

·临床研究·

短时程非强直性低频超强神经电刺激对脑卒中患者脊髓运动神经元兴奋性的影响*

刘 罡¹ 贾晋瑄² 曹 悦¹ 田 闪¹ 沈雪彦¹ 陆蓉蓉¹ 陈 颖¹ 谢鸿宇¹ 余克威¹ 吴军发¹ 吴 毅^{1,3}

摘要

目的:研究非强直性低频超强神经电刺激对脊髓运动神经元兴奋性的影响,为完善脑卒中后外周神经电刺激治疗参数提供参考。

方法:分别比较脑卒中患者和健康人群在0.5Hz低频F波检测中最初5次和最终5次超强刺激下F波次数、潜伏期和F波幅/M波幅(F/M)的变化情况。F波检测通过刺激腓骨头下腓总神经完成,记录肌肉为胫骨前肌和腓骨肌。

结果:在脑卒中患者和健康人群,超强低频腓总神经电刺激前后胫骨前肌和腓骨肌F波出现次数、F/M值、潜伏期均无明显变化。

结论:短时程非强直性低频超强周围神经电刺激不改变脑卒中患者和健康人群脊髓运动神经元的兴奋性;在超强刺激强度下,不同刺激频率可能对脊髓运动神经元兴奋性产生差异性影响。

关键词 神经兴奋性;脊髓;电刺激;低频;脑卒中

中图分类号:R493,R743.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2021)-05-0526-07

Short term non-tetanic low frequency supramaximal neural electrical stimulation does not alter the post-stroke excitability of spinal motor neuron/LIU Gang, CHIA Chin-hsuan, CAO Yue, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2021, 36(5): 526—532

Abstract

Objective: To study the effect of non-tetanic low frequency(LF) supramaximal neural electrical stimulation (NES) on the excitability of spinal motor neuron and to provide reference for improving the parameters of peripheral nerve electrical stimulation after stroke.

Method: The occurrence number of F wave, latency, and F wave amplitude/M wave amplitude(F/M) were recorded in stroke patients and healthy participants, and the difference between the first five and last five stimuli were analyzed. The stimulation frequency of F wave examination was 0.5Hz with a total of 20 times stimuli. F wave was detected by stimulating common peroneal nerves just beneath the fibular head, and the recorded muscles were tibialis anterior(TA) and peroneus muscle(PN).

Result: In both healthy participants and stroke patients, there was no significant change in occurrence number, F/M/ and latency after LF supramaximal NES.

Conclusion: The excitability of spinal motor neurons is not affected by short term non-tetanic LF supramaximal peripheral nerve stimulation. The variation of the spinal motor excitability may depend on the frequency in supramaximal NES.

Author's address Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai, 200040

Key word neural excitability; spinal cord; motor neuron; electrical stimulation; low frequency; stroke

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2021.05.004

*基金项目:国家重点研发计划(2018YFC2001700);上海市卫计委项目(20154Y0101);上海市科学技术委员会项目(17411953900)

1 复旦大学附属华山医院康复医学科,上海市,200040; 2 上海交通大学医学院附属瑞金医院康复医学科; 3 通讯作者

第一作者简介:刘罡,男,博士,主治医师; 收稿日期:2021-01-20

偏瘫和痉挛是脑卒中后常见的功能障碍,也是神经康复的重点内容^[1-2]。脊髓前角运动神经元,作为脑与外周肌肉连接的中继站,其兴奋性与卒中后肢体瘫痪、共同运动、痉挛的产生密切相关^[3-4];研究如何调控脊髓运动神经元兴奋性及其作用机制,对于促进运动功能恢复和控制痉挛有重要临床意义。

经皮电刺激(transcutaneous electrical stimulation, TES),因其可以无创、简便地直接作用于周围神经和靶肌肉,是临床常用的物理治疗手段^[5-6]。诸多研究也表明, TES具有不同程度地控制痉挛和促进运动功能恢复的作用^[7-10]。然而,目前 TES 的频率、强度等关键参数对脊髓运动神经元兴奋性的影响尚不完整,不同试验电刺激参数不一,有些试验结果甚至相互矛盾。既往有研究发现,仅达到感觉阈值而不引起肌肉收缩的弱强度经皮肌肉电刺激可以增加健康人群下运动神经元的兴奋性^[11]。而另一些到达感觉阈的电刺激研究却得出了相反的结果^[12-13]。在超过运动阈值但没有引起肌肉最大收缩的次强强度刺激下,下运动神经元兴奋性似乎随刺激强度的增加而相应的线性增加,而频率对其没有影响^[14]。同样在类似次强刺激下,有研究却发现运动神经元兴奋性出现了显著下降^[15]。进一步增加刺激强度至引发肌肉最大收缩,超强刺激似乎可以降低运动神经元兴奋性。有研究发现频率 30Hz、可引起肌肉强直收缩的经皮超强电刺激肌肉能够使健康人相应的脊髓运动神经元兴奋性下降^[16]。然而,不引起肌肉强直性收缩的低频(<20Hz)超强神经肌肉电刺激,如可诱发足背屈的腓总神经电刺激,虽常用于促进脑卒中后运动康复临床实践^[7,17],但其对脊髓运动神经元兴奋性的影响还少有报道。

为使 TES 调控脊髓兴奋性的参数研究更加完整,本实验拟通过比较低频 F 波检测中最初 5 次和最终 5 次超强刺激下胫骨前肌和腓骨肌 F 波参数的变化情况,研究短时程低频超强刺激周围神经对健康人群和脑卒中患者相应脊髓运动神经元兴奋性的即时影响,并结合既往相关试验结果,探讨其对电刺激调控脊髓兴奋性的作用。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究为前瞻性自身对照研究。研究已通过华山医院伦理委员会审查,并在中国临床试验注册中心登记注册(注册号:ChiCTR1800016212)。于 2019 年 7—10 月对健康人群及脑卒中患者进行 F 波检测。

脑卒中患者入选及排除标准:①经 CT、MRI 等影像学检查证实,确诊为脑卒中;②30—75 岁;③第一次发生脑卒中;④无意识、认知、言语及精神障碍等影响患者配合检查;⑤无周围神经疾病和脊髓损伤;⑥自愿参加,患者签署知情同意书。

健康受试者入选及排除标准:①自愿参加并签署知情同意书;②年龄 30—75 岁;③身体健康,既往无脑血管疾病史;④体格检查无特殊,无下肢骨折或周围神经损伤病史。

根据预试验进行样本量计算(检验效能=0.99, $\alpha=0.025$),需 24 名受试者。本试验共招募 33 例脑卒中患者(男 27 例,女 6 例,平均年龄 52.45 ± 1.96 , 平均病程 162.10 ± 36.68 天),以及 25 例健康受试者(男 17 例,女 8 例,平均年龄 49.84 ± 1.98 岁)。所有受试者均已签署知情同意书。

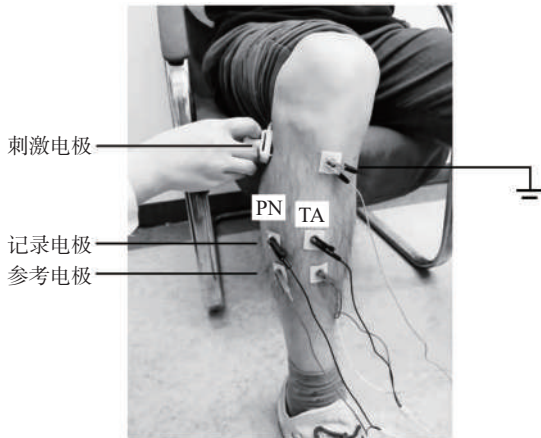
1.2 试验流程

受试者在检测前休息至少 5min。检测时受试者呈放松坐位,屈膝 90°、脚掌置于平地,双眼直视前方。采用诺诚 NeuroCare-C 心电图与诱发电位仪进行下肢 F 波检测。分别在受试者左右两侧腓总神经的同一部位进行连续 20 次超强刺激(强度 40mA, 频率 0.5Hz, 时程 0.2ms),并记录胫骨前肌和腓骨肌 F 波的参数数据。腓总神经刺激点位于腓骨小头后下方约 0.5cm 处。记录电极分别置于胫骨前肌肌腹(胫骨结节下方 10cm, 胫骨外侧 1cm)以及腓骨肌肌腹(腓骨小头下 10cm);参考电极置于记录电极远端 2cm;地线置于胫骨结节下方 0.5cm(图 1)。

F 波定义为在 M 波后记录到峰-峰波幅大于 0.1mV 的波,由同一位研究人员进行全部检测结果的判定。本试验记录的 F 波参数包括 F 波出现率(20 个连续刺激中出现 F 波的百分比),以及 F 波、M 波的波幅和潜伏期,并且分别统计前 5 次刺激以及后 5 次刺激中 F 波出现的个数、F/M 波幅比(F/M)、F 波潜伏期。

1.3 统计学分析

图1 F波检查示意图



TA:胫骨前肌,PN:腓骨肌

为观察低频超强刺激对脊髓前角兴奋性的影响,对20次连续刺激中的前5次(第1—5个刺激)以及后5次(第16—20个刺激)的F波出现个数、F/M以及F波潜伏期进行比较。本试验采用 GraphPad Prism Version 6.01 统计软件,结果以均数±标准差表示,研究数据经正态性检验不服从正态分布,故前后比较采用非参数检验,以 $P < 0.05$ 为差异有显著性意义。

2 结果

2.1 健康受试者低频超强电刺激前后F波比较

健康受试者胫骨前肌及腓骨肌的F波总体出现率分别为 $41.500 \pm 3.189\%$ 和 $64.000 \pm 3.482\%$ 。胫骨前肌前5次及后5次刺激F波出现个数分别为 2.120 ± 0.201 个和 2.180 ± 0.211 个,前后比较无显著性差异 ($P > 0.05$)。腓骨肌前5次及后5次超强低频刺激F波出现个数分别为 3.120 ± 0.191 个和 3.300 ± 0.181 个,前后比较也无显著性差异 ($P > 0.05$),见图2A。

胫骨前肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F/M分别为 0.035 ± 0.003 和 0.044 ± 0.008 ,两者比较无显著性差异 ($P > 0.05$)。腓骨肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F/M分别为 0.028 ± 0.003 和 0.027 ± 0.003 ,前后比较也无显著性差异 ($P > 0.05$),见图2B。

胫骨前肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F波潜伏期分别为 34.460 ± 0.608 和 $33.800 \pm$

0.516 ,前后比较无显著性差异 ($P > 0.05$)。腓骨肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的潜伏期分别为 31.630 ± 0.414 和 31.920 ± 0.379 ,前后比较也无显著性差异 ($P > 0.05$),见图2C。

2.2 脑卒中患者患侧低频超强电刺激前后F波

脑卒中患者患侧的胫骨前肌及腓骨肌的F波总体出现率分别为 $40.300\% \pm 4.564\%$ 和 $58.480\% \pm 4.853\%$ 。胫骨前肌前5次及后5次超强低频刺激F波出现个数分别为 1.909 ± 0.293 个和 1.818 ± 0.252 个,前后比较无显著性差异 ($P > 0.05$)。腓骨肌前5次及后5次超强低频刺激F波出现个数分别为 2.758 ± 0.279 个和 3.000 ± 0.261 个,前后比较也无显著性差异 ($P > 0.05$),见图3A。

胫骨前肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F/M分别为 0.050 ± 0.010 和 0.047 ± 0.007 ,前后比较无显著性差异 ($P > 0.05$)。腓骨肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F/M分别为 0.033 ± 0.004 和 0.034 ± 0.003 ,前后比较也无显著性差异 ($P > 0.05$),见图3B。

胫骨前肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F波潜伏期分别为 35.050 ± 0.647 和 32.960 ± 1.035 ,前后比较无显著性差异 ($P > 0.05$)。腓骨肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F波潜伏期分别为 32.400 ± 0.878 和 34.570 ± 0.479 ,前后比较也无显著性差异 ($P > 0.05$),见图3C。

2.3 脑卒中患者健侧低频超强电刺激前后F波

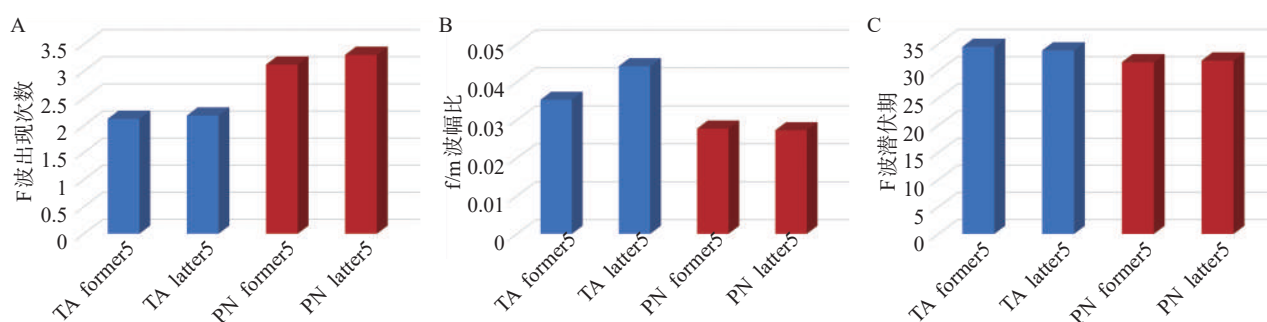
脑卒中患者健侧的胫骨前肌及腓骨肌的F波出现率分别为 $40.640\% \pm 4.524\%$ 和 $57.42\% \pm 4.077\%$ 。胫骨前肌前5次及后5次超强低频刺激F波出现个数分别为 1.906 ± 0.255 个和 1.969 ± 0.300 个,前后比较无显著性差异 ($P > 0.05$),见图4A。腓骨肌前5次及后5次超强低频刺激F波出现个数分别为 2.667 ± 0.291 个和 3.031 ± 0.231 个,前后比较也无显著性差异 ($P > 0.05$)。

胫骨前肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F/M分别为 0.048 ± 0.007 和 0.047 ± 0.009 ,前后比较无显著性差异 ($P > 0.05$),见图4B。腓骨肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F/M分别为 0.037 ± 0.006 和 0.033 ± 0.003 ,前后比较也无显著性差异 ($P > 0.05$)。

胫骨前肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F波潜伏期分别为 33.730 ± 0.783 和 33.810 ± 0.642 ,前后比较无显著性差异($P>0.05$)(图4C)。腓

骨肌前5次及后5次超强低频刺激出现F波中的F波潜伏期分别为 33.050 ± 0.532 和 32.590 ± 0.616 ,前后比较也无显著性差异($P>0.05$)。

图2 健康人群低频非强直性超强电刺激前后F波参数变化



健康人群胫骨前肌和腓骨肌F波出现次数(A)、F/M值(B)和F波潜伏期(C)在连续低频超强电刺激腓总神经后均无显著变化

3 讨论

脊髓运动神经元主导的运动单位是运动产生的最后通路,与脑卒中后运动功能障碍密切相关。脊髓运动神经元兴奋性受脑部下行动信号和外周传入信号的共同影响。兴奋性过低则无法对脑卒中后微弱的下行运动指令产生反应,从而表现为相应肌肉的瘫痪,而兴奋性过高则产生痉挛。因此,探究调控脊髓运动神经元兴奋性的方法具有重要的临床意义。

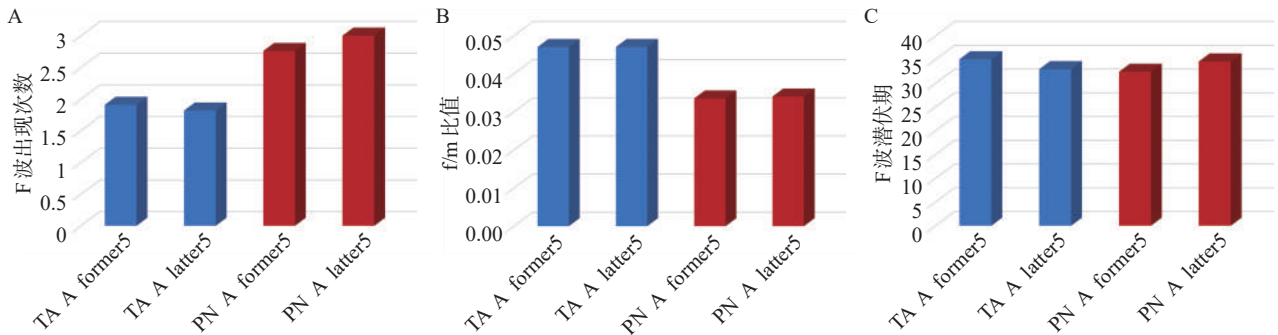
既往研究多采用电生理检查的方法评估脊髓运动神经元的兴奋性^[11,16,18-20],主要通过比较某种干预前后电生理检查各参数尤其是F波出现率和F/M值,或者H反射中Hmax/Mmax值的变化,反映干预措施对脊髓运动神经元兴奋性的影响。而有研究认为相对于H反射,F波是更为敏感的评价脊髓运动神经元兴奋性的方法^[21]。此外,与H反射仅可见于少数肌肉不同,F波几乎可用于所有肌肉的检测,使其临床应用更加广泛。更为重要的是,F波检查过程中重复施加的电流刺激本身即可被视为一连串的超强神经电刺激。因此,本研究既采用F波作为评价脊髓运动神经元兴奋性的方法,又将F波检查过程自身作为低频非强直性超强电刺激的干预手段。

综合既往相关研究,外周低频电刺激可根据刺激强度粗略地划分为强刺激(超过运动阈值,导致肌肉收缩)和弱刺激(超过感觉阈值,产生感觉但不引发肌肉收缩)。在弱刺激强度范围内,研究调控脊髓

运动兴奋性的不同试验出现了两种截然相反的结果:有些研究发现弱刺激可增加H反射的波幅,表明刺激后兴奋性增高^[11];而有些研究^[22]却发现弱刺激后H反射的波幅下降,从而提示在弱强度刺激范围内可能有不同的传入性调控机制存在。目前研究较为充分的抑制性机制主要涉及初级传入去极化(primary afferent depolarization, PAD)所介导的突触前抑制(presynaptic inhibition),和Ia传入纤维的同突触兴奋后抑制(homosynaptic postactivation depression, HPAD)。突触前抑制和HPAD共同作用减少了运动神经元接受的刺激性信号,导致弱刺激后兴奋性的下降^[23]。相反,有研究^[11]结果提示弱刺激可能还可通过由皮肤感受器介导的传入性信号抑制突触前抑制,从而导致刺激后脊髓兴奋性的增高。目前介导此种传入信号的神经纤维类型还不能确定(可能是II类^[24]或A β 类纤维^[25]),其兴奋阈值相对Ia纤维更低,引发该传入信号的弱刺激强度也相对较低,但目前两种弱刺激强度的界限还不能确定。

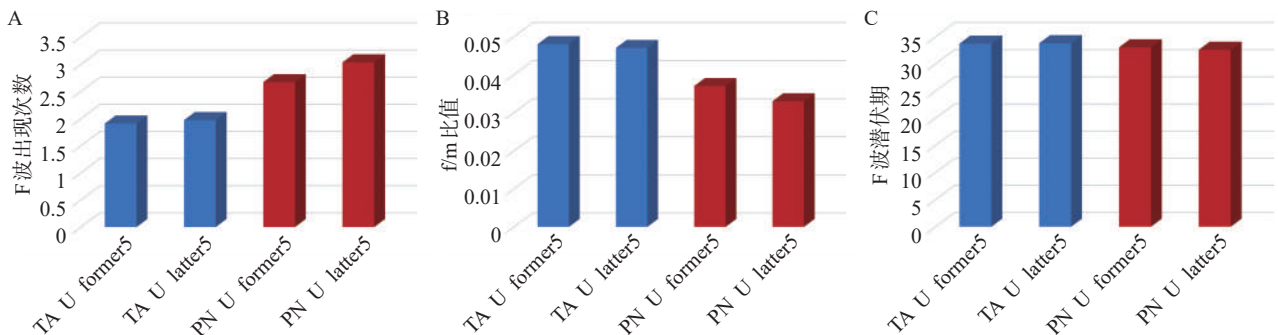
另一方面,强刺激还可进一步按刺激频率(一般以30—50Hz为界^[12])是否足以引发肌肉强直收缩分为强直性刺激和非强直性刺激。两种刺激频率似乎也可对脊髓兴奋性产生不同的影响。本研究结果表明,无论在脑损伤患者还是在健康人群,短时程的非强直性低频超强腓总神经电刺激后,其支配的一对拮抗肌(胫骨前肌和腓骨肌)F波出现率、F/M值、潜

图3 脑损伤患者患侧低频非强直性超强电刺激前后F波参数变化



脑损伤患者患侧胫骨前肌和腓骨肌F波出现次数(A)、F/M值(B)和F波潜伏期(C)在连续低频超强电刺激腓总神经后均无显著变化

图4 脑损伤患者健侧低频非强直性超强电刺激前后F波参数变化



脑损伤患者健侧胫骨前肌和腓骨肌F波出现次数(A)、F/M值(B)和F波潜伏期(C)在连续低频超强电刺激腓总神经后均无显著变化

伏期均无明显变化,显示其不能改变生理及病理状态下脊髓前角运动神经元的兴奋性。这与既往强直性低频超强电刺激导致脊髓运动神经元兴奋性下降的研究结果不相一致^[11,16],提示在外周超强刺激下,频率可能对脊髓兴奋性产生不同的影响。在此,我们推测因为运动神经纤维没有被兴奋,低强度电刺激对脊髓神经元的兴奋性的调控主要由传入纤维所介导;而高强度刺激时,运动神经纤维的逆向传导可能会影响脊髓运动神经元的兴奋性。F波是超强刺激沿运动神经轴突逆向传导激活部分脊髓前角运动神经元产生的迟发性反应。一般情况下,单次超强刺激仅可使约5%的运动神经元产生兴奋,从而产生低波幅的F波。随刺激频率增高,逆行传导信号可在单位时间内兴奋更多的运动神经元,从而可能使部分已兴奋细胞在下次刺激时仍处于不应期内,因而表现为F波出现率的下降和/或F/M值的降低。而非强直性电刺激,因为刺激间隔足够长,可使上次

刺激所兴奋的神经元兴奋性完全恢复,从而不影响后续的F波参数。同样地,既往有试验表明在非强直性次强刺激条件下,随刺激强度增加可逆向激活更多的前角运动神经元,F/M值相应线性增加;而当刺激强度恒定时,不引起强直收缩的小范围刺激频率波动(0.5—2Hz)对F波参数无明显影响^[14]。一项电磁刺激对神经元chay模型放电影响的研究也发现,在相同电流刺激强度下,随刺激频率增加神经元膜电位发放次数逐渐下降,从单细胞层面也印证了该假设^[26]。此外,肌肉处在不同收缩状态可因其传入神经冲动不同从而导致运动神经元兴奋性的变化^[27],这也可能是强直性超强刺激降低运动神经元兴奋性而非强直性刺激下兴奋性不变的原因。另有研究发现,中枢神经系统从单神经元到神经网络的不同水平均存在神经振荡现象^[28—30]。神经元/神经网络可根据输入电磁信号的变化而改变其动作电位的发放率或阈下膜电位的振荡频率^[31—33]。较高的刺

激频率可对神经网络的神经振荡产生较大影响^[34],而低频率刺激可能因刺激频率与振荡频率差异较大而影响较小,但该假设的具体机制目前还不清楚。

4 结论

本研究通过分别检测脑卒中患者和健康受试者接受刺激前后一组拮抗肌F波参数的变化,发现短程非强直性低频超强周围神经电刺激不能改变脊髓运动神经元的兴奋性,提示在强刺激条件下运动纤维逆向传导对脊髓兴奋性的影响和刺激频率相关,因此,在临床实践中,为调控脊髓运动神经元兴奋性,可能需减少刺激强度或将刺激频率提高至引起肌肉强直性收缩的水平。本研究的意义还在于提示,不同的检测手段本身可能会对脊髓运动神经元兴奋性的评价结果产生影响。如本试验所采用的F波检测,因不涉及突触的传递,因此,理论上超强刺激同样可通过感觉传入而引发的PAD和HPAD并没有造成F/M值的下降。而H反射则可能受不同传入纤维的兴奋阈值、突触前抑制等因素的影响,其本质上反映的从Ia纤维传入到运动神经元传出这一单突触反射的效能。因此,将来的相关试验需根据可能涉及的调控脊髓兴奋性的机制不同,选用适合的检测方法以减少系统误差;或采用不同方法共同检测对比验证以确保结果的可靠性。

参考文献

- [1] Kuo CL, Hu GC. Post-stroke spasticity: a review of epidemiology, pathophysiology, and treatments[J]. *Int J Gerontol*, 2018, 12(4):280—284.
- [2] Gittler M, Davis AM. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery[J]. *JAMA*, 2018, 319(8):820—821.
- [3] Li S, Chen YT, Francisco GE, et al. A unifying pathophysiological account for post-stroke spasticity and disordered motor control[J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 468.
- [4] McMorland AJC, Runnalls KD, Byblow WD. A neuroanatomical framework for upper limb synergies after stroke[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015, 9: 6.
- [5] 严佳虞, 任朝晖. 经皮神经电刺激的临床应用研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2018, 33(3):361—364.
- [6] Nonnekes J, Benda N, van Duijnhoven H, et al. Management of gait impairments in chronic unilateral upper motor neuron lesions a review[J]. *JAMA Neurol*, 2018, 75(6): 751—758.
- [7] Knutson JS, Fu MJ, Sheffler LR, et al. Neuromuscular electrical stimulation for motor restoration in hemiplegia[J]. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 2015, 26(4):729—745.
- [8] Ping Ho Chung B, Kam Kwan Cheng B. Immediate effect of transcutaneous electrical nerve stimulation on spasticity in patients with spinal cord injury[J]. *Clin Rehabil*, 2010, 24(3):202—210.
- [9] 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.
- [10] Shen XY, Du W, Huang W, et al. Rebuilding motor function of the spinal cord based on functional electrical stimulation[J]. *Neural Regen Res*, 2016, 11(8):1327—1332.
- [11] Hardy SG, Spalding TB, Liu H, et al. The effect of transcutaneous electrical stimulation on spinal motor neuron excitability in people without known neuromuscular diseases: the roles of stimulus intensity and location[J]. *Physical Therapy*, 2002, 82(4):354—363.
- [12] Chipchase LS, Schabrun SM, Hodges PW. Corticospinal excitability is dependent on the parameters of peripheral electric stimulation: a preliminary study[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2011, 92(9):1423—1430.
- [13] Joodaki MR, Olyaei GR, Bagheri H. The effects of electrical nerve stimulation of the lower extremity on H-reflex and F-wave parameters[J]. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*, 2001, 41(1):23—28.
- [14] Fisher MA, Zhu JQ, Uddin MK, et al. Submaximal stimulation and f-wave parameters[J]. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2008, 25(5):299—303.
- [15] Borzuola R, Labanca L, Macaluso A, et al. Modulation of spinal excitability following neuromuscular electrical stimulation superimposed to voluntary contraction[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2020, 120(9):2105—2113.
- [16] Hirose H, Suzuki T, Shimada T. Excitability of spinal motor neuron function after the transcutaneous electrical stimulation (TES) in healthy subjects -F-wave study[J]. *Journal of the Japanese Physical Therapy Association*, 2006, 9(1): 17—20.
- [17] 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]. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2018, 61(5):339—344.
- [18] Cortes M, Thickbroom GW, Valls-Sole J, et al. Spinal associative stimulation: A non-invasive stimulation paradigm

- to modulate spinal excitability[J]. Clin Neurophysiol, 2011, 122(11):2254—2259.
- [19] Kondo T, Kakuda W, Yamada N, et al. Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation and intensive occupational therapy on motor neuron excitability in poststroke hemiparetic patients: a neurophysiological investigation using F-wave parameters[J]. The International Journal of Neuroscience, 2015, 125(1):25—31.
- [20] Jimenez S, Mordillo-Mateos L, Dileone M, et al. Effects of patterned peripheral nerve stimulation on soleus spinal motor neuron excitability[J]. PLoS One, 2018, 13(2):13.
- [21] Milanov IG. A comparison of methods to assess the excitability of lower motoneurons[J]. The Canadian Journal of Neurological Sciences, 1992, 19(1):64—68.
- [22] Yurtutmuş Z, Ekici Zincirci D, Bardak AN, et al. A stimulus rate that is not influenced by homosynaptic post-activation depression in chronic stroke[J]. Somatosensory & Motor Research, 2020, 37(4):271—276.
- [23] Grosprêtre S, Gueugneau N, Martin A, et al. Presynaptic inhibition mechanisms may subserve the spinal excitability modulation induced by neuromuscular electrical stimulation [J]. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2018, 40: 95—101.
- [24] Veldman MP, Maffiuletti NA, Hallett M, et al. Direct and crossed effects of somatosensory stimulation on neuronal excitability and motor performance in humans[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2014, 47: 22—35.
- [25] Daniele CA, MacDermott AB. Low-threshold primary afferent drive onto GABAergic interneurons in the superficial dorsal horn of the mouse[J]. The Journal of Neuroscience, 2009, 29(3):686—695.
- [26] Yu H, Xiao H, Si F, et al. Electrical activity in chay neuronal model under magnetic flow effect[J]. Biophysics, 2017, 5(1):1—7.
- [27] Forman D, Raj A, Button DC, et al. Corticospinal excitability of the biceps brachii is higher during arm cycling than an intensity-matched tonic contraction[J]. J Neurophysiol, 2014, 112(5):1142—1151.
- [28] Vaz AP, Inati SK, Brunel N, et al. Coupled ripple oscillations between the medial temporal lobe and neocortex retrieve human memory[J]. Science, 2019, 363(6430): 975—978.
- [29] Czarnecki A, Magloire V, Streit J. Local oscillations of spiking activity in organotypic spinal cord slice cultures[J]. Eur J Neurosci, 2008, 27(8):2076—2088.
- [30] Nicolo P, Rizk S, Magnin C, et al. Coherent neural oscillations predict future motor and language improvement after stroke[J]. Brain, 2015, 138: 3048—3060.
- [31] 温惠中, 田学隆, 欧珊, 等. 调制波对神经元动态模型放电影响的研究[J]. 成都医学院学报, 2011, 6(1):36—39.
- [32] 刘深泉, 关毅璋. 外界刺激与神经细胞电位发放的关系[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 2:80—84.
- [33] Sheffield A, Ahn S, Alagapan S, et al. Modulating neural oscillations by transcranial static magnetic field stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex: A crossover, double-blind, sham-controlled pilot study[J]. Eur J Neurosci, 2019, 49(2):250—262.
- [34] Cheron J, Cheron G. Beta-gamma burst stimulations of the inferior olive induce high-frequency oscillations in the deep cerebellar nuclei[J]. The European Journal of Neuroscience, 2018, 48(8):2879—2889.