

·临床论著·

# 经颅直流电刺激同步肢体功能性电刺激对脑外伤患者运动功能和平衡功能的影响

吕晓<sup>1</sup>, 陈汉波<sup>1</sup>, 丁丽娟<sup>2</sup>, 陈星<sup>1</sup>, 郑文华<sup>1</sup>, 魏妮<sup>3</sup>, 贺灵慧<sup>1</sup>, 李梦云<sup>1</sup>, 刘晨<sup>1</sup>, 燕铁斌<sup>2,4\*</sup>

1 广东三九脑科医院, 广东广州 510510;

2 中山大学孙逸仙纪念医院, 广东广州 510120;

3 郴州市第一人民医院, 湖南郴州 423000;

4 广东省康复与养老工程技术研究中心, 广东广州 510120

\*通信作者: 燕铁斌, E-mail: dr.yan@126.com

收稿日期: 2021-10-05; 接受日期: 2021-11-20

基金项目: 广东省医学科学技术研究基金项目(A2018172、A20201407); 湖南省社会发展科技处临床医疗技术创新引导项目(2018SK50306)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2022.01003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**摘要 目的:**研究脑外伤患者同时接受经颅直流电刺激(tDCS)和肢体功能性电刺激(FES)对患者运动功能和平衡功能的影响。**方法:**将符合入组条件的脑外伤患者56例采用信封随机法分为同步组21例、FES组20例和tDCS组15例,3组均给予药物治疗和常规康复治疗。同步组患者接受tDCS同步FES治疗,FES组接受安慰tDCS和FES治疗,tDCS组接受tDCS和安慰FES治疗,3组均治疗20 min/次,1次/d,连续治疗12 d。分别于治疗前、治疗第6天和治疗第12天采用下肢Fugl-Meyer运动功能评分(FMA-LE)、Berg平衡量表(BBS)进行评估,同时在治疗前后采用动态平衡测试仪评定平衡功能。**结果:**3组治疗前一般资料、FMA-LE、BBS和动态平衡指标等组间比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),提示3组之间具有可比性。在运动功能评估中,治疗后3组的FMA-LE均随治疗时间延长明显改善,与治疗前比较,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),但3组之间的变化率比较,组间差异无统计学意义( $P>0.05$ )。在平衡功能量表评估中,治疗后3组的BBS评分均随治疗时间延长而明显改善,与治疗前比较差异有统计学意义( $P<0.05$ );同时3组之间BBS变化率比较,同步组变化率较其余2组显著好转,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。在平衡测试仪测试中6个指标[本体感觉(SOM)、视觉(VIS)、前庭觉(VEST)、视觉依赖(PREF)、感觉统合测试综合(SOTC)和运动控制测试综合(MCTC)]中的组内比较,同步组治疗后VIS、VEST、SOTC和MCTC得分较治疗前有明显改善,差异有统计学意义( $P<0.05$ );治疗后FES组的MCTC较治疗前改善,差异有统计学意义( $P<0.05$ );tDCS组的VIS、SOTC 2个指标治疗后较治疗前有明显改善,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),各组其余指标治疗前后比较差异无统计学意义( $P>0.05$ );3组间MCTC变化率比较,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),同步组显著高于其他2组( $P<0.05$ ),而其余平衡指标组间比较差异无统计学意义( $P>0.05$ )。**结论:**tDCS或基于正常行走模式的四通道FES或tDCS同步FES治疗均能改善脑外伤恢复期偏瘫患者下肢运动功能和平衡功能;同步组在改善平衡功能方面有显著意义,且与感觉统合和运动控制相关。

**关键词** 脑外伤;经颅直流电刺激;功能性电刺激;同步治疗;运动功能;平衡功能

创伤性颅脑损伤(traumatic brain injury, TBI), 又称脑外伤,是全球公共卫生问题,也是人类致残的主要原因之一<sup>[1]</sup>。脑外伤后的平衡功能和步行功

能密切相关<sup>[2]</sup>,有文献表明Berg平衡量表可用于入院时预测脑卒中患者步行改善程度<sup>[3]</sup>。脑外伤后的平衡功能对于预防跌倒,提高患者生活质量均有重

引用格式:吕晓,陈汉波,丁丽娟,等.经颅直流电刺激同步肢体功能性电刺激对脑外伤患者运动功能和平衡功能的影响[J].康复学报,2022,32(1):10-17.

LU X, CHEN H B, DING L J, et al. Effect of tDCS synchronized FES on lower limb motor and balance function of traumatic brain injury patients with hemiplegia [J]. Rehabilitation Medicine, 2022, 32(1): 10-17.  
DOI: 10.3724/SP.J.1329.2022.01003

要意义,但目前缺乏有效的康复手段。功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)是通过对完整外周运动神经施加电流从而使瘫痪肌肉收缩,产生功能性动作<sup>[4]</sup>。该技术已在临床广泛使用,对脑卒中、颅脑外伤、脊髓损伤等多种原因导致的上肢、下肢和盆底肌瘫痪都有治疗作用<sup>[5-6]</sup>。我们既往应用的基于正常行走模式的下肢多通道功能性电刺激对脑卒中患者的步行功能有明显改善作用<sup>[7-8]</sup>,临床上此技术已推广应用于多种病因导致的双下肢步行功能障碍患者。经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)是一种非侵入性的,调节大脑皮层兴奋性和突触可塑性的新兴技术<sup>[9]</sup>,阳极刺激可兴奋皮层,阴极刺激可抑制皮层兴奋性。在电流刺激结束后作用可持续数分钟<sup>[10]</sup>。我们既往的研究证明功能性电刺激对脑损伤后的步行功能有明显治疗作用<sup>[11]</sup>,但目前同步应用调控中枢皮层兴奋性的神经调控技术治疗能否提高疗效,改善平衡功能尚未见相关报道。本研究联合应用经颅直流电刺激和功能性电刺激2种治疗技术,观察其对脑外伤患者平衡功能的改善作用。

## 1 临床资料

### 1.1 病例选择标准

**1.1.1 纳入标准** ①入院诊断为脑外伤的患者。②单侧肢体偏瘫,患侧下肢Brunnstrom分期为Ⅲ~Ⅳ期;③病程为3~6个月;④年龄18~65岁;⑤站

立平衡 $\geq 1$ 级,步行功能Holden分级 $\geq 2$ 级(可监护下平地行走20 min);⑥无失语、无感觉障碍、无严重认知功能障碍,简易智力测试量表AMT $\geq 7$ 分<sup>[12]</sup>;⑦无严重的心、肺、肝、肾等相关疾病;⑧患者同意并签署知情同意书。

**1.1.2 排除标准** ①头部或患侧下肢有皮肤破损或感染影响贴电极者;②踝跖屈肌群肌张力MAS $\geq 3$ 级;③影响步行能力的其他神经肌肉和骨关节疾病。

### 1.2 一般资料

本研究为前瞻性随机对照研究,选取2018年7月—2020年1月在广东三九脑科医院康复医学科住院的颅脑损伤患者。该研究已获得广东三九脑科医院医学伦理委员会审查批件[批件号:2018(5)],并已在中国临床试验注册中心注册认证(注册号:ChiCTR1800018925)。研究期间,共筛选脑外伤患者189例,符合入组标准87例,去掉符合排除标准者25例,纳入分组病例62例,其中6例因未完成疗程而剔除,共56例患者纳入统计,其中男42例,女14例。按照信封法分为同步组、FES组和tDCS组,其中同步组21例,FES组20例和tDCS组15例。病程、简易认知功能评定(mini-mental state examination, MMSE)不符合正态分布,进行对数转换后进行单因素方差分析;性别、偏瘫侧、文化程度进行 $\chi^2$ 检验,3组间一般资料比较,差异均无统计学意义( $P > 0.05$ ),具有可比性。见表1。

表1 3组一般资料比较[n(%), ( $\bar{x} \pm s$ )]

Table 1 Comparison of general data in three groups [n(%), ( $\bar{x} \pm s$ )]

组别	例数	性别		年龄/岁	偏瘫侧	
		男	女		左	右
同步组	21	15(71.43)	6(28.57)	49.01 $\pm$ 13.22	10(47.62)	11(52.38)
FES组	20	15(75.00)	5(25.00)	45.85 $\pm$ 12.64	6(30.00)	14(70.00)
tDCS组	15	12(80.00)	3(20.00)	51.80 $\pm$ 10.86	5(33.33)	10(66.67)
$\chi^2/F$ 值		0.349		1.000	1.509	
P值		0.840		0.375	0.472	

组别	例数	病程/月	文化程度			MMSE/分
			小学及以下	中学	大专及以上	
同步组	21	2.69 $\pm$ 2.10	7(33.33)	13(61.90)	1(4.76)	22.62 $\pm$ 8.89
FES组	20	2.48 $\pm$ 1.41	6(30.00)	11(55.00)	3(15.00)	19.25 $\pm$ 10.87
tDCS组	15	1.63 $\pm$ 1.26	6(40.00)	7(46.67)	2(13.33)	19.00 $\pm$ 8.90
$\chi^2/F$ 值		1.865		1.896		0.861
P值		0.165		0.755		0.429

## 2 方法

### 2.1 治疗方法

3组均给予药物治疗和常规康复治疗,在此基础上,同步组给予头部tDCS治疗同步下肢FES治疗;FES组给予头部安慰tDCS治疗同步下肢FES治疗;tDCS组给予头部tDCS治疗同步下肢安慰FES治疗。3组均治疗20 min/次,1次/d,连续治疗12 d。

**2.1.1 tDCS治疗** 采用美国Soterix公司生产的1×1 tDCS治疗仪,2个电极片大小均为5 cm×7 cm,将电极片在0.9%生理盐水中充分浸泡以后,阳极置于脑初级运动皮层的偏瘫下肢代表区(M1区),阴极置于对侧眼眶上缘。电流强度为2 mA。安慰刺激时电极片放置位置相同,采用设备自带的伪刺激功能。

**2.1.2 FES治疗** 在正常行走状态下进行FES治疗。采用四通道FES仪(广州凡科公司生产,易善行,型号:P2-9632),刺激电极分别置于偏瘫侧下肢胫前肌、股四头肌、腓肠肌及股二头肌运动点部位。股四头肌、股二头肌2组肌群运动点采用6 cm×9 cm电极片;腓肠肌和胫前肌运动点采用3 cm×5 cm电极片。FES治疗参数为双向对称方波,频率30 Hz,脉宽200 ms,电流强度以患者耐受为度。安慰治疗时电极放置位置与电刺激组相同,但治疗期间电刺激仪开机而无电流输出。

**2.1.3 同步治疗方法** ① 所有患者均先按照tDCS操作标准固定好tDCS电极,确定导电指示灯正常显示,设置好刺激时间和刺激强度;② 按FES操作顺序和肌肉位置,贴好8块刺激电极,调好刺激参数;③ 同步组同时启动tDCS治疗仪和FES治疗仪,然后再调节FES刺激电流至耐受强度(tDCS安慰治疗先选择安慰模式再启动刺激,FES安慰治疗将电流调至最小);④ 启动这2部治疗仪后,立刻进行平地行走(即tDCS治疗、FES治疗、行走训练同时进行)。

### 2.2 评定方法

① 下肢Fugl-Meyer运动功能评分(Fugl-Meyer assessment of lower extremity, FMA-LE);② Berg平衡量表(Berg balance scale, BBS);③ 动态平衡测试仪采用挪威Natus公司生产的Neurocom Balance Manager System系统(见图1)。其中FMA-LE和BBS于治疗前、治疗第6天和治疗第12天进行3次评定,动态平衡测试于治疗前后进行2次评定。所有评估均由第三方评估者完成,所有评估者均经过专门培训,且评估者不知道患者的分组及治疗方法。FMA-LE的评估参见文献[13],BBS的评估参见文献[14]。动态平衡功能评定包括感觉统合测试含

本体感觉、视觉、前庭觉、视觉依赖及综合测试,运动控制及综合测试,分别描述如下。

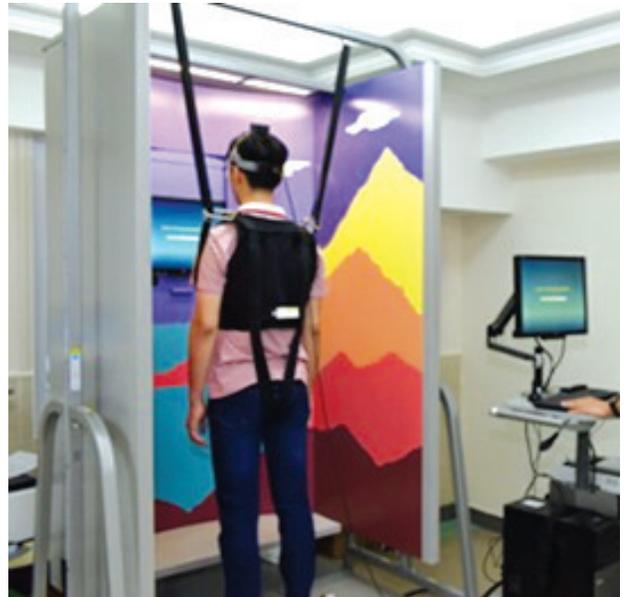


图1 Neurocom动态平衡系统  
Figure 1 Neurocom balance manager system

### 2.2.1 感觉统合测试(sensory integration test, SOT)

在平台不动状态下,① 状态1:睁眼站立,测定视觉、前庭觉和本体觉3种感受器同时维持平衡的能力。② 状态2:闭目站立,除去视觉,依靠本体和前庭系统维持平衡能力。③ 状态3:视景晃动,随重心偏移情况的晃动,不正确的视信息下,人依赖于前庭和本体维持平衡能力。在平台移动情况下:① 状态4:睁眼站立,平台随重心晃动移动,依赖视觉和前庭觉系统维持平衡的能力。② 状态5:闭眼站立,平台随重心晃动而移动,依赖前庭觉系统维持平衡。③ 状态6:视景和平台都随重心晃动而移动,依赖正确的前庭觉系统信息来维持平衡。

根据以上6种状态可计算各感受器的平衡得分:① 本体感觉(somatosensory cues, SOM):SOM值等于状态2/状态1,代表患者运用本体感觉保持平衡的程度。② 视觉(visual cues, VIS):VIS值等于状态4/状态1,代表患者运用视觉保持平衡的程度。③ 前庭觉(vestibular cues, VEST):VEST值等于状态5/状态1,代表患者运用前庭觉保持平衡的程度。④ 视觉依赖(visual dependence preference, PREF):PREF值等于(状态3+状态6)/(状态2+状态5),代表患者在冲突的视觉干扰环境下忽略错误视觉信息的能力。⑤ 感觉统合测试综合(sensory organization test composite, SOTC):为所有得分的加权平均分,值

由计算机系统自动计算所得,代表每个人的感觉统合综合能力。

**2.2.2 运动控制测试(motion control test, MCT)** 评估患者在其支持表面突然位移时产生有效的运动反应的能力,操作方法为人站立在平台上,强压力传感平衡板突然向前和向后方向移动,其运动幅度根据以患者的身高自动调整,共测试3次,一般速度分别为:基础阈值,2.8 deg/sec;中等程度,6.0 deg/sec;饱和速度,8.0 deg/sec。

**2.2.3 运动控制测试综合(motion control test composite, MCTC)** 运动控制测试的综合得分。

### 2.3 统计学方法

采用SPSS 21.0软件进行数据统计分析,用Shapiro-Wilk法对计量资料行正态性检验,符合正态分布计量资料用( $\bar{x}\pm s$ )表示,不符合正态分布计量资料用中位数(四分位数)描述,分类资料用例数和百分数(%)表示。计量资料组间比较,采用方差 $F$ 检验,不满足条件的则用非参数秩和检验。组内治疗前

后比较用配对样本 $t$ 检验,不满足条件的则用非参数秩和检验。计数资料组间比较,采用 $\chi^2$ 检验。计量资料重复测量资料:因量表各指标部分数据不符合正态分布,故我们将BBS、FMA-LE指标用取自然对数形式进行转换后行重复测量方差分析,两两比较采用LSD- $t$ 检验。以 $\alpha=0.05$ 作为组间比较的检验水准。

## 3 结果

### 3.1 3组FMA-LE指标比较

见表2~4。3组组内不同时间点两两比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),此处结论与重复测量结果相违背,以表3重复测量结果为准;表3中3组的FMA-LE均随时间变化呈显著升高趋势( $F=28.424$ ,  $P<0.001$ ),差异有统计学意义,但各组间比较差异无统计学意义( $F=0.453$ ,  $P=0.638$ );相同时间点比较,其变化率差异无统计学意义( $P>0.05$ )。

变化率1=(治疗6次-治疗前)/治疗前 $\times 100\%$

变化率2=(治疗12次-治疗前)/治疗前 $\times 100\%$

表2 3组治疗不同时间点的FMA-LE指标比较( $\bar{x}\pm s$ )

Table 2 Comparison of FMA-LE in three groups before and after different time treatment ( $\bar{x}\pm s$ )

组别	例数	治疗前	治疗第6天	治疗第12天	组内前后比较	
					$F$ 值	$P$ 值
同步组	21	19.62 $\pm$ 4.92	20.91 $\pm$ 5.58	21.91 $\pm$ 5.57	0.958	0.389
FES组	20	21.05 $\pm$ 6.86	23.15 $\pm$ 7.36	23.55 $\pm$ 7.38	0.695	0.503
tDCS组	15	20.00 $\pm$ 8.65	21.27 $\pm$ 9.11	21.87 $\pm$ 8.85	0.173	0.842
$F$ 值		0.241	0.542	0.342	—	—
$P$ 值		0.787	0.585	0.712	—	—

表3 FMA-LE指标的重复测量数据资料的方差分析

Table 3 Repeated measurement ANOVA of FMA-LE in three groups

变异来源	SS	df	MS	$F$ 值	$P$ 值	
组内变异	时间	0.335	1.516	0.221	28.424	<0.001
	时间 $\times$ 组别	0.009	3.031	0.003	0.399	0.756
	误差	0.625	80.331	0.008	—	—
组间变异	组别	0.361	2.000	0.180	0.453	0.638
	误差	21.125	53.000	0.399	—	—

表4 3组间FMA-LE指标变化率分析[ $P_{50}(P_{25}, P_{75})$ ]

Table 4 Analysis of change rate of FMA-LE in three groups [ $P_{50}(P_{25}, P_{75})$ ]

组别	变化率1	变化率2
同步组	0.00(0.00, 9.93)	8.00(0.00, 17.62)
FES组	4.61(0.00, 16.52)	7.94(0.00, 20.54)
tDCS组	6.25(0.00, 13.33)	11.11(0.00, 22.22)
$Z$ 值	0.749	0.084
$P$ 值	0.688	0.959

### 3.2 3组治疗不同时间点的BBS指标比较

结果显示,随时间变化,各组的BBS指标均呈显著升高趋势,说明各组治疗均能显著改善患者的平衡功能,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),见表5。重复测量的结果显示,同步组的治疗效果优于FES组、tDCS组,差异有统计学意义( $F=3.277$ ,  $P=0.046$ ),且随治疗时间增加,差异具有统计学意义( $P<0.05$ ),见表6。比较3组间的变化率可见,3组间BBS指标变化率1、变化率的2组间差异有统计学意义( $P<$

0.05);且经组间两两比较结果可得,同步组变化率1 显著高于FES组,同步组变化率2显著高于FES组、tDCS组;其余指标变化率差异无统计意义( $P>0.05$ )。见表7。

表5 3组治疗不同时间点的BBS指标比较( $\bar{x}\pm s$ )

Table 5 Comparison of BBS in three groups before and after different time treatment ( $\bar{x}\pm s$ )

组别	例数	治疗前	治疗第6天	治疗第12天	F值	P值
同步组	21	29.71±10.08	43.91±4.96 <sup>1)</sup>	58.24±8.09 <sup>1)2)</sup>	66.883	<0.001
FES组	20	34.35±11.26	39.30±10.21	42.35±7.96 <sup>1)3)</sup>	3.322	0.043
tDCS组	15	28.27±10.19	37.20±9.76 <sup>1)</sup>	39.53±8.68 <sup>1)3)</sup>	5.797	0.006
F值		1.669	3.030	29.009	—	—
P值		0.198	0.057	<0.001	—	—

注:与治疗前比较,1)  $P<0.05$ ;与治疗第6天比较,2)  $P<0.05$ ;与同步组比较,3)  $P<0.05$ 。

Notes: Compared with that before treatment,1)  $P<0.05$ ; compared with that after 6 days' treatment, 2)  $P<0.05$ ; compare with the synchronous group, 3)  $P<0.05$ .

表6 BBS指标的重复测量数据资料的方差分析结果

Table 6 Repeated measurement ANOVA of BBS in three groups

变异来源	SS	df	MS	F值	P值	
组内变异	时间	5.924	1.230	4.818	100.796	<0.001
	时间×组别	1.330	2.459	0.541	11.316	<0.001
	误差	3.115	65.176	0.048	—	—
组间变异	组别	1.190	2.000	0.595	3.277	0.046
	误差	9.627	53.000	0.182	—	—

表7 3组间BBS指标变化率分析比较 [ $P_{50}(P_{25}, P_{75})$ ]

Table 7 Analysis of change rate of BBS in three groups [ $P_{50}(P_{25}, P_{75})$ ]

组别	例数	变化率1	变化率2
同步组	21	43.33(18.14, 81.65)	97.14(48.78, 148.49)
FES组	20	13.10(2.75, 30.10) <sup>1)</sup>	25.75(7.68, 46.59) <sup>1)</sup>
tDCS组	15	27.91(18.52, 53.85)	30.23(22.22, 73.91) <sup>1)</sup>
Z值		12.787	22.105
P值		0.002	<0.001

注:与同步组比较,1)  $P<0.05$ 。

Notes: Compared with the synchronous group, 1)  $P<0.05$ .

### 3.3 3组动态平衡功能评估比较

由表8结果可得,3组平衡各指标组间比较,治疗前6个指标差异均无统计学意义( $P>0.05$ );治疗后SOTC、MCTC 2个指标组间差异有统计学意义( $P<$

0.05),且组间两两比较结果可得,SOTC、MCTC 2个指标同步组均显著高于FES组、tDCS组。

6个指标组内治疗前后比较:同步组的VIS、VEST、SOTC、MCTC共4个平衡指标治疗前后差异有统计学意义( $P<0.05$ ),且均治疗后高于治疗前;FES组的MCTC指标治疗前后差异有统计学意义( $P<0.05$ ),且治疗后低于治疗前;tDCS组的VIS、SOTC共2个指标治疗前后差异有统计学意义( $P<0.05$ ),且均治疗后高于治疗前。其余组别各指标治疗前后差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。

由表9结果可得,应用秩和检验,3组间平衡指标变化率分析,MCTC变化率指标差异有统计学意义( $P<0.05$ ),同步组变化率2显著高于FES组、tDCS组( $P<0.05$ )。其余平衡指标组间比较差异无统计学意义( $P>0.05$ )。

表8 3组平衡指标比较 $[(\bar{x}\pm s), P_{50}(P_{25}, P_{75})]$ Table 8 Comparison of balance function in three groups before and after treatment  $[(\bar{x}\pm s), P_{50}(P_{25}, P_{75})]$ 

组别	例数	SOM		VIS	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
同步组	21	0.95±0.05	0.95±0.03	0.82(0.73,0.89)	0.90(0.82,0.95)
FES组	20	0.95±0.04	0.97±0.05	0.81(0.66,0.86)	0.83(0.76,0.90)
tDCS组	15	0.97±0.05	0.97±0.06	0.77(0.00,0.86)	0.86(0.80,0.91)

组别	例数	VEST		PREF	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
同步组	21	0.00(0.00,0.63)	0.64(0.00,0.74)	0.98(0.88,1.05)	0.98(0.96,1.03)
FES组	20	0.60(0.00,0.72)	0.66(0.00,0.77)	0.98(0.79,1.03)	0.96(0.92,1.12)
tDCS组	15	0.00(0.00,0.74)	0.64(0.00,0.72)	0.93(0.84,1.01)	0.99(0.82,1.02)

组别	例数	SOTC		MCTC	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
同步组	21	53.00(44.00,63.00)	75.0(59.50,85.50)	135.00(118.50,148.00)	163.00(153.00,177.00)
FES组	20	60.00(46.00,74.00)	59.0(54.75,67.50) <sup>1)</sup>	144.50(128.25,153.25)	127.50(119.00,134.50) <sup>1)</sup>
tDCS组	15	50.00(36.00,64.00)	61.0(47.00,68.00) <sup>1)</sup>	147.00(120.00,155.00)	138.00(111.00,151.00) <sup>1)</sup>

注:与同步组比较,1)  $P<0.05$ 。Notes: Compared with the synchronous group, 1)  $P<0.05$ 。表9 3组间平衡指标变化率分析 $[P_{50}(P_{25}, P_{75})]$ 

%

Table 9 Analysis of change rate of balance function in three groups  $[P_{50}(P_{25}, P_{75})]$ 

%

组别	例数	SOM变化率	VIS变化率	VEST变化率
同步组	21	-0.08(-2.79,1.08)	11.20(0.00,55.45)	5.53(0.00,42.35)
FES组	20	-0.01(-1.44,1.64)	0.33(-4.26,21.55)	1.79(0.00,29.00)
tDCS组	15	0.40(-1.67,3.29)	4.95(0.08,18.21)	16.38(0.00,21.48)
Z值		0.781	3.368	5.531
P值		0.677	0.186	0.623

组别	例数	PREF变化率	SOTC变化率	MCTC变化率
同步组	21	-1.14(-17.94,11.04)	13.42(0.00,37.90)	0.20(0.10,0.30)
FES组	20	2.05(-8.92,23.16)	6.58(1.23,17.95)	-0.09(-0.18,-0.07) <sup>1)</sup>
tDCS组	19	0.59(-19.23,20.66)	17.39(4.62,40.43)	-0.07(-0.16,0.05) <sup>1)</sup>
Z值		1.829	0.947	12.787
P值		0.401	0.623	0.002

注:与同步组比较,1)  $P<0.05$ 。Notes: Compared with the synchronous group, 1)  $P<0.05$ 。

## 4 讨论

本研究发现,同步应用tDCS和FES,可以改善患者的平衡能力,尤其是改善患者的感觉统合能力和动态运动控制能力。平衡被定义为在支撑基础内以最小的姿势摇摆维持重力线的能力,平衡控制是一个依赖于视觉、前庭和体感输入到中枢神经系统(CNS)组合的一个过程<sup>[15]</sup>。由于感觉、运动和肌肉骨骼系统之间复杂连接失败而导致的平衡缺陷在TBI患者中非常常见。许多因素可以导致平衡能力受损:如生物力学和关节运动学、感觉运动和神

经控制、心肺失调,以及认知、心理和跌倒恐惧<sup>[16]</sup>。

平衡缺陷是TBI患者最严重的损伤之一,保持坐姿和站立时的平衡是所有日常活动的必要条件,包括自理、步行和驾驶<sup>[16]</sup>。既往文献表明,健康人站在稳定的表面上并获得视觉输入时,感官会受到70%的体感输入、20%的前庭输入和10%的视觉输入的影响<sup>[17]</sup>。基于这一发现,躯体感觉和前庭系统是在站立时获得姿势控制的主要感觉系统。业已证明,同时刺激视觉、前庭觉和/或本体感觉,如站立在振动仪上的前庭锻炼、振动仪上的虚拟现实或跑步机上的运动都会改变神经系统多个层面的神

经可塑性,最大程度地提高TBI和其他人群的平衡能力<sup>[18-20]</sup>。因此,步行功能的改善对平衡功能的改善有明显的相互促进作用。

功能性电刺激是一个融合多个学科的交叉研究领域,具有重要的研究意义和广阔的临床应用前景<sup>[4]</sup>。本研究所使用的四通道功能性电刺激仪采用运动控制理论,具有应用方便(可穿戴、便携),疗效明显的特点,临床容易推广,深受专业人员及患者欢迎。已有很多文献证明,其对脑卒中偏瘫急性期、慢性期的运动功能均有明显的促进作用<sup>[7-8,21]</sup>,在医院日常工作中对多种原因的脑损伤患者导致的偏侧肢体运动障碍都有明显的疗效。

神经调控技术的出现给神经系统疾病的治疗带来了新的希望,其中,tDCS是一种新型非侵入性脑调控技术,能够直接调节皮层兴奋-抑制环路功能状态,且几乎不引起不良反应,已成为一种新型的康复手段<sup>[22]</sup>。tDCS的作用机制是通过接触头皮的微弱电流改变神经元活性和脑血流(cerebral blood flow,CBF)大小;带来突触和非突触的后效应;根据电极正负调节神经递质;改变振荡脑活性和脑的功能连接模式。这种非侵入性神经刺激手段是改善TBI后运动功能的一种可选方式,同时对脑卒中、帕金森、阿尔茨海默病伴随的功能障碍也有改善作用<sup>[23-25]</sup>。研究发现,tDCS电极置于不同位置,可产生不同的治疗效果,阳极电极放置于左侧运动主皮层投影区,可促进运动功能提高<sup>[26]</sup>。

本研究同时应用tDCS和FES,分别从中枢调控皮层兴奋性,从外周给予肌肉感觉刺激,调高肌肉收缩力;这种外周和中枢同时给予刺激,有助于提高对平衡功能的康复治疗作用。本研究结果表明,单用阳极tDCS或基于正常行走模式的四通道FES或tDCS同步FES治疗均能改善脑外伤恢复期偏瘫患者下肢运动功能和平衡功能。但同步治疗比单独使用FES或tDCS治疗更有益,且主要通过改善患者的运动控制能力来改善患者的综合平衡功能。

运动控制是指肢体精确完成活动任务的能力,是大脑运动皮质功能、小脑和脑干平衡协调功能、脊髓中间神经元功能、神经传导和神经-肌肉接头功能、肌肉收缩和舒张功能以及骨关节功能综合作用的表现。情绪、心理和认知功能也参与了运动控制的过程。涉及上述各个环节的障碍都可以导致运动控制障碍,表现为具有一定的肌力,但是无法控制动作的精确性和靶向性。脑外伤后相当数量的患者表现为运动控制障碍。运动控制障碍的康复有赖于感觉的输入、模式化运动的重建和多次重复。本研究证明,通过FES刺激提高患者外周的感觉输入,基于正常步态的正确行走模式的刺激以及tDCS对皮层兴奋性的调控作用,可以更好地提高患者的运动控制能力。

tDCS同步FES治疗的协同治疗模式为临床提供了新的思路。本研究表明在如何促进脑-肢协同治疗的效果方面,还需要在刺激方式、刺激时间、电流强度、电流密度、同步方式等方面做更大样本、更长治疗周期的进一步研究。

## 参考文献

- [1] HAARBAUER-KRUPA J, PUGH M J, PRAGER E M, et al. Epidemiology of chronic effects of traumatic brain injury [J]. *J Neurotrauma*, 2021, 38(23):3235-3247.
- [2] SWINNEN E, BECKWEE D, MEEUSEN R, et al. Does robot-assisted gait rehabilitation improve balance in stroke patients? A systematic review [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2014, 21(2):87-100.
- [3] LOUIE D R, ENG J J. Berg Balance Scale score at admission can predict walking suitable for community ambulation at discharge from inpatient stroke rehabilitation [J]. *J Rehabil Med*, 2018, 50(1):37-44.
- [4] POPOVIC D B. Advances in functional electrical stimulation (FES) [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2014, 24(6):795-802.
- [5] ERAIFEJ J, CLARK W, FRANCE B, et al. Effectiveness of upper limb functional electrical stimulation after stroke for the improvement of activities of daily living and motor function: a systematic review and meta-analysis [J]. *Syst Rev*, 2017, 6(1):40.
- [6] THRASHER T A, POPOVIC M R. Functional electrical stimulation of walking: function, exercise and rehabilitation [J]. *Ann Readapt Med Phys*, 2008, 51(6):452-460.
- [7] XU B L, YAN T B, YANG Y L, et al. Effect of normal-walking-pattern-based functional electrical stimulation on gait of the lower extremity in subjects with ischemic stroke: a self controlled study [J]. *NeuroRehabilitation*, 2016, 38(2):163-169.
- [8] YAN T B, HUI-CHAN C W Y, LI L S W. Functional electrical stimulation improves motor recovery of the lower extremity and walking ability of subjects with first acute stroke: a randomized placebo-controlled trial [J]. *Stroke*, 2005, 36(1):80-85.
- [9] BRUNONI A R, NITSCHKE M A, BOLOGNINI N, et al. Clinical research with transcranial direct current stimulation (tDCS): challenges and future directions [J]. *Brain Stimul*, 2012, 5(3):175-195.
- [10] NITSCHKE M A, PAULUS W. Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation [J]. *J Physiol*, 2000, 527(Pt 3):633-639.
- [11] 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.
- [12] CHEN H B, ZHENG X Y, LU X, et al. Effect of tDCS synchronized FES on lower limb motor function of stroke patients with hemiplegia: a randomized controlled study [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2021, 36(10):1227-1232.
- [13] 伍少玲, 燕铁斌, 黄利荣. 简易智力测试量表的效度及信度研究[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2003, 25(3):140-142.
- [14] WU S L, YAN T B, HUANG L R. The validity and reliability of the abbreviated Mental Test Scale [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2003, 25(3):140-142.
- [15] 许光旭, 高晓阳, 陈文红. Fugl-Meyer运动功能评分的敏感性及实用性[J]. *中国康复*, 2001, 16(1):18-19.
- [16] XU G X, GAO X Y, CHEN W H, et al. The practicality and sensitivity in Fugl-Meyer motor function assessment [J]. *Chin J Rehabil*, 2001, 16(1):18-19.
- [17] 金冬梅, 燕铁斌, 曾海辉. Berg平衡量表的效度和信度研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2003, 18(1):24-26.

- JIN D M, YAN T B, ZENG H H. Validity and reliability of Berg balance scale on assessing balance function [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2003, 18(1):24–26.
- [15] SHAFFER S W, HARRISON A L. Aging of the somatosensory system: a translational perspective [J]. *Phys Ther*, 2007, 87(2):193–207.
- [16] PETERSON M, GREENWALD B D. Balance problems after traumatic brain injury [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2015, 96(2):379–380.
- [17] PETERKA R J. Sensorimotor integration in human postural control [J]. *J Neurophysiol*, 2002, 88(3):1097–1118.
- [18] ALASHRAM A R, PADUA E, ANNINO G. Effects of whole-body vibration on motor impairments in patients with neurological disorders: a systematic review [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2019, 98(12):1084–1098.
- [19] ALASHRAM A R, PADUA E, HAMMASH A K, et al. Effectiveness of virtual reality on balance ability in individuals with incomplete spinal cord injury: a systematic review [J]. *J Clin Neurosci*, 2020, 72:322–327.
- [20] PETERS D M, JAIN S, LIUZZO D M, et al. Individuals with chronic traumatic brain injury improve walking speed and mobility with intensive mobility training [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2014, 95(8):1454–1460.
- [21] YOU G Q, LIANG H Y, YAN T B. Functional electrical stimulation early after stroke improves lower limb motor function and ability in activities of daily living [J]. *NeuroRehabilitation*, 2014, 35(3):381–389.
- [22] BELIAEVA V, SAVVATEEV I, ZERBI V, et al. Toward integrative approaches to study the causal role of neural oscillations via transcranial electrical stimulation [J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1):2243.
- [23] BOGGIO P S, FERRUCCI R, RIGONATTI S P, et al. Effects of transcranial direct current stimulation on working memory in patients with Parkinson's disease [J]. *J Neurol Sci*, 2006, 249(1):31–38.
- [24] FERRUCCI R, MAMELI F, GUIDI I, et al. Transcranial direct current stimulation improves recognition memory in Alzheimer disease [J]. *Neurology*, 2008, 71(7):493–498.
- [25] HUMMEL F, CELNIK P, GIRAUX P, et al. Effects of non-invasive cortical stimulation on skilled motor function in chronic stroke [J]. *Brain*, 2005, 128:490–499.
- [26] NITSCHKE M A, SCHAUBENBURG A, LANG N, et al. Facilitation of implicit motor learning by weak transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex in the human [J]. *J Cogn Neurosci*, 2003, 15(4):619–626.

## Effect of tDCS Synchronized FES on Lower Limb Motor and Balance Function of Traumatic Brain Injury Patients with Hemiplegia

LU Xiao<sup>1</sup>, CHEN Hanbo<sup>1</sup>, DING Lijuan<sup>2</sup>, CHEN Xing<sup>1</sup>, ZHENG Wenhua<sup>1</sup>, WEI Ni<sup>3</sup>, HE Linghui<sup>1</sup>, LI Mengyun<sup>1</sup>, LIU Chen<sup>1</sup>, YAN Tiebin<sup>2,4\*</sup>

<sup>1</sup> Guangdong 999 Brain Hospital, Guangzhou, Guangdong 510510, China;

<sup>2</sup> Sun Yat-sen Memorial Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510120, China;

<sup>3</sup> The First People's Hospital of Chenzhou, Chenzhou, Hunan 423000, China;

<sup>4</sup> Guangdong Engineering Technology Research Center for Rehabilitation and Elderly Care, Guangzhou, Guangdong 510120, China

\*Correspondence: YAN Tiebin, E-mail: dr.yan@126.com

**ABSTRACT Objective:** To observe the effect of transcranial direct current stimulation (tDCS) synchronized with normal walking pattern based on multi-channel functional electrical stimulation (FES) on lower limb motor and balance function in patients with traumatic brain injury hemiplegia. **Methods:** A total of 56 patients with TBI and hemiplegia were divided into synchronous group ( $n=21$ ), FES group ( $n=20$ ), and tDCS group ( $n=15$ ) by using sealed-envelope randomization. The tDCS group was given head tDCS treatment and lower extremity sham FES treatment, the FES group was given head sham tDCS treatment and lower extremity FES treatment, and the synchronous group was given head tDCS treatment and lower extremity FES treatment. The treatment was 20 min/time, 1 time/d, for 12 days. Before treatment, after 6 days treatment and after 12 days treatment, the following scales were used to evaluate: Fugl-Meyer assessment of lower extremity (FMA-LE), Berg balance scale (BBS), and Neurocom Balance Manager System. **Results:** There was no significant differences among the evaluation results of the three groups before treatment. After treatment, compared with those before treatment, the FMA-LE scores of three groups were significantly different ( $P<0.05$ ), but there was no significant differences in FMA-LE among the three groups ( $P>0.05$ ). Compared with the three groups before and after treatment, BBS scores of the three groups were significantly different respectively ( $P<0.05$ ). Compared the tDCS group with the FES group, the differences in BBS scores of the synchronization group were significant ( $P<0.05$ ). In balance assessment, compared with those before treatment, visual cues (VIS), vestibular cues (VEST), sensory organization test composite (SOTC) and motion control test composite (MCTC) were significantly different in the synchronous group after treatment ( $P<0.05$ ); MCTC was significantly different in the FES group ( $P<0.05$ ); VIS and SOTC was significantly difference in the tDCS group ( $P<0.05$ ). Compared among the three groups, the change rate of MCTC was significantly difference ( $P<0.05$ ); there were no significant differences in other indicators ( $P>0.05$ ). **Conclusion:** The three methods can effectively improve the lower limb motor and balance function of patients with traumatic brain injury in chronic period. The treatment of tDCS with FES is better than the treatment of tDCS or FES alone in terms of some evaluation indicators.

**KEY WORDS** traumatic brain injury; transcranial direct current stimulation; functional electrical stimulation; synchronization; motor function; balance function

**DOI:**10.3724/SP.J.1329.2022.01003