

## 磁共振弥散张量成像评定四通道功能性电刺激治疗缺血性脑卒中后遗症的可行性

潘同亮, 张宪亮, 王亚超, 胡川, 王欣  
山东省立第三医院, 山东 济南 250000

**【摘要】目的:**探讨3.0T磁共振成像(MRI)弥散张量成像(DTI)评定四通道功能性电刺激(FES)治疗缺血性脑卒中后遗症患者的可行性。**方法:**收集2020年2月至2022年11月于山东省立第三医院收治的缺血性脑卒中后遗症患者( $n=100$ ),通过Excel产生的随机数字将其以1:1比例分为两组,均接受常规康复训练,观察组在此基础上给予四通道FES模仿正常人行走时肌肉收缩的时序刺激患侧下肢的股四头肌、胫骨前肌、腓肠肌及腓绳肌治疗,对照组在此基础上使用双通道FES治疗仪,将电极置于患肢胫前肌、腓骨长短肌两组肌群的肌肉点上进行治疗。两组患者于治疗前、后均接受脑部3.0T MRI检查,记录并对比两组患者经DTI检查的相关参数,同时使用Berg平衡量表(BBS)及Fugl-Meyer下肢功能评定量表(FMA-LE)评定两组缺血性脑卒中后遗症患者治疗后的临床效果。最后探讨观察组患者BBS、FMA-LE评分与DTI各参数的相关性。**结果:**对照组与观察组治疗后的FMA-LE、BBS评分均呈现上升趋势,且观察组升高显著( $P<0.05$ );治疗2周后,观察组的FMA-LE、BBS评分高于对照组( $P<0.05$ )。治疗2周后,观察组的各向异性指数(FA)、平均弥散系数(DCavg)、容积比(VRA)显著高于对照组,衰减指数(Exat)显著低于对照组( $P<0.05$ )。经分析,观察组患者的FMA-LE评分与FA、DCavg、VRA呈正相关,与Exat呈负相关。观察组的BBS评分与FA、VRA呈正相关,与Exat呈负相关,与DCavg无明显相关性。**结论:**通过DTI可以对四通道FES治疗缺血性脑卒中后遗症患者的疗效进行评价,其各项参数与BBS、FMA-LE评分呈现明显相关性,提示可通过MRI协助医生认识神经功能缺损与神经病理学改变之间的相关性,为准确评估预后及制定个体化康复方法提供参考。

**【关键词】**磁共振;弥散张量成像;四通道功能性电刺激;缺血性脑卒中;后遗症;疗效评价

**【中图分类号】**R49;R816.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2024)08-0982-05

## Evaluation of the feasibility of 4-channel functional electrical stimulation for treating sequelae of cerebral ischemic stroke using magnetic resonance diffusion tensor imaging

PAN Tongliang, ZHANG Xianliang, WANG Yachao, HU Chuan, WANG Xin  
Shandong Provincial Third Hospital, Ji'nan 250000, China

**Abstract: Objective** To evaluate the feasibility of 4-channel functional electrical stimulation (FES) in the treatment of cerebral ischemic stroke sequelae using 3.0T magnetic resonance diffusion tensor imaging (DTI). **Methods** Patients with the sequelae of cerebral ischemic stroke who were admitted to Shandong Provincial Third Hospital from February 2020 to November 2022 ( $n=100$ ) were enrolled and divided into two groups at a ratio of 1:1 according to random numbers generated by Excel. Besides routine rehabilitation training, observation group was given 4-channel FES to stimulate the quadriceps muscle, tibialis anterior muscle, gastrocnemius muscle and hamstring muscle of the affected lower extremity by simulating the time series of muscle contraction of normal subjects when walking; while control group was treated with dual-channel FES, with electrodes placed on the muscle points of the tibialis anterior muscle and peroneus longus and brevis muscles of the affected lower extremity for stimulation. All patients received 3.0T MRI before and after treatment, and the relevant DTI parameters were recorded and compared. Meanwhile, Berg balance scale (BBS) and Fugl-Meyer assessment scale for lower extremity (FMA-LE) were used to evaluate the therapeutic efficacies in two groups of patients with the sequelae of cerebral

**【收稿日期】**2023-12-05

**【基金项目】**教育部人文社会科学基金(19YICZH255);山东省中医药科技发展计划(2017-283);山东省中医药科技项目(2020M047);山东省医药卫生科技项目(202316010540)

**【作者简介】**潘同亮,主治医师,研究方向:脑卒中相关疾病,E-mail: P79713666@163.com

**【通信作者】**王欣,硕士,主任医师,研究方向:神经系统疾病,E-mail: 18530915@qq.com

ischemic stroke. The correlation of BBS/FMA-LE score with DTI parameters in observation group was also discussed. **Results** After treatment, both FMA-LE and BBS scores of control group and observation group showed increasing trends, and the increases in observation group were more obvious ( $P<0.05$ ). After 2 weeks of treatment, compared with control group, observation group had higher FMA-LE score, BBS score, fractional anisotropy (FA), average diffusion coefficient (DCavg) and volume ratio anisotropy (VRA), but lower exponential attenuation (Exat) (all  $P<0.05$ ). In observation group, FMA-LE score was positively correlated with FA, DCavg and VRA, but negatively correlated with Exat; while BBS score was positively correlated with FA and VRA, but negatively correlated with Exat, and had no significant correlation with DCavg. **Conclusion** DTI can be used to evaluate the therapeutic efficacy of 4-channel FES on the sequelae of cerebral ischemic stroke, and its parameters are significantly correlated with BBS score and FMA-LE score, suggesting that MRI can assist doctors in understanding the correlation between neurological impairments and neuropathological changes, and provide reference for accurate assessment of prognosis and formulation of individualized rehabilitation program.

**Keywords:** magnetic resonance; diffusion tensor imaging; 4-channel functional electrical stimulation; cerebral ischemic stroke; sequelae; efficacy evaluation

前言

缺血性脑卒中是由于各种原因导致脑部供血血管狭窄闭塞、血液灌注不足引起的脑组织缺血缺氧的一种临床综合征,每年约有百万人因此死亡,幸存者也会遗留不同程度的后遗症<sup>[1]</sup>。相关研究指出缺血性脑卒中的发病率呈现逐年升高趋势,临床仍然以溶栓为主要治疗手段,以恢复受损的神经,虽然能够取得一定效果,但临床上多数患者不能及时就医接受治疗,延误最佳治疗时机而遗留各种后遗症,需要经历漫长的康复过程<sup>[2-3]</sup>。功能性电刺激(FES)是通过电流对丧失功能的肢体进行刺激,用其产生的即时效应纠正或者是代替肢体功能的康复疗法,有利于瘫痪肌肉逐渐恢复运动功能<sup>[4]</sup>。张顺喜等<sup>[5]</sup>研究发现通过电刺激干预,能够有效改善缺血性脑卒中患者步行功能。临床上一般采用单通道或者双通道进行治疗,且多通过观察临床疗效判定治疗方式的可行性,较少结合磁共振成像(MRI)弥散张量成像(DTI)等客观指标进行治疗效果评价。DTI属于新型的用以描述大脑结构的方法,也属于MRI特殊且无创检查形式,通过追踪脑白质纤维束实现对缺血性脑卒中后遗症患者治疗后的疗效评价<sup>[6]</sup>。本研究就

缺血性脑卒中后遗症患者应用四通道FES疗法的效果及DTI评估的可行性进行分析。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2020年2月至2022年11月于山东省立第三医院收治的100例缺血性脑卒中后遗症患者,通过Excel产生的随机数字将其以1:1比例分为两组(对照组、观察组),两组一般资料的比较差异无统计学意义( $P>0.05$ ),具有可比性,详见表1。纳入标准:①符合《中国急性脑卒中临床研究规范共识2018》<sup>[7]</sup>中对缺血性脑卒中的诊断标准,且经CT或MRI确诊;②病程短于3个月;③年龄区间为45~80岁;④患者均为单侧肢体偏瘫,但可通过辅助于平地步行5 min;⑤无感觉、认知功能障碍,简易智力测试量表(AMT)>7分<sup>[8]</sup>。排除标准:①疾病处于进展期;②经评估伴有重要脏器功能严重损害;③患者头部/下侧肢体有皮损破损或者感染,影响电极使用;③颅脑外伤或肿瘤;④存在影响步行能力或者其他神经肌肉、骨关节活动的疾病;⑤患者脑内有金属植入物,或者带有心脏起搏器;⑥患者大脑颅骨存在缺损;⑦蛛网膜下腔出血。

表1 两组患者一般资料比较  
Table 1 Comparison of baseline date between two groups

组别	<i>n</i>	年龄/岁	性别(男/女)	体质量指数/kg·m <sup>-2</sup>	发病到治疗时间/d	偏瘫侧/例	
						左侧	右侧
对照组	50	60.55±4.52	33/17	21.55±1.85	38.44±5.85	19	31
观察组	50	60.82±4.18	30/20	21.44±1.56	38.13±5.41	24	26
<i>t</i> / $\chi^2$ 值		0.310	0.381	0.321	0.275	1.020	
<i>P</i> 值		0.757	0.534	0.749	0.784	0.313	

1.2 方法

所有患者在入组后首先进行头颅MRI检查,并通过Berg平衡量表(BBS)量表及Fugl-Meyer下肢功能评定量表(FMA-LE)对下肢功能及平衡力进行观察。同时给予综合康复训练,包含偏瘫肢体综合训练、生活功能训练、作业治疗、传统物理因子治疗、等速肌力训练、下肢力量训练等。

观察组在此基础上给予四通道FES治疗,选取患者偏瘫肢体各大肌肉上运动点安置刺激电极,运动点是通过多功能电疗综合定位模式在对肢体评估后选取,具体个性化的特点,波形为对称方波,频率设置为30 Hz,脉宽设置为200  $\mu$ s,行走周期定为5 s,缓慢增加电流强度直到患者最大耐受为止。治疗时间为30 min/次,5次/周,持续2周,连续10次。

对照组在此基础上接受与观察组同一FES治疗仪双通道电刺激模式,电极置于患侧下肢的胫骨前肌,而股四头肌、腓肠肌、腓绳肌3块肌肉仅作安慰刺激。治疗2周后,再次进行BBS及Fugl-Meyer下肢评定,并使用磁共振对两组患者治疗疗效进行评价。

1.3 观察指标

**1.3.1 两组患者下肢功能及平衡功能比较** 下肢功能通过FMA-LE量表进行评估,量表包含17个项目,各项0~2分,得分越高则认为恢复越好<sup>[9]</sup>。平衡功能通过BBS量表进行评估,量表包含14个项目,各项0~4分,患者得分越高,则认为平衡力越好<sup>[10]</sup>。

**1.3.2 MRI平扫** 采用3.0T超导核磁共振,嘱患者取仰卧位,行常规检查,包括横轴位、T<sub>1</sub>WI、T<sub>2</sub>WI、FLAR序列以及矢状位下T<sub>1</sub>WI序列。DTI检查:采用平面回波成像扫描,扫描的范围为头顶-枕骨大孔平面-头颈部各血管,参数设定:TR=12 000 ms,TE=87 ms,视野:240 mm×240 mm,矩阵:128×128,层厚:3 mm,层间距:1.5 mm,层数:44,在15个方向测量弥散权重采集相关系数,b值为800 s/mm<sup>2</sup>,检查时间约160 s。图像处理:将所有检查参数传送至ADW工作站处理,参考DWI-B0图,取相应的DTI序列参数,详细记录各向异性指数(FA)、平均弥散系数(DCavg)、

容积比(VRA)及衰减指数(Exat)。以上所有参数均由本院至少3名工作年限5年以上的主治医师决定。详细记录所有的FA、DCavg、VRA及Exat参数。

1.4 统计学方法

应用SPSS24.0软件处理数据,符合正态分布的计量资料以均数±标准差表示,采用 $t$ 检验;计数资料以频数( $n$ )、百分率(%)表示,采用 $\chi^2$ 检验,观察组FMA-LE、BBS评分与DTI参数的相关性,采用Pearson相关性分析。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者FMA-LE、BBS评分比较

对照组与观察组治疗后的FMA-LE、BBS评分均呈现上升趋势,且观察组升高显著( $P<0.05$ );治疗2周后,观察组患者的FMA-LE、BBS评分高于对照组( $P<0.05$ )。见表2。

表2 两组患者FMA-LE、BBS评分比较( $\bar{x}\pm s$ ,分)  
Table 2 Comparison of FMA-LE and BBS scores between two groups (Mean±SD, scores)

组别	$n$	BBS		FMA-LE	
		治疗前	治疗2周后	治疗前	治疗2周后
对照组	50	10.11±1.58	16.14±4.52*	17.44±3.20	23.11±2.10*
观察组	50	10.44±1.20	20.20±4.11*	17.20±3.19	25.19±1.36*
$t$ 值		1.176	4.699	0.376	5.879
$P$ 值		0.242	0.001	0.708	0.001

\*表示与治疗前比较, $P<0.05$

2.2 两组患者DTI参数比较

MRI扫描并分析DTI参数,治疗前,两组患者的FA、DCavg、VRA、Exat比较差异无统计学意义( $P>0.05$ );治疗2周后,观察组患者的FA、DCavg、VRA显著高于对照组,Exat显著低于对照组( $P<0.05$ )。见表3。

表3 两组患者的DTI参数比较( $\bar{x}\pm s$ )  
Table 3 Comparison of DTI parameters between two groups (Mean±SD)

组别	$n$	FA		DCavg		VRA		Exat	
		治疗前	治疗2周后	治疗前	治疗2周后	治疗前	治疗2周后	治疗前	治疗2周后
对照组	50	0.24±0.09	0.36±0.13	1.97±0.42	3.06±0.62	0.34±0.10	0.62±0.09	0.64±0.21	0.42±0.12
观察组	50	0.23±0.12	0.44±0.10	1.99±0.68	3.36±0.36	0.31±0.13	0.74±0.13	0.65±0.13	0.39±0.17
$t$ 值		0.471	3.449	0.177	2.959	1.293	6.367	0.286	1.019
$P$ 值		0.638	0.001	0.860	0.004	0.199	0.001	0.775	0.311



2.3 观察组 FMA-LE、BBS 评分与 DTI 参数的相关性分析

经分析, 观察组患者的 FMA-LE 评分与 FA、DCavg、VRA 呈正相关, 与 Exat 呈负相关。观察组的 BBS 评分与 FA、VRA 呈正相关, 与 Exat 呈负相关, 与 DCavg 无明显相关性。见表 4。

表 4 观察组 FMA-LE、BBS 评分与 DTI 参数的相关性分析  
Table 4 Correlation of FMA-LE/BBS score with DTI parameters

组别	FMA-LE		BBS	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
FA	0.556	0.016	0.567	0.015
DCavg	0.551	0.019	0.411	0.410
VRA	0.494	0.024	0.511	0.031
Exat	-0.551	0.010	-0.498	0.030

3 讨论

相关研究数据显示, 缺血性脑卒中发病率、死亡率高, 及时成功救治后的致残率高, 对患者的生活质量及身体健康产生不同程度的影响<sup>[11]</sup>。因此, 缺血性脑卒中后遗症患者的后续康复治疗持续受到临床关注, 且已取得了一定进展。诸多学者认为, 该疾病康复的要点在于促进中枢神经系统功能重建和恢复<sup>[12]</sup>。功能性电刺激是一种广泛应用的康复治疗技术, 其应用高、低、中频等瞬间出现的医用电流, 刺激失去神经控制的肌肉, 促使其收缩, 以获取有益的功能运动。本研究应用四通道 FES 疗法, 能够对健康人的步伐进行模拟, 在治疗下肢偏瘫患者过程中依据健康人行走时的肌肉收缩顺序进行刺激, 促使其行走, 可达到帮助其恢复正常步态的目的<sup>[13]</sup>。李娟等<sup>[14]</sup>研究中得出结论, FES 能够改善肢体偏瘫患者下肢活动能力。分析原因: ①FES 可引发肌肉组织生物学变化, 其作用于机体后通过刺激可保留肌肉中的糖原含量、节省相应蛋白质消耗, 且模拟健康人肌肉规律收缩与舒张后, 促进血流及淋巴回流, 进而改善机体营养、代谢, 延缓肌肉萎缩, 加之电刺激的持续累及作用, 利于肢体功能恢复<sup>[15-16]</sup>。②痉挛缓解, 缺血性脑卒中由于中枢神经受到刺激与损伤、肌肉本身受到损伤与束缚后, 可伴有腱反射的亢进, 患者可表现为运动及姿势异常, 经 FES 刺激后, 能够启动反射机制, 促使运动神经元及运动动作活化, 在每次刺激及辅助行走时均不断促使肌肉规律性活动, 利于肢体得到锻炼<sup>[17-18]</sup>。③治疗时各通道依据正常肌群

收缩时的先后顺序加以刺激, 诱发肢体产生正常运动, 不断重复刺激相应神经产生累积效应后, 可实现肢体与平衡功能恢复。肢体与平衡功能指标具有主观性, 随着临床研究的逐渐深入, 发现影像学技术能够对神经损伤情况进行评定, 笔者考虑通过 DTI 技术进行检查, 且与主观评分建立联系, 更能够准确评估缺血性卒中患者康复情况, 以调整后续治疗方案。

DTI 是在弥散性加权成像技术的基础上发展起来的特殊的 MRI 技术, 基于分子布朗运动原理, 通过对组织内水分子的弥散特性, 无创检测组织微结构损伤, 评估脑神经受损情况<sup>[19]</sup>。该技术不仅能够准确诊断脑卒中、腰椎间盘突出症等, 评估预后康复效果, 还能够反映脑部肿瘤与神经细胞连接的相关性, 临床应用价值较高<sup>[20]</sup>。本研究结果显示两组患者的 FA、DCavg、VRA、Exat 相比具有差异性, DTI 对脑白质纤维改变具有较高敏感性, FA、DCavg、VRA、Exat 值是 DTI 检测的重要参数。FA 是最常用参数, 正常情况下介于 0~1.0, 在明显变化的各向异性运动区域中值升高, 而且各向同性运动区域中的值降低明显<sup>[21]</sup>。相关研究得出 FA 值在脑卒中急性期时显著高于慢性期, 可推测与疾病的发展程度呈现正向关系<sup>[22]</sup>。VRA 与 FA 有相似处, 均能够对各组织的各向异性进行反应, 且敏感度相对高。Exat 与 DCavg 均可反应组织的弥散特性, 但呈现反比例关系<sup>[23]</sup>。Zhang 等<sup>[24]</sup>研究中得出癫痫患者脑皮质的各向异性分数发生明显变化。Xie 等<sup>[25]</sup>对脑小血管疾病患者通过 DTI 评估, 发现 FA、DCavg、VRA 等参数不仅与对照组有差异, 且经治疗后也发生相应变化, 提示其可作为疾病辅助诊断、改善预后的有效方式。本研究虽然能够证实 DTI 在辅助评估缺血性脑卒中后遗症患者中一定的客观性及临床意义, 但存在一些局限性, 表现为对存活组织功能无法确定、扫描时间过长、感兴趣区绘制有误差等, 后续还需要针对上述问题提出解决方法, 尽可能避免误差, 提高评估效率。

综上所述, 通过 DTI 可以对四通道 FES 治疗缺血性脑卒中后遗症患者的疗效进行评价, 其各项参数与 BBS、FMA-LE 评分呈现明显相关性, 提示可通过 MRI 协助医生认识神经功能缺损与神经病理学改变之间的相关性, 为准确评估预后及制定个体化康复方法提供参考。

【参考文献】

[1] Tan C, Wang Z, Zheng M, et al. Responses of immune organs after cerebral ischemic stroke[J]. J Nippon Med Sch, 2021, 88(3): 228-237.  
[2] Boese AC, Le QS, Pham D, et al. Neural stem cell therapy for subacute and chronic ischemic stroke[J]. Stem Cell Res Ther, 2018, 9(1): 1-17.  
[3] 曾进胜, 于生元, 谢鹏. 重视急性脑梗死后缺血半暗带的临床评估和治疗[J]. 中国神经精神疾病杂志, 2021, 47(6): 321-323.

- Zeng JS, Yu SY, Xie P. Clinical evaluation and treatment of ischemic penumbra after acute cerebral infarction [J]. *Chinese Journal of Neuropsychiatric Disorders*, 2021, 47(6): 321-323.
- [4] 陈培荣, 李奎, 吴丹丽, 等. 多通路功能性电刺激四肢联动对于脑卒中患者下肢功能恢复的影响[J]. *中国康复*, 2017, 32(6): 476-478.
- Chen PR, Li K, Wu DL, et al. Effect of multi-channel functional electrical stimulation on functional recovery of lower limb in stroke patients [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation*, 2017, 32(6): 476-478.
- [5] 张顺喜, 郭永亮, 贺灵慧, 等. 基于正常行走模式的功能性电刺激对脑卒中患者行走功能即时影响的随机对照研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2019, 34(5): 527-532.
- Zhang SX, Guo YL, He LH, et al. A randomized controlled study of the immediate effect of functional electrical stimulation based on normal walking pattern on walking function in stroke patients [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2019, 34(5): 527-532.
- [6] 王臣, 董影. 磁共振弥散成像联合弥散张量纤维束成像技术对老年脑梗死患者的疾病评估价值分析[J]. *重庆医学*, 2019, 48(24): 4190-4193.
- Wang C, Dong Y. Evaluation value of magnetic resonance diffusion imaging combined with diffusion tensor fiber beam imaging in elderly patients with cerebral infarction [J]. *Chongqing Medical Journal*, 2019, 48(24): 4190-4193.
- [7] 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. 中国急性脑卒中临床诊疗规范共识2018[J]. *中华神经科杂志*, 2018, 51(4): 247-255.
- Chinese Society of Neurology, Cerebrovascular Group, Chinese Society of Neurology. Consensus of clinical research norms for acute stroke in China 2018 [J]. *Chinese Journal of Neurology*, 2018, 51(4): 247-255.
- [8] 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.
- Wu SL, Yan TB, Huang LR. Research tool of validity and reliability of simple intelligence test scale [J]. *Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2003, 25(3): 140-142.
- [9] 许光旭, 高晓阳, 陈文. 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.
- Xu GX, Gao XY, Chen W. Sensitivity and practicability of Fugl-Meyer motor function score [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation*, 2001, 16(1): 18-19.
- [10] 杨雅琴, 周亚楠, 邢德利, 等. Berg平衡量表应用于帕金森病患者的信度分析[J]. *中国康复理论与实践*, 2016, 22(3): 303-305.
- Yang YQ, Zhou YN, Xing DL, et al. Reliability analysis of Berg balance scale applied to patients with Parkinson's disease [J]. *Chinese Rehabilitation Theory and Practice*, 2016, 22(3): 303-305.
- [11] Kang N, Lee RD, Lee JH, et al. Functional balance and postural control improvements in patients with stroke after noninvasive brain stimulation: a meta-analysis [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2020, 101(1): 141-153.
- [12] 许超, 冯天保, 韩炜, 等. 磁共振弥散张量成像对脑小血管病变的诊断效能研究[J]. *中国医学装备*, 2020, 17(11): 46-49.
- Xu C, Feng TB, Han W, et al. Study on the diagnostic efficacy of magnetic resonance diffusion tensor imaging in small cerebral vascular diseases [J]. *Chinese Medical Equipment*, 2020, 17(11): 46-49.
- [13] 何峰, 何蓓蓓, 王仲朋, 等. 经颅电、磁刺激的神经康复研究进展与应用展望[J]. *中国医疗器械杂志*, 2020, 44(6): 513-519.
- He F, He BB, Wang ZP, et al. Research progress and application prospect of transcranial electrical and magnetic stimulation in neural rehabilitation [J]. *Chinese Journal of Medical Devices*, 2020, 44(6): 513-519.
- [14] 李娟, 罗伦, 张禄菊, 等. FES康复踏板联合太极运动想象疗法对脑卒中患者下肢运动功能、本体感觉以及ADL的影响[J]. *神经损伤与功能重建*, 2021, 16(3): 180-182.
- Li J, Luo Lun, Zhang LJ, et al. Effects of FES rehabilitation treadmill combined with Tai Chi motor imagination therapy on lower limb motor function, proprioception and ADL in stroke patients [J]. *Nerve Injury and Functional Reconstruction*, 2021, 16(3): 180-182.
- [15] Sharififar S, Shuster JJ, Bishop MD. Adding electrical stimulation during standard rehabilitation after stroke to improve motor function. a systematic review and meta-analysis [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2018, 61(5): 339-344.
- [16] Uswatte G, Taub E, Bowman MH, et al. Rehabilitation of stroke patients with plegic hands: randomized controlled trial of expanded constraint-induced movement therapy [J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2018, 36(2): 225-244.
- [17] Awad LN, Hsiao HY, Binder-Macleod SA. Central drive to the paretic ankle plantarflexors affects the relationship between propulsion and walking speed after stroke [J]. *J Neur Phys Ther*, 2020, 44(1): 42-48.
- [18] Lee D, Lee G. Effect of afferent electrical stimulation with mirror therapy on motor function, balance, and gait in chronic stroke survivors: a randomized controlled trial [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2019, 55(4): 442-449.
- [19] Du J, Zhu H, Yu L, et al. Multi-dimensional diffusion tensor imaging biomarkers for cognitive decline from the preclinical stage: a study of post-stroke small vessel disease [J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 687959.
- [20] Marquez-Chin C, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review [J]. *Biomed Eng Online*, 2020, 19(1): 34-58.
- [21] Ke J, Foley M, Hitchens TK, et al. *Ex vivo* mesoscopic diffusion MRI correlates with seizure frequency in patients with uncontrolled mesial temporal lobe epilepsy [J]. *Human Brain Mapping*, 2020, 41: 4529-4548.
- [22] Ghosh A, Singh T, Singla V, et al. DTI histogram parameters correlate with the extent of myoinvasion and tumor type in endometrial carcinoma: a preliminary analysis [J]. *Acta Radiol*, 2020, 61(5): 675-684.
- [23] Cacciola A, Milardi D, Basile GA, et al. The cortico-rubral and cerebello-rubral pathways are topographically organized within the human red nucleus [J]. *Sci Rep*, 2019, 9: 12117.
- [24] Zhang YM, Jiang LW, Zhang D, et al. Thalamocortical structural connectivity abnormalities in drug-resistant generalized epilepsy: a diffusion tensor imaging study [J]. *Brain Res*, 2020, 1727: 146558.
- [25] Xie Y, Xie L, Kang F, et al. Association between diffusion tensor imaging findings and domain-specific cognitive impairment in cerebral small vessel disease: a protocol for systematic review and meta-analysis [J]. *BMJ Open*, 2021, 11(9): e049203.

(编辑: 黄开颜)