下肢康复机器人对提高脑卒中患者步行功能、平衡功能及下肢运动功能的效果更显著。

**2.3.4 脑-肢协同模式中周对中枢的作用:**研究证实,步行机上进行步行训练可以提高卒中后存在肌张力障碍的患者在行走过程中的健侧步长,同时干预结束后随访期时进行踝关节背屈时下肢运动皮层代表区、双侧中央前回、双侧中央后回、双侧SMA、双侧顶叶、双侧缘上回及右侧角回到干预等激活脑区体积明显减小。机器人辅助下进行步行功能训练可以提高步行速度及下肢平衡功能,日常生活能力,激活双侧半球皮层,但患侧半球激活更显著(未对具体脑区进行探索)<sup>[39]</sup>。使用基于神经反馈的运动想象训练可以提高病程超过3个月存在中到重度步行功能障碍的慢性卒中患者的起立-行走测试速度,激活SMA,增强SMA与腹侧运动前区(pre-motor area,PMA)间的静息态功能连接<sup>[40]</sup>。单次外骨骼训练可调节慢性卒中患者的短时程神经可塑性。非优势半球(右侧半球)损伤的患者中,外骨骼训练诱导的脑部激活与在健康受试者中观察到的相似,具体表现为:健侧大脑感觉运动皮质(sensorimotor cortex,SMC)和患侧前额叶皮层区(prefrontal cortex,PFC) $\alpha 1$ 和 $\alpha 2$ 节点强度增加;非优势半球(左侧半球)卒中的患者在 $\alpha 2$ ,外骨骼训练行走和无外骨骼训练行走后,所有SMC的顶点上的节点强度都有所增加,脑网络连接中的介数中心性在同一区域下降,表明损伤侧化在网

络重组中的作用<sup>[41]</sup>。

### 3 小结与展望

本文对近些年来“脑-肢协同”治疗(同步或非同步)对脑卒中患者步行功能疗效的相关研究进行了综述。基于助行训练的“脑-肢协同”治疗模式是在步行训练的基础上,再给予中枢联合外周的同步或非同步(序贯)治疗,通过多器官多靶点协同治疗,影响脑的可塑性,提高脑卒中患者步行功能的恢复能力。

目前的研究证实,“脑-肢协同”治疗对脑卒中后步行障碍患者的步行功能,如步速、步态参数等的改善疗效优于单一的康复治疗技术。“脑-肢协同”同步或非同步的干预疗效仍不一致。部分学者发现“脑-肢协同”同步治疗的干预时序效最佳<sup>[18-20,22,24,31-34,38]</sup>,也有学者证实“脑-肢协同”非同步治疗(先脑后肢)的干预疗效更优<sup>[21,23]</sup>。其干预疗效不一致的原因可能是由于:①纳入的研究对象病程不同(脑卒中患者有急性期、亚急性期、慢性期等)、脑卒中类型不同(脑梗死、脑出血)、病灶不同、步行功能障碍程度不同;②“脑-肢协同”治疗的脑、肢体的干预模式不同等因素有关。如:tDCS电极片的位置、电流大小、头针的取穴位置及留针时间等。目前发表的研究中样本量普遍偏小,多为单中心的非随机对照研究。因此未来需要多中心、大样本的随机对照试验来进一步明确“脑-肢协同”治疗不同时序的组合模式对不同等级步行功能障碍的干预效果,为脑卒中步行功能障碍患者寻求最佳的康复治疗方案。

### 参考文献

[1] GBD 2019 Stroke Collaborators. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990—2019: a systematic analysis for the global burden of disease study 2019[J]. *The Lancet Neurology*, 2021,20(10):795—820.

[2] Feigin VL, Brainin M, Norrving B, et al. World Stroke Organization (WSO): Global Stroke Fact Sheet 2022[J]. *Int J Stroke*, 2022,17(1):18—29.

[3] Zhao HL, Huang Y. Lifetime risk of stroke in the global burden of disease study[J]. *N Engl J Med*, 2019,380(14):1377—1378.

[4] 王陇德, 彭斌, 张鸿祺, 等. 《中国脑卒中防治报告2020》概要[J]. *中国脑血管病杂志*, 2022,19(2):136—144.

[5] Ma QF, Li R, Wang LJ, et al. Temporal trend and attributable risk factors of stroke burden in China, 1990—2019: an analysis for the global burden of disease study 2019[J]. *The Lancet Public Health*, 2021,6(12):e897—e906.

[6] Virani SS, Alonso A, Aparicio HJ, et al. Heart disease and stroke statistics-2021 update: a report from the Ameri-

can Heart Association[J]. *Circulation*, 2021,143(8):e254—e743.

[7] Veerbeek JM, Van Wegen EEH, Harmeling VDWBC, et al. Is accurate prediction of gait in nonambulatory stroke patients possible within 72 hours poststroke?[J]. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2011,25(3):268—274.

[8] 张通, 赵军. 《中国脑卒中早期康复治疗指南》[J]. *中华神经科杂志*, 2017,32(12):9.

[9] Krakauer JW. Motor learning: its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation[J]. *Current Opinion in Neurology*, 2006,19(1):84—90.

[10] 燕铁斌. 优化脑卒中后行走康复策略:从助行训练到脑-肢体协同治疗[J]. *康复学报*, 2022,32(1):6—9.

[11] Rossignol S, Dubuc R, Gossard JP. Dynamic sensorimotor interactions in locomotion[J]. *Physiological Reviews*, 2006,86(1):89—154.

[12] Kido TA, Stein RB. Short-term effects of functional electrical stimulation on motor-evoked potentials in ankle flexor and extensor muscles[J]. *Experimental Brain Research*, 2004,159(4):491—500.

[13] Chang JL, Lin RY, Saul M, et al. Intensive seated robotic training of the ankle in patients with chronic stroke differentially improves gait[J]. *NeuroRehabilitation*, 2017,41(1):61—68.

[14] Grossman N, Bono D, Dedic N, et al. Noninvasive deep brain stimulation via temporally interfering electric fields [J]. *Cell*, 2017,169(6):1029—1041.

[15] Di PG, Pellegrino G, Assenza G, et al. Modulation of brain plasticity in stroke: a novel model for neurorehabilitation[J]. *Nature Reviews Neurology*, 2014,10(10):597—608.

[16] 燕铁斌. 脑病康复新模式:从治疗肢体到脑-肢体协同调控 [J]. *华西医学*, 2018,33(10):1201—1206.

[17] 燕铁斌. 积极开展“脑-肢协同治疗技术”的临床应用研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2021,36(10):1195—1197.

[18] Mitsutake T, Sakamoto M, Nakazono H, et al. The effects of combining transcranial direct current stimulation and gait training with functional electrical stimulation on trunk acceleration during walking in patients with subacute stroke[J]. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 2021,30(4):105635.

[19] 陈汉波, 郑修元, 吕晓, 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.

[20] 郑修元, 陈汉波, 吕晓, 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.

[21] 何晓阔, 刘慧华, 余果, 等. 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.
- [22] Manji A, Amimoto K, Matsuda T, et al. Effects of transcranial direct current stimulation over the supplementary motor area body weight-supported treadmill gait training in hemiparetic patients after stroke[J]. *Neuroscience Letters*, 2018,662:302—305.
- [23] Wong PL, Yang YR, Huang SF, et al. Effects of transcranial direct current stimulation followed by treadmill training on dual-task walking and cortical activity in chronic stroke: a double-blinded randomized controlled trial[J]. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 2023,55:379.
- [24] 金明滢, 王俊华, 刘飞, 等. 经颅直流电刺激结合 Walker View 步行训练系统对早期脑卒中患者步行功能的影响[J]. 湖北医药学院学报, 2020,39(3):244—248.
- [25] Liu X, Zhang W, Li W, et al. Effects of motor imagery based brain-computer interface on upper limb function and attention in stroke patients with hemiplegia: a randomized controlled trial[J]. *BMC Neurol*, 2023,23(1):136.
- [26] Wang H, Xiong X, Zhang K, et al. Motor network reorganization after motor imagery training in stroke patients with moderate to severe upper limb impairment[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2023,29(2):619—632.
- [27] Naro A, Pignolo L, Calabro RS. Brain network organization following post-stroke neurorehabilitation[J]. *Int J Neural Syst*, 2022,32(4):2250009.
- [28] Grefkes C, Fink GR. Connectivity-based approaches in stroke and recovery of function[J]. *Lancet Neurol*, 2014,13(2):206—216.
- [29] Siegel JS, Seitzman BA, Ramsey LE, et al. Re-emergence of modular brain networks in stroke recovery[J]. *Cortex*, 2018,101:44—59.
- [30] Longo V, Barbati SA, Re A, et al. Transcranial direct current stimulation enhances neuroplasticity and accelerates motor recovery in a stroke mouse model[J]. *Stroke*, 2022,53(5):1746—1758.
- [31] 陈菲, 许静, 郭翠英, 等. 头针联合 Lokomat 下肢机器人治疗脑梗死患者下肢运动功能障碍疗效观察[J]. 中医药临床杂志, 2021, 33(2): 326—330.
- [32] 武云昊. 下肢机器人配合头针疗法治疗脑卒中患者步行功能障碍的临床观察[D]. 长沙:湖南中医药大学, 2018.
- [33] Zhang SH, Wang YL, Zhang CX, et al. Effects of interactive dynamic scalp acupuncture on motor function and gait of lower limbs after stroke: a multicenter, randomized, controlled clinical trial[J]. *Chinese Journal of Integrative Medicine*, 2022,28(6):483—491.
- [34] 吴月峰, 蔡镏杰, 董晓琼, 等. 头针治疗联合下肢机器人辅助步行训练改善脑卒中偏瘫患者步态的疗效观察[J]. 浙江医学, 2022,44(3):269—273, 278.
- [35] Fu CH, Li KS, Ning YZ, et al. Altered effective connectivity of resting state networks by acupuncture stimulation in stroke patients with left hemiplegia: a multivariate granger analysis[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2017,96(47):e8897.
- [36] Wang Y, Lu M, Liu R, et al. Acupuncture alters brain's dynamic functional network connectivity in stroke patients with motor dysfunction: a randomised controlled neuroimaging trial[J]. *Neural Plasticity*, 2023, 2023: 8510213—8510214.
- [37] Seo HG, Lee WH, Lee SH. Robotic-assisted gait training combined with transcranial direct current stimulation in chronic stroke patients: a pilot double-blind, randomized controlled trial[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2017, 35(5): 527—536.
- [38] 曲斯伟, 朱琳, 钱龙, 等. 镜像视觉反馈训练联合下肢康复机器人对脑卒中患者下肢运动功能的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2022,44(1):30—34.
- [39] Song KJ, Chun MH, Lee J, et al. The effect of robot-assisted gait training on cortical activation in stroke patients: a functional near-infrared spectroscopy study[J]. *NeuroRehabilitation*, 2021,49(1):65—73.
- [40] Mihara M, Fujimoto H, Hattori N, et al. Effect of neurofeedback facilitation on poststroke gait and balance recovery: a randomized controlled trial[J]. *Neurology*, 2021,96(21):e2587—e2598.
- [41] Molteni F, Formaggio E, Bosco A, et al. Brain connectivity modulation after exoskeleton-assisted gait in chronic hemiplegic stroke survivors: a pilot study[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2020,99(8):694—700.