

# 高精度经颅直流电刺激联合悬吊运动训练对脑卒中患者下肢运动功能的影响

张海泉<sup>1</sup>, 胡川<sup>1</sup>, 黄磊<sup>2</sup>, 路伟<sup>1</sup>, 王欣<sup>1\*</sup>

1 山东大学附属山东省立第三医院, 山东 济南 250031;

2 山东鄄城县中医医院, 山东 鄄城 274700

\* 通信作者: 王欣, E-mail: 18530915@qq.com

收稿日期: 2023-09-25; 接受日期: 2023-12-05

基金项目: 山东省中医药科技项目(2020M047, Q-2022100); 山东省中医药高层次人才培养项目(2022-148);

山东省医药卫生科技项目(202316010540)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2024.02003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**摘要** **目的** 观察高精度经颅直流电刺激(HD-tDCS)联合悬吊运动训练对脑卒中患者下肢运动功能的影响。**方法** 选择2022年1月—2023年2月在山东大学附属山东省立第三医院康复医学部住院治疗的脑卒中患者120例,按照随机数字表法分为对照组、HD-tDCS组、悬吊组和联合治疗组,每组30例。治疗过程中有4例因中途出院无法继续接受治疗而脱落,其中对照组3例,HD-tDCS组1例,最终对照组、HD-tDCS组、悬吊组和联合治疗组分别纳入27、29、30、30例。对照组接受运动疗法和神经肌肉电刺激等常规康复治疗,25 min/d,1次/d,5 d/周,持续治疗8周;HD-tDCS组在对照组基础上接受HD-tDCS治疗,主要刺激电极置于偏瘫侧脑初级运动皮层M1区(C3/C4),4个接受极分别置于M1区四周约3.5 cm处的C1/C2、C5/C6、FC3/FC4、CP3/CP4区,电流恒定强度2 mA,电流起伏时间30 s,20 min/次,1次/d,5 d/周,持续治疗8周;悬吊组在对照组基础上接受偏瘫侧下肢分离组合运动、动态闭链稳定运动、骨盆摆动和放松运动等悬吊运动训练,25 min/次,1次/d,5 d/周,持续治疗8周;联合治疗组在对照组基础上接受HD-tDCS联合悬吊运动训练。分别于治疗前和治疗4、8周后,采用Fugl-Meyer运动能量表下肢部分(FMA-LE)评定患者下肢运动功能;采用Berg平衡量表(BBS)评定患者平衡功能;采用功能性步行力量表(FAC)评定患者功能性步行能力;采用视频步态分析系统评定患者步态时空参数(步频、步速、步长和步行周期)。**结果** 与治疗前比较,4组治疗4、8周后FMA-LE评分、BBS评分、FAC等级及步态时空参数(步频、步速、步长和步行周期)均明显提高,差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。与对照组、HD-tDCS组、悬吊组同一时间点比较,联合治疗组治疗4、8周后FMA-LE、BBS评分均明显更高,治疗8周后FAC等级及步态时空参数(步频、步速、步长及步行周期)均明显更高,差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。**结论** HD-tDCS联合悬吊运动训练可有效提高脑卒中患者下肢运动功能、平衡能力和步行能力,值得临床推广应用。

**关键词** 脑卒中;高精度经颅直流电刺激;悬吊运动训练;下肢运动功能;平衡功能;步行能力

脑卒中是指各种原因造成的脑血管循环障碍,具有高致残率的特点<sup>[1]</sup>。我国脑卒中患者群体呈逐年增加的趋势<sup>[2]</sup>。脑卒中患者经过治疗后仍存在不同程度的功能障碍,其中约70%患者行走明显异

常<sup>[3]</sup>,严重影响其日常生活。脑卒中后行走耗能、耗时过大是康复功能改善的难题。常规康复训练虽然能够科学有效地改善相应功能障碍,但康复周期过长,无法有效针对不同功能障碍进行康复训练,

引用格式: 张海泉, 胡川, 黄磊, 等. 高精度经颅直流电刺激联合悬吊运动训练对脑卒中患者下肢运动功能的影响[J]. 康复学报, 2024, 34(2): 110-116.

ZHANG H Q, HU C, HUANG L, et al. Therapeutic effect of high-definition transcranial direct current stimulation combined with suspension exercise training on lower limb motor function of stroke patients [J]. Rehabil Med, 2024, 34(2): 110-116.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2024.02003

康复效果大打折扣<sup>[4]</sup>。

高精度经颅直流电刺激(high-definition transcranial direct current stimulation, HD-tDCS)是改变患侧大脑皮质区神经元活动程度的一种非侵袭性神经调控技术,通过在特定且恒定的密度直流电作用下刺激相应功能区,起到加速中枢神经损伤后重组的效果,已成为临床康复方案中应用较为广泛的治疗方法<sup>[5]</sup>。HD-tDCS打破传统tDCS空间分辨率不足的现象<sup>[6]</sup>,通过更小型电极面积,具有更强空间聚焦性。但HD-tDCS治疗只注重特定大脑皮层的中枢激活,缺乏与运动控制有关的外周刺激。悬吊运动训练作为脑卒中患者运动功能改善的有效方法<sup>[7]</sup>,基于“弱链测试”理论,精准找到薄弱环节,进行特定强化,可提高患者运动功能,但悬吊运动训练针对运动神经的刺激输入较弱。目前,“精准康复”和“脑-肢体协同治疗”理念逐渐应用于脑卒中后康复<sup>[8-9]</sup>,但在上述理念指导下开展的针对下肢运动功能恢复的研究较少。前期研究显示,采用中枢刺激结合悬吊运动可有效改善脑卒中后下肢运动功能障碍<sup>[10-11]</sup>。本研究基于“脑-肢体协同治疗”理论,采用HD-tDCS联合悬吊运动训练干预脑卒中后下肢运动功能障碍患者,取得良好疗效。

## 1 临床资料

### 1.1 病例选择标准

**1.1.1 诊断标准** 符合《中国各类主要脑血管病诊断要点2019》<sup>[12]</sup>关于脑卒中的诊断标准,并经颅脑CT或MRI确诊。

**1.1.2 纳入标准** ①首次发病;②年龄20~80岁;③病程≤3个月;④简易智力精神状态检查(mini-

mental state examination, MMSE)量表评分≥24分,无严重认知功能障碍;⑤改良Ashworth评定量表(modified Ashworth scale, MAS)级别<2级;⑥下肢Brunnstrom偏瘫分级≥3期;⑦Holden步行功能分级≥2级;⑧研究对象或家属知情同意并自愿签署知情同意书。

**1.1.3 排除标准** ①患者生命体征不稳定;②严重疼痛不耐受;③头部皮肤大面积破损或颅骨瓣缺损;④心脏有金属植入物;⑤头部有金属或电子植入物。

**1.1.4 中止和脱落标准** ①患者对训练强度无法继续耐受,主动申请退出;②训练过程中出现严重病情变化,需要中止试验;③中途出院无法继续接受治疗。

### 1.2 一般资料

采用G·Power 3.1.9.7软件对样本量进行估算,选择F检验作为检验模型,双侧检验priori分析,效应量=0.38,  $\alpha=0.05$ ,统计检验 $(1-\beta)=0.8$ ,组数为4,计算得出每组最少20名患者。本研究选择2022年1月—2023年2月在山东大学附属山东省立第三医院康复医学部住院治疗的脑卒中患者120例,按随机数字表法分为对照组、HD-tDCS组、悬吊组和联合治疗组,每组30例。治疗过程中有4例因中途出院无法继续接受治疗而脱落,其中对照组3例,HD-tDCS组1例,最终4组分别纳入27、29、30、30例。4组患者性别、年龄、脑卒中类型、病程、偏瘫侧等一般资料比较,差异均无统计学意义( $P>0.05$ ),具有可比性,见表1。本研究方案已通过山东省立第三医院伦理委员会批准(审批号:KYLL-2021009)和中国临床试验注册(备案号:MR-37-23-001915)。

表1 4组一般资料比较( $\bar{x}\pm s$ )

Table 1 Comparison of general data in four groups ( $\bar{x}\pm s$ )

组别	例数	性别		年龄/ $(\bar{x}\pm s)$ ,岁	脑卒中类型		病程/ $(\bar{x}\pm s)$ ,月	偏瘫侧	
		男	女		脑出血	脑梗死		左侧	右侧
对照组	27	18	9	55.44±2.70	14	13	1.78±0.15	13	14
HD-tDCS组	29	19	10	55.66±2.67	16	13	1.72±0.15	13	16
悬吊组	30	21	9	53.80±2.95	17	13	1.67±0.84	17	13
联合治疗组	30	20	10	56.77±2.35	16	14	1.63±0.16	14	16

## 2 方法

### 2.1 治疗方法

**2.1.1 对照组** 接受常规康复治疗,包括运动疗法和神经肌肉电刺激。25 min/次,1次/d,5 d/周,持续治疗8周。

**2.1.1.1 运动疗法** 运动疗法训练包括肌肉放松、下肢被动活动度训练、肌力训练、定向翻身训练、坐位平衡训练和辅助步行训练。

**2.1.1.2 神经肌肉电刺激** 对股四头肌、臀大肌和胫前肌进行神经肌肉电刺激治疗,频率固定中频模

式,强度5 mA。

**2.1.2 HD-tDCS组** 在对照组基础上接受HD-tDCS治疗,20 min/次,1次/d,5 d/周,持续治疗8周。采用4×1智能HD-tDCS仪(美国Soterix Medical公司)进行HD-tDCS治疗。由中心刺激电极和4个接受电极组成,将5个电极片(大小均为3.5 cm<sup>2</sup>)按照国际标准10-20脑电图(electroencephalography, EEG)帽进行放置<sup>[13]</sup>,刺激电极置于偏瘫侧脑初级运动皮层M1区(C3/C4),4个接受电极分别置于M1区四周约3.5 cm处的C1/C2、C5/C6、FC3/FC4、CP3/CP4区<sup>[14]</sup>,并用弹力绷带单层缠绕固定帽子。电流恒定强度2 mA,电流从开始(0)到最高强度以及最高强度到结束(0)的时间均设置为30 s。

**2.1.3 悬吊组** 在对照组基础上接受悬吊运动训练。25 min/次,1次/d,5 d/周,持续治疗8周。

**2.1.3.1 偏瘫侧下肢分离组合运动** 患者健侧卧位,悬吊带将患侧膝、踝关节吊离床面,与髌关节保持同一高度,嘱患者进行髌、膝关节屈伸动作;患者仰卧位,将患侧下肢踝关节吊离床面,高度超过躯干,嘱患者进行下肢内收、外展动作。上述动作每组20次,每组间隔30 s,共5组。

**2.1.3.2 动态闭链稳定运动** 患者四点跪位,通过2条腰部专用悬吊带悬挂于胸前和腹部,嘱患者抬头,做躯干前屈、后伸动作,期间保证患者呼吸通畅,每组10次,每组间隔60 s,共5组。

**2.1.3.3 骨盆摆动和放松运动** 患者仰卧位,通过腰部专用悬吊带将腰部及骨盆吊离床面,高度5~10 cm,嘱患者进行左右摇摆运动,根据患者个体差异,通过改变两侧弹力绳强度增加难度;腰部悬吊抬起时,治疗师对两边吊绳加以震动,降低患者躯干和腰部紧张。每组10次,每组间隔20 s,共5组。

**2.1.4 联合治疗组** 在对照组基础上接受HD-tDCS联合悬吊运动训练。在患者接受HD-tDCS治疗完毕后,即刻进行悬吊运动训练。训练方法同HD-tDCS组和悬吊组。

在治疗前应充分告知患者及家属HD-tDCS潜在风险,包括初始电流造成的轻微疼痛、电极贴过敏、头痛、恶心及皮肤灼伤等问题;治疗期间密切关注患者反应,及时做出调整。

## 2.2 观察指标

由同一位对本次试验分组和治疗内容不知情的专职治疗师于治疗前、治疗4周和8周后对患者进行以下指标评估。

**2.2.1 下肢运动功能** 采用Fugl-Meyer运动功能量表下肢部分(Fugl-Meyer assessment lower extremity, FMA-LE)评定患者下肢运动功能<sup>[15]</sup>。该量表包括17小项,总分34分,分值越高表明下肢运动功能越好。

**2.2.2 平衡功能** 采用Berg平衡量表(Berg balance scale, BBS)评定患者平衡功能<sup>[16]</sup>。该量表包括坐、站、转身等14个方面,总分56分,分值越高表明平衡功能越好。

**2.2.3 功能性步行能力** 采用功能性步行能力量表(functional ambulation category, FAC)评定患者功能性步行能力<sup>[17]</sup>。该量表包括6个等级,等级越高表明步行能力越强。

**2.2.4 步态时空参数** 采用视频步态分析系统(台湾龙骨王公司,型号:R019-5A)评定患者步态时空参数(步频、步速、步长及步行周期)<sup>[18]</sup>。评估在设有特定10 m跑道的房间内进行,保持室内充分安静。患者穿紧身裤或短裤,在跑道起始处沿着设定的直线跑道向动态捕捉摄像机前行走,直至显示屏完成记录。行走期间,评估治疗师在跑道外对患者进行保护以防跌倒。连续测试3次,取相应参数平均值。

## 2.3 统计学方法

采用SPSS 27.0统计软件进行数据分析。计量资料符合正态分布以( $\bar{x} \pm s$ )表示,组内多个时间点比较采用重复测量方差分析,组间比较采用单因素方差分析,组间两两比较使用Bonferroni检验。等级资料组内比较采用配对Wilcoxon秩和检验,组间比较采用Kruskal-Wallis *H*秩和检验,组间两两比较采用Nemenyi法检验。计数资料采用 $\chi^2$ 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 3 结果

### 3.1 4组治疗前后FMA-LE、BBS评分比较

与治疗前比较,4组治疗4、8周后FMA-LE、BBS评分均明显升高( $P < 0.05$ )。与对照组、HD-tDCS组、悬吊组同一时间点比较,联合治疗组治疗4、8周后FMA-LE、BBS评分均明显更高( $P < 0.05$ )。见表2。

### 3.2 4组治疗前后FAC等级比较

与治疗前比较,4组治疗4、8周后FAC等级均明显升高( $P < 0.001$ )。与对照组、HD-tDCS组、悬吊组同一时间点比较,联合治疗组治疗8周后FAC等级均明显更高( $P < 0.001$ )。见表3。

表2 4组治疗前后FMA-LE、BBS评分比较( $\bar{x}\pm s$ )

组别	例数	时间	FMA-LE评分	BBS评分
对照组	27	治疗前	16.74±0.34	28.56±0.79
		治疗4周后	18.52±0.38 <sup>1)</sup>	30.74±0.71 <sup>1)</sup>
		治疗8周后	20.30±0.33 <sup>1)</sup>	34.70±0.52 <sup>1)</sup>
HD-tDCS组	29	治疗前	17.31±0.44	27.62±0.69
		治疗4周后	19.10±0.43 <sup>1)</sup>	32.07±0.65 <sup>1)</sup>
		治疗8周后	21.79±0.36 <sup>1)2)</sup>	37.38±0.37 <sup>1)</sup>
悬吊组	30	治疗前	17.33±0.45	27.27±0.78
		治疗4周后	19.23±0.41 <sup>1)</sup>	33.50±0.63 <sup>1)2)</sup>
		治疗8周后	22.77±0.34 <sup>1)2)</sup>	38.63±0.43 <sup>1)2)</sup>
联合治疗组	30	治疗前	16.33±0.55	27.97±1.00
		治疗4周后	21.27±0.35 <sup>1)2)3)4)</sup>	36.40±0.85 <sup>1)2)3)4)</sup>
		治疗8周后	24.97±0.38 <sup>1)2)3)4)</sup>	42.67±1.07 <sup>1)2)3)4)</sup>

注:与治疗前比较,1)  $P<0.05$ ;与对照组同一时间点比较,2)  $P<0.05$ ;与HD-tDCS组同一时间点比较,3)  $P<0.05$ ;与悬吊组同一时间点比较,4)  $P<0.05$ 。

Note: Compared with that before treatment, 1)  $P<0.05$ ; compared with the control group at the same time, 2)  $P<0.05$ ; compared with the HD-tDCS group at the same time, 3)  $P<0.05$ ; compared with the suspension group at the same time, 4)  $P<0.05$ .

表3 4组治疗前后FAC等级比较( $\bar{x}\pm s$ )

组别	治疗前					治疗4周后					治疗8周后					Z值	P值			
	0级	1级	2级	3级	4级	5级	0级	1级	2级	3级	4级	5级	0级	1级	2级			3级	4级	5级
对照组	0	0	18	9	0	0	0	0	15	12	0	0	0	0	2	20	5	0	36.033	<0.001
HD-tDCS组	0	0	21	8	0	0	0	0	17	12	0	0	0	0	1	24	4	0	41.333	<0.001
悬吊组	0	0	23	7	0	0	0	0	19	11	0	0	0	0	1	23	6	0	48.317	<0.001
联合治疗组	0	0	22	8	0	0	0	0	18	11	1	0	0	0	0	14	13	3	53.416	<0.001
Z值	0.724					0.358					16.496									
P值	0.867					0.949					<0.001									

### 3.3 4组治疗前后步态时空参数比较

与治疗前比较,4组治疗4、8周后步频、步速、步长及步行周期均明显提高( $P<0.05$ )。与对照组、HD-tDCS组、悬吊组同一时间点比较,联合治疗组治疗8周后步频、步速、步长及步行周期均明显更高( $P<0.05$ )。见表4。

## 4 讨论

### 4.1 HD-tDCS联合悬吊运动训练可有效改善脑卒中患者下肢运动功能

本研究结果显示,与对照组、HD-tDCS组和悬吊组比较,联合治疗组治疗4、8周后FMA-LE评分均明显更高,提示HD-tDCS联合悬吊运动训练可有效改善脑卒中患者下肢运动功能。可能与以下因素有关:① HD-tDCS系统更安全地将刺激强度恒定

维持在患者可耐受的最适量,调节系统可根据设定处方自动调节至规定强度,实时监测恒定电流强度的变化,实时监测治疗过程中的异常情况,保证患者接受最优靶点刺激,同时还保障患者安全,可以最大程度地激活脑卒中患者运动皮质区。② HD-tDCS阳极与阴极同步作用于脑卒中患者大脑皮质M1区,HD-tDCS的即刻作用可促进神经细胞的募集<sup>[19]</sup>,加速大脑功能重组速率,以此改变相关膜通道、膜电位极化机制,增加脑血流灌注,提高神经传导通路,激活内稳态机制,纠正大脑皮质区电位失衡现象<sup>[20]</sup>。③ 悬吊运动训练遵循阶梯式原则逐渐增加训练难度,可稳步提升脑卒中患者运动时的力量控制能力,尤其能使运动神经中枢对肌肉的传导速率优化到最佳状态,达到改善下肢整体运动功能

的目的。这与刘英姣和陈爱连<sup>[21]</sup>研究发现悬吊运动训练可以改善脑卒中患者下肢运动功能的结论一致。HD-tDCS治疗主要在于激活脑卒中患者运

动皮层,而悬吊运动训练注重提高脑卒中患者运动神经中枢对运动的控制能力,二者联合可起到互补效应,协同改善脑卒中患者下肢运动功能。

表4 4组治疗前后步态时空参数比较( $\bar{x}\pm s$ )

Table 4 Comparison of spatial parameters of gait in four groups before and after treatment ( $\bar{x}\pm s$ )

组别	例数	时间	步频/(步/s)	步速/(m/s)	步长/cm	步行周期/s
对照组	27	治疗前	1.03±0.03	23.63±1.31	23.93±0.93	2.40±0.06
		治疗4周后	1.09±0.03 <sup>1)</sup>	26.19±1.40 <sup>1)</sup>	26.37±0.95 <sup>1)</sup>	2.24±0.06 <sup>1)</sup>
		治疗8周后	1.26±0.02 <sup>1)</sup>	33.70±1.54 <sup>1)</sup>	35.00±0.68 <sup>1)</sup>	2.05±0.05 <sup>1)</sup>
HD-tDCS组	29	治疗前	1.05±0.03	24.48±1.23	24.38±0.83	2.35±0.06
		治疗4周后	1.10±0.03 <sup>1)</sup>	26.34±1.19 <sup>1)</sup>	26.66±0.82 <sup>1)</sup>	2.20±0.06 <sup>1)</sup>
		治疗8周后	1.30±0.02 <sup>1)</sup>	35.34±1.37 <sup>1)</sup>	36.03±0.77 <sup>1)</sup>	2.00±0.04 <sup>1)</sup>
悬吊组	30	治疗前	1.06±0.03	24.73±1.26	24.77±0.95	2.31±0.06
		治疗4周后	1.11±0.03 <sup>1)</sup>	27.00±1.28 <sup>1)</sup>	27.00±0.94 <sup>1)</sup>	2.17±0.05 <sup>1)</sup>
		治疗8周后	1.30±0.02 <sup>1)</sup>	36.10±1.57 <sup>1)</sup>	36.13±0.80 <sup>1)</sup>	1.93±0.04 <sup>1)</sup>
联合治疗组	30	治疗前	1.03±0.04	25.03±1.39	25.50±0.94	2.23±0.04
		治疗4周后	1.13±0.03 <sup>1)</sup>	29.53±1.42 <sup>1)</sup>	27.40±0.93 <sup>1)</sup>	2.05±0.04 <sup>1)</sup>
		治疗8周后	1.44±0.03 <sup>1)2)3)4)</sup>	42.80±1.85 <sup>1)2)3)4)</sup>	40.20±0.86 <sup>1)2)3)4)</sup>	1.77±0.03 <sup>1)2)3)4)</sup>

注:与治疗前比较,1)  $P<0.05$ ;与对照组同一时间点比较,2)  $P<0.05$ ;与HD-tDCS组同一时间点比较,3)  $P<0.05$ ;与悬吊组同一时间点比较,4)  $P<0.05$ 。

Note: Compared with that before treatment, 1)  $P<0.05$ ; compared with the control group at the same time, 2)  $P<0.05$ ; compared with the HD-tDCS group at the same time, 3)  $P<0.05$ ; compared with the suspension group at the same time, 4)  $P<0.05$ .

#### 4.2 HD-tDCS联合悬吊运动训练可有效改善脑卒中患者平衡功能

本研究结果显示,与对照组、HD-tDCS组和悬吊组同一时间点比较,联合治疗组治疗4、8周后BBS评分均明显更高,提示HD-tDCS结合悬吊运动训练可有效改善脑卒中患者平衡功能。可能与以下因素有关:① HD-tDCS以M1区为刺激中心点,可增强刺激区与辅助运动皮质的连接,能够更持久地提高各脑区之间的连接兴奋性,特别是强化脑卒中患者脑皮质平衡区域的连接,从而提高静态平衡能力<sup>[22]</sup>。这与熊艺妮等<sup>[23]</sup>研究结果一致。② 悬吊运动训练根据患者功能障碍程度,通过设定特殊训练动作,可以有效改善脑卒中患者的肌肉控制策略。如试验中嘱患者四点跪位,患侧躯干在悬吊减重下做屈伸运动,通过安全的闭链动作设计,可有效提高躯干的整体控制能力;患者仰卧位时,将其腰部悬空吊起,通过治疗师对两边吊绳的高频震动,可降低因紧张造成的躯干肌肉紧张<sup>[24]</sup>,以强化整体平衡功能。HD-tDCS联合悬吊运动训练既促进了脑卒中患者双侧半球脑皮质区平衡,又弥补了悬吊平衡训练对脑区激活不足的情况,二者联合可协同改

善脑卒中患者平衡功能。

#### 4.3 HD-tDCS联合悬吊运动训练可有效改善脑卒中患者步行能力

人体行走过程既需要神经控制发挥作用,又需要躯干和下肢肌力的协同配合<sup>[25]</sup>,一旦这种机制被打破,机体便会失衡,造成步行能力下降。本研究结果显示,与对照组、HD-tDCS组和悬吊组同一时间点比较,联合治疗组治疗8周后FAC等级和步态时空参数均明显更高,提示HD-tDCS联合悬吊运动训练可有效改善脑卒中后步行能力。可能与本研究的“脑-肢体协同”治疗训练策略有关。在HD-tDCS与悬吊运动训练的双重作用下,可以深层激活脑卒中患者自发性神经网络运动活性,HD-tDCS后续效应机制还可进一步促进肌肉收缩幅度<sup>[26]</sup>,易化悬吊运动训练对肌肉的激活程度,二者结合可以达到“中枢-外周”的闭环治疗效果,进一步提高脑卒中患者的运动控制能力,从而改善步行能力。

### 5 小结

HD-tDCS联合悬吊运动训练可改善脑卒中患者下肢运动功能、平衡功能和步行能力,值得临床

推广应用。但本研究仍存在一些不足之处,如HD-tDCS刺激电极放置方式较单一,无法代表单独阴极、单独阳极或者多重交叉放置法的刺激结果;仅分析脑卒中患者肢体运动功能恢复情况,未对治疗前后脑血红蛋白或脑网络的变化进行探索等。后续研究可通过脑电图或近红外脑成像等技术对脑神经相关机制进行深入分析,探究“脑-肢体协同治疗”训练方案下的大脑皮层与运动功能恢复之间的关系,为脑卒中康复提供更科学的治疗方案。

## 参考文献

- [1] HUA J N, DONG J Y, CHEN G C, et al. Trends in cognitive function before and after stroke in China [J]. *BMC Med*, 2023, 21(1): 204.
- [2] KIM R K, KANG N, DESAI Z, et al. A meta-analysis on dual protocols for chronic stroke motor recovery: robotic training and tDCS [J]. *Appl Sci*, 2023, 13(3): 1992.
- [3] GONZÁLEZ-SANTOS J, RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ P, PARDO-HERNÁNDEZ R, et al. A cross-sectional study: determining factors of functional independence and quality of life of patients one month after having suffered a stroke [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2023, 20(2): 995.
- [4] POENARU A M, CIOROIANU G, BALSEANU A T, et al. Intermittent physical recovery has similar benefits to continuous physical recovery in patients in the acute and early sub-acute stages following a stroke [J]. *Exp Ther Med*, 2023, 25(6): 281.
- [5] SHAH S, CHHATBAR P Y, FELD J A, et al. Integrating tDCS into routine inpatient rehabilitation practice to boost post-stroke recovery [J]. *Brain Stimul*, 2020, 13(4): 953-954.
- [6] VILLAMAR M F, WIVATVONGVANA P, PATUMANOND J, et al. Focal modulation of the primary motor cortex in fibromyalgia using 4×1-ring high-definition transcranial direct current stimulation (HD-tDCS): immediate and delayed analgesic effects of cathodal and anodal stimulation [J]. *J Pain*, 2013, 14(4): 371-383.
- [7] 罗思嘉, 龚剑秋, 朱童, 等. 悬吊模式下的核心稳定性训练对脑卒中患者平衡功能的影响[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2023, 45(6): 517-521.  
LUO S J, GONG J Q, ZHU T, et al. Core stability training applying the sling exercise therapy pattern can significantly improve the balance of stroke survivors [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2023, 45(6): 517-521.
- [8] KLOMJA I W, ANEKSAN B. A randomized sham-controlled trial on the effects of dual-tDCS "during" physical therapy on lower limb performance in sub-acute stroke and a comparison to the previous study using a "before" stimulation protocol [J]. *BMC Sports Sci Med Rehabil*, 2022, 14(1): 68.
- [9] 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.  
YAN T B. Optimizing rehabilitation strategy for walking after stroke: from assisted walking training to brain-limb cooperative therapy [J]. *Rehabil Med*, 2022, 32(1): 6-9.
- [10] 尚颖, 卢秀艳, 胡川, 等. 芒针透刺结合悬吊运动对脑卒中早期下肢运动功能的影响[J]. *现代中西医结合杂志*, 2023, 32(4): 510-513.  
SHANG Y, LU X Y, HU C, et al. Effect of awn needle penetration combined with suspension exercise on motor function of lower limbs in early stage of stroke [J]. *Mod J Integr Tradit Chin West Med*, 2023, 32(4): 510-513.
- [11] 胡川, 杨晓, 顾莹, 等. 悬吊运动训练配合重复经颅磁刺激对脑卒中后Pusher综合征疗效分析[J]. *康复学报*, 2020, 30(5): 400-404.  
HU C, YANG X, GU Y, et al. Effect analysis on suspension exercise training combined with repetitive transcranial magnetic stimulation in the treatment of post-stroke pusher syndrome [J]. *Rehabil Med*, 2020, 30(5): 400-404.
- [12] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国各类主要脑血管病诊断要点2019[J]. *中华神经科杂志*, 2019, 52(9): 710-715.  
Chinese Society of Neurology, Chinese Stroke Society. Diagnostic criteria of cerebrovascular diseases in China (version 2019) [J]. *Chin J Neurol*, 2019, 52(9): 710-715.
- [13] FLEMING M K, ROTHWELL J C, SZTRIHAI L, et al. The effect of transcranial direct current stimulation on motor sequence learning and upper limb function after stroke [J]. *Clin Neurophysiol*, 2017, 128(7): 1389-1398.
- [14] MORTENSEN J, FIGLEWSKI K, ANDERSEN H. Combined transcranial direct current stimulation and home-based occupational therapy for upper limb motor impairment following intracerebral hemorrhage: a double-blind randomized controlled trial [J]. *Disabil Rehabil*, 2016, 38(7): 637-643.
- [15] 恽晓平. 康复疗法评定学[M]. 北京: 华夏出版社, 2005: 392-393.  
YUN X P. Evaluation and assessment for rehabilitation therapy [M]. Beijing: Huaxia Publishing House, 2005: 392-393.
- [16] KIM S J, LEE H J, HWANG S W, et al. Clinical characteristics of proper robot-assisted gait training group in non-ambulatory subacute stroke patients [J]. *Ann Rehabil Med*, 2016, 40(2): 183-189.
- [17] 于文强, 任富超, 石国宏, 等. 脑卒中后下肢步态分析的方法与应用[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(8): 1257-1263.  
YU W Q, REN F C, SHI G H, et al. Methods and application of gait analysis of lower limbs after stroke [J]. *Chin J Tissue Eng Res*, 2023, 27(8): 1257-1263.
- [18] 王欣, 胡川, 卢秀艳, 等. 功能性电刺激联合电针拮抗肌治疗脑卒中后痉挛型足下垂的疗效观察[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2021, 43(5): 396-400.  
WANG X, HU C, LU X Y, et al. Electroacupuncture enhances the effectiveness of electrical stimulation in treating spastic foot drop [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2021, 43(5): 396-400.
- [19] RADEL R, TEMPEST G, DENIS G, et al. Extending the limits of force endurance: stimulation of the motor or the frontal cortex? [J]. *Cortex*, 2017, 97: 96-108.
- [20] SHUN S W, MURATA S, FUJIKAWA S, et al. Effects of neuro-feedback training combined with transcranial direct current stimulation on motor imagery: a randomized controlled trial [J]. *Front*

- Neurosci, 2023, 17: 1148336.
- [21] 刘英姣, 陈爱连. 悬吊疗法 Neurac 技术在卒中中偏瘫患者康复中的应用[J]. 天津医药, 2021, 49(8): 878-882.
- LIU Y J, CHEN A L. Study on the application of Neurac suspension therapy in rehabilitation of stroke patients with hemiplegia [J]. Tianjin Med J, 2021, 49(8): 878-882.
- [22] KIM H, LEE G, LEE J, et al. Alterations in learning-related cortical activation and functional connectivity by high-definition transcranial direct current stimulation after stroke: an fNIRS study [J]. Front Neurosci, 2023, 17: 1189420.
- [23] 熊艺妮, 陈云, 江勇, 等. 高精度经颅直流电刺激对脑功能网络的影响[J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 372.
- XIONG Y W, CHEN Y, JIANG Y, et al. Effect of high-precision transcranial direct current stimulation on brain functional network [J]. J Med Biomech, 2021, 36(S1): 372.
- [24] 孙杰, 陈贵娟, 徐涵, 等. 悬吊推拿运动技术对卒中患者核心肌群及姿势控制能力的影响[J]. 康复学报, 2022, 32(5): 441-448.
- SUN J, CHEN G J, XU H, et al. Effect of suspension massage exercise technique on core muscle mass and postural control ability of patients with stroke [J]. Rehabil Med, 2022, 32(5): 441-448.
- [25] GARAY-SÁNCHEZ A, MARCÉN-ROMÁN Y, FERRANDO-MARGELÍ M, et al. Effect of physiotherapy treatment with immersive virtual reality in subjects with stroke: a protocol for a randomized controlled trial [J]. Health Care, 2023, 11(9): 1335.
- [26] YOUSSEF H, MOHAMED N A E H, HAMDY M. Comparison of bihemispheric and unihemispheric M1 transcranial direct current stimulations during physical therapy in subacute stroke patients: a randomized controlled trial [J]. Neurophysiol Clin, 2023, 53(3): 102895.

## Therapeutic Effect of High-Definition Transcranial Direct Current Stimulation Combined with Suspension Exercise Training on Lower Limb Motor Function of Stroke Patients

ZHANG Haiquan<sup>1</sup>, HU Chuan<sup>1</sup>, HUANG Lei<sup>2</sup>, LU Wei<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Shandong Provincial Third Hospital, Shandong University, Jinan, Shandong 250031, China;

<sup>2</sup> Shandong Yuncheng Hospital of Traditional Chinese Medicine, Yuncheng, Shandong 274700, China

\*Correspondence: WANG Xin, E-mail: 18530915@qq.com

**ABSTRACT Objective** To observe the effect of high-definition transcranial direct current stimulation combined with suspension exercise training on lower limb motor function of stroke patients. **Methods** A total of 120 stroke patients treated in the department of rehabilitation medicine of the Shandong Provincial Third Hospital, Shandong University from January 2022 to February 2023 were randomly divided into control group, HD-tDCS group, suspension group and combined treatment group, with 30 cases in each group. During the course of the treatment, 4 cases dropped out because the patients were discharged from hospital and could not continue to receive treatment, including 3 cases in the control group and 1 case in the HD-tDCS group, and finally 27 cases were included in the control group, 29 cases in the HD-tDCS group, 30 cases in the suspension group and 30 cases in the combined treatment group, respectively. The control group received conventional rehabilitation treatments such as exercise therapy and neuromuscular electrical stimulation, 25 minutes a day, once a day, 5 days a week for 8 weeks. In addition to the treatment received by the control group, the HD-tDCS group received HD-tDCS treatment, in which the primary stimulation electrodes were placed at the primary motor cortex of the hemiplegic side of the brain in the M1 area (C3/C4), and the four acceptor electrodes were placed at C1/C2, C5/C6, FC3/FC4 and CP3/CP4 area about 3.5 cm around the M1 area, respectively, with a constant current intensity of 2 mA, and a current rise and fall of 30 s, 20 minutes a time, once a day, 5 days a week for 8 weeks. The suspension group received suspension exercise training based on the treatment in the control group, such as separated and combined exercise of the lower limbs on the hemiplegic side, dynamic closed-chain stabilization exercise, pelvic swing and relaxation exercise, 25 minutes a time, once a day, five days a week for eight weeks. The combined treatment group received HD-tDCS combined with suspension exercise training based on the treatment in the control group. Before treatment and after 4 and 8 weeks of treatment, the Fugl-Meyer assessment lower extremity (FMA-LE) was used to assess lower limb motor function. Berg balance scale (BBS) was used to assess balance function, functional ambulation category (FAC) scale was used to assess functional walking ability. A video gait system was used to assess gait spatial-temporal parameters (stride frequency, stride speed, stride length, and walking cycle). **Results** Compared with that before treatment, FMA-LE, BBS, FAC scores and gait spatial-temporal parameters (stride frequency, stride speed, stride length, and walking cycle) of the four groups after 4 and 8 weeks of treatment improved, and the differences were statistically significant ( $P < 0.05$ ). Compared with the control group, the HD-tDCS group and the suspension group at 4 and 8 weeks of treatment, FMA-LE, BBS scores of the combined treatment group were significantly higher, and FAC level and gait spatial-temporal parameters of the combined treatment group after 8 weeks of treatment improved, and the differences were statistically significant ( $P < 0.05$ ). **Conclusion** HD-tDCS combined with suspension exercise training can effectively improve lower limb motor function, balance ability and walking ability of stroke patients, which is recommended for clinical application.

**KEY WORDS** stroke; high-definition transcranial direct current stimulation; suspension exercise training; low limb motor function; balance function; walking ability

**DOI:**10.3724/SP.J.1329.2024.02003