

· 临床研究 ·

动态失稳训练对脑卒中患者姿势控制能力、平衡与步行功能的影响

马联杰^{1,2} 顾旭东^{1,2} 李岩² 傅建明² 姚云海² 陶林花² 李亮² 孙亚² 吴华²

¹浙江中医药大学,杭州 310053; ²嘉兴市第二医院(嘉兴学院附属第二医院)康复医学科,嘉兴 314000

通信作者:顾旭东,Email:jxgxd@hotmail.com

【摘要】 目的 观察动态失稳训练对脑卒中患者姿势控制、平衡与步行功能的影响。**方法** 采用随机数字表法将 40 例脑卒中患者分为对照组和观察组,每组 20 例。所有患者均接受常规康复治疗,观察组在此基础上给予动态失稳训练,对照组增加相同时长的常规康复治疗。治疗前、治疗 8 周后(治疗后),采用表面肌电图(sEMG)检测 2 组患者双侧股直肌、股二头肌、竖脊肌的表面肌电信号,包括预期姿势调节(APAs)阶段的激活时间和激活强度,补偿姿势调节(CPAs)阶段的激活强度。采用 Berg 平衡量表(BBS)、Fugl-Meyer 运动功能量表(FMA)下肢部分、GaitWatch 步态分析系统评估患者的平衡与步行能力。**结果** 与对照组治疗后比较,观察组患侧股直肌[(-71.68±2.64)s]、股二头肌[(-90.07±3.65)s]和健侧股二头肌[(-84.31±5.74)s]、竖脊肌[(-67.29±5.04)s]APAs 阶段的激活时间提前较多($P<0.05$),患侧股直肌[(9.90±0.77)]、竖脊肌[(10.18±0.72)]APAs 阶段的激活强度较高($P<0.05$)。2 组患者治疗后 CPAs 阶段各肌群的激活强度组间比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。观察组治疗后 BBS 评分[(48.80±3.52)分]、下肢 FMA 评分[(29.20±2.42)分]、步幅[(71.25±4.81)cm]、步速[(70.20±5.00)cm/s]改善优于对照组($P<0.05$)。**结论** 动态失稳训练联合常规康复治疗能进一步改善脑卒中患者的姿势控制能力,促进平衡与步行功能恢复,提高下肢运动功能。

【关键词】 脑卒中; 姿势控制; 平衡功能; 表面肌电图

基金项目: 浙江省公益技术研究计划项目(LGF21H170004); 嘉兴市公益性研究计划项目(2022AY30007); 嘉兴市科技计划项目(2021AD30122)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.03.004

The effects of dynamic instability training on the postural control, balance and walking of stroke survivors

Ma Lianjie^{1,2}, Gu Xudong^{1,2}, Li Yan², Fu Jianming², Yao Yunhai², Tao Linhua², Li Liang², Sun Ya², Wu Hua²

¹Zhejiang University of Traditional Chinese Medicine, Hangzhou 310053, China; ²The Second Affiliated Hospital of Jiaxing University, the Second Affiliated to Jiaxing University Hospital Rehabilitation Medicine Center, Jiaxing 314000, China

Corresponding author: Gu Xudong, Email: jxgxd@hotmail.com

【Abstract】 Objective To observe any effect of dynamic motor instability training on the balance and postural control of stroke survivors. **Methods** Forty stroke survivors with poor balance were randomly divided into a control group and an observation group, each of 20. In addition to routine rehabilitation, the observation group was given 20 minutes of dynamic motor instability training, 5 days a week for 8 weeks, while the control group underwent routine rehabilitation for the same length of time. Before and after the intervention, surface electromyogram of the rectus femoris, biceps femoris, and erector spinae were recorded during perturbation. Activation time and the intensity of the anticipatory and complementary postural adjustments (APAs and CPAs) were also observed. Balance and lower limb motor functioning were assessed using the Berg balance scale (BBS), the Fugl-Meyer lower extremity assessment (FMA-LE), and GaitWatch analysis. **Results** After the treatment the average activation time of the rectus femoris, biceps femoris in the affected side and those of the biceps femoris [(-84.31±5.74)s] and erector spinae in the intact side in APAs were all significantly shorter in the observation group than in the control group, while the average activation intensity of the rectus femoris and erector spinae was significantly greater. There was no significant difference in the activation intensity of each muscle group in CPAs after the treatment. After the intervention the average BBS score, FMA-LE score, stride length and walking speed of the observation group all were significantly better than the control group's averages. **Conclusions** Supplementing traditional rehabilitation training with dynamic motor insta-

bility training can further improve the posture control of stroke survivors and promote recovery of their balance and walking ability.

[Key words] Stroke; Postural control; Balance; Surface electromyography; Walking ability
Funding: A Zhejiang Province Public Welfare Technology Research Project (LGF21H170004); a Jiaxing Public Welfare Research Project (2022AY30007); A Jiaxing Municipal Science and Technology Project(2021AD30122)
DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.03.004

偏瘫是脑卒中常见的后遗症之一,约有 30%~50%的脑卒中患者发病后 3 个月内不能独立步行^[1]。有研究显示,脑卒中后第 1 年跌倒发生率达 37%~73%,大多数跌倒发生在走路过程中,主要与脑卒中导致的平衡功能障碍有关^[2-3]。脑卒中患者的平衡功能受一种或多种因素影响,包括感觉障碍、肌力下降^[4]、对功能受限的适应性低、姿势反应延迟或缺失^[5-7]等。平衡功能受损或跌倒会对患者的心理和社会功能造成严重影响,并因此减少或拒绝社会活动和自主活动。针对脑卒中患者平衡功能和姿势控制的常规康复训练,主要包括躯干和下肢运动控制训练^[8]、感觉训练、镜像神经元训练等^[9]。患者出院后,在日常生活中受到扰动时,跌倒风险仍较高^[10]。扰动发生前提前调整姿势、受到扰动后及时进行姿势控制,对于脑卒中患者维持姿势稳定具有重要意义^[11]。

动态失稳训练以模拟受到外部扰动而发生滑倒的情景为基础,依据姿势控制理论、平衡维持理论,通过滑动平台,使参与者在安全、受控的环境中,反复暴露于不稳定扰动因素下,旨在改善患者的快速姿势控制反应能力^[12]。有研究报道,动态失稳训练可以改善老年人的平衡功能,降低跌倒风险^[12-13]。本研究采用动态失稳训练联合常规康复治疗存在平衡功能障碍的脑卒中患者,观察其对患者姿势控制能力、平衡与步行功能等的影响,取得了满意疗效。

对象与方法

一、研究对象
纳入标准:①符合《中国脑血管疾病分类 2015》中脑卒中的诊断标准^[14],并经头颅 CT 或 MRI 证实,首次发病;②生命体征稳定,血压控制良好,无其它限制活动的合并症;③病程 1~6 个月;④年龄 40~75 岁;⑤认知功能无明显异常,简易精神状态量表(mini-mental state examination, MMSE)评分^[15]≥23 分;⑥站立平衡 2 级,偏瘫侧下肢 Brunnstrom 分期≥Ⅲ期,可独立或者

手杖辅助下连续步行 12 m,步行速度≥35 cm/s;⑦患者或家属签署知情同意书。排除标准:①失语症、沟通障碍或精神病史等,无法配合评定和治疗;②严重的心肺功能不全、肝肾功能不全,恶性肿瘤,恶性进行性高血压;③既往有颅脑外伤,其它颅内疾病或者脑炎等;④下肢肌肉骨骼手术史。

选取 2021 年 5 月至 2022 年 8 月在嘉兴市第二医院康复医学中心就诊的脑卒中平衡功能障碍患者 40 例,按照随机数字表法将其分为对照组和观察组,每组 20 例。2 组患者的性别、平均年龄、平均病程、偏瘫侧别等一般资料比较,差异无统计学意义($P>0.05$),具有可比性,详见表 1。本研究经嘉兴市第二医院伦理学会审批通过(JXEY-2021SZ045)。

二、治疗方法

2 组患者均接受常规康复治疗,主要包括平衡棒、滚筒、巴氏球、姿势矫正镜、肌力训练、本体感觉训练、步态训练等,每日治疗 1 次,每次 30 min,每周治疗 5 d,连续治疗 8 周。观察组在上述治疗基础上增加动态失稳训练,每日治疗 1 次,每次 20 min,每周治疗 5 次,连续治疗 8 周。对照组则增加相同时长(20 min)的常规康复训练,每周治疗 5 次,连续治疗 8 周。

采用北京产 SE-4370 型失稳评估训练滑台系统^[16]进行动态失稳训练。滑动平板位于长 70 cm、宽 70 cm 的移动范围中心,通过电脑程序可设置滑动平板移动轨迹、移动速度和重复次数。训练开始前,由 1 名治疗师向患者演示滑动过程,并解释训练过程,缓解患者的焦虑情绪。训练正式开始时,指导患者保持身体直立、目光平视前方,立于滑动平板中心,穿戴连接于头顶上方固定滑竿的保护带。在滑动平板移动前 2 s,研究人员给出“准备”的口令信号,引导患者集中注意力,随后控制滑动平板,以前-左-后-右-前的运动方向、10 cm/s 的移动速度进行训练。详见图 1A、1B、1C、1D。

表 1 2 组患者一般资料

组别	例数	性别(例)		平均年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$)	平均病程 (月, $\bar{x}\pm s$)	偏瘫侧别(例)	
		男	女			左侧	右侧
对照组	20	13	7	56.10±7.99	2.38±1.09	12	8
观察组	20	16	4	57.40±7.70	2.16±1.18	11	9



图 1A 训练前准备示意图



图 1B 向前滑动示意图



图 1C 向右滑动示意图



图 1D 向左滑动示意图

三、评定方法

治疗前、治疗 8 周后(治疗后),采用表面肌电图(surface electromyography, sEMG)检测 2 组患者双侧股直肌、股二头肌、竖脊肌的表面肌电信号,包括预期姿势调节(anticipatory postural adjustments, APAs)阶段的激活时间和激活强度,补偿姿势调节(compensatory postural adjustments, CPAs)阶段的激活强度。采用 Berg 平衡量表(Berg balance scale, BBS)^[17]、Fugl-Meyer 运动功能量表(Fugl-Meyer assessment scale, FMA)下肢部分^[18]、GaitWatch 步态分析系统评估患者的平衡功能、下肢运动功能、步行功能。除 sEMG 特性分析外,其余评定项目均采用双盲法评定。

1. 姿势控制肌群评估:用酒精擦拭患者双侧股直肌、股二头肌、竖脊肌皮肤,降低表面阻抗,连接一次性表面电极。患者站立于滑动平板中心区域,穿戴保护带,1 名研究人员站立于患者身旁,防止其跌倒。准备完毕后,开始采集生物反馈信号,待信号稳定后,研究人员给出“准备”口令,2 s 后再给出“开始”口令,同时控制滑动平板在前-后方向、以 10 cm/s 的速度移动,重复测量 3 次。测试过程中,若患者发生跨步、用手抓握周围物体、跌倒等情况,立即暂停该次测试,并剔除该次测试数据,等待患者休息后,继续测试或终止测试。

2. 数据分析:采用加拿大产 BioNeuro 生物反馈仪,采集双侧股直肌、股二头肌、竖脊肌在测试过程中的表面肌电信号,以 2048 Hz 的采样频率记录信号。使用 Matlab R2021a 数据处理软件对肌电信号进行离线分析处理。由经验丰富的研究人员,将健侧竖脊肌肌电信号显著上升的第 1 个时间点,确定为滑动平板的扰动时间 T₀,负值表示发生于 T₀ 之前,正值表示发生于

T₀ 之后。在相对于 T₀ 的 -450 ms 至 +200 ms 的时间窗内,检测 APAs 阶段肌肉激活时间点,该时间点的确定方法为:计算 -500 ms 至 -450 ms 段肌电值的 mean + 2SD,将首个 >mean + 2SD 并至少持续 50 ms 的肌电值时间点作为 APAs 阶段的肌肉激活时间点,该时间点越提前,即负值越大,肌肉在扰动前激活越早^[19]。积分肌电值(integrated electromyography, iEMG)常用于衡量肌肉激活强度,本研究采用标准化 iEMG,将 APAs、CPAs 阶段的 iEMG 分别与基线相结合进行计算,排除个体差异的影响,具体计算公式为^[20-21]:标准化 iEMG = (a - b) / b。根据既往研究报道^[16, 19],本研究将 APAs 和 CPAs 阶段的时间窗分别定义为: -100 ms 至 +50 ms 和 +50 ms 至 +200 ms,即 APAs 阶段, a 为 -100 ms 至 +50 ms 的 iEMG, b 为 -500 ms 至 -350 ms 的 iEMG; CPAs 阶段, a 为 +50 ms 至 +200 ms 的 iEMG, b 为 -500 ms 至 -350 ms 的 iEMG。

3. 临床功能评定:采用 BBS 评价 2 组患者的平衡能力,总分 56 分,评分越高,提示患者的平衡能力越好^[17]。采用下肢 FMA 评估 2 组患者的下肢运动功能,下肢 FMA 总分 34 分,评分越高,提示患者的下肢运动功能越好^[18];采用 GaitWatch 步态分析系统评定患者步行的步幅、步速。

四、统计学方法

采用 SPSS 25.0 版统计学软件进行数据分析,所有计量资料采用 ($\bar{x} \pm s$) 形式表示。患者治疗前、后服从正态分布的数据,采用配对 *t* 检验,不符合正态分布的数据,采用配对资料符号秩和检验。2 组患者组间比较满足正态分布和方差齐性时,采用独立样本 *t* 检验,不满足条件时采用独立样本秩和检验。*P* < 0.05 表示差异具有统计学意义。

结 果

一、2 组患者治疗前、后姿势控制肌群 APAs 阶段的激活时间比较

治疗前,2 组患者双侧股直肌、股二头肌、竖脊肌 APAs 阶段的激活时间比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。与组内治疗前比较,2 组患者治疗后双侧股直肌、股二头肌、竖脊肌 APAs 阶段的激活时间明显提前($P<0.05$)。与对照组治疗后比较,观察组患侧股直肌、股二头肌和健侧股二头肌、竖脊肌 APAs 阶段的激活时间提前幅度较大,差异有统计学意义($P<0.05$)。详见表 2。

二、2 组患者治疗前、后姿势控制肌群 APAs 阶段的激活强度比较

治疗前,2 组患者双侧股直肌、股二头肌、竖脊肌 APAs 阶段的激活强度比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。与组内治疗前比较,2 组患者治疗后患侧股直肌、竖脊肌和健侧股直肌、股二头肌 APAs 阶段的激活强度均有所提高,差异有统计学意义($P<0.05$)。与对

照组治疗后比较,观察组患侧股直肌、竖脊肌 APAs 阶段的激活强度明显提高,差异有统计学意义($P<0.05$)。详见表 3。

三、2 组患者治疗前、后姿势控制肌群 CPAs 阶段的激活强度比较

治疗前,2 组患者双侧股直肌、股二头肌、竖脊肌 CPAs 阶段的激活强度比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。与组内治疗前比较,对照组治疗后患侧股直肌、竖脊肌和健侧股直肌、股二头肌、竖脊肌 CPAs 阶段的激活强度有所下降($P<0.05$),观察组双侧股直肌、股二头肌、竖脊肌 CPAs 阶段的激活强度明显下降($P<0.05$)。2 组患者治疗后 CPAs 阶段的激活强度组间比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。详见表 4。

四、2 组患者治疗前、后临床功能评定指标比较

治疗前,2 组患者 BBS 评分、下肢 FMA 评分、步幅、步速比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。与组内治疗前比较,2 组患者治疗后上述指标均明显改善,且观察组改善优于对照组($P<0.05$)。详见表 5。

表 2 2 组患者治疗前、后姿势控制肌群 APAs 阶段的激活时间比较 (ms, $\bar{x}\pm s$)

组别	例数	患侧			健侧		
		股直肌	股二头肌	竖脊肌	股直肌	股二头肌	竖脊肌
对照组							
治疗前	20	-19.88±5.69	-39.55±6.55	-30.51±6.02	-35.38±8.53	-42.53±5.02	-51.34±6.66
治疗后	20	-58.80±3.15 ^a	-67.33±6.66 ^a	-71.94±4.45 ^a	-72.27±4.52 ^a	-72.44±3.92 ^a	-83.67±4.21 ^a
观察组							
治疗前	20	-14.59±5.82	-29.98±6.86	-30.15±6.50	-48.00±5.98	-47.30±8.12	-30.91±8.52
治疗后	20	-71.68±2.64 ^{ab}	-90.07±3.65 ^{ab}	-74.74±4.30 ^a	-75.89±4.25 ^a	-84.31±5.74 ^{ab}	-67.29±5.04 ^{ab}

注:与组内治疗前比较,^a $P<0.05$;与对照组治疗后比较,^b $P<0.05$

表 3 2 组患者治疗前、后姿势控制肌群 APAs 阶段的激活强度比较 ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	患侧			健侧		
		股直肌	股二头肌	竖脊肌	股直肌	股二头肌	竖脊肌
对照组							
治疗前	20	3.84±0.33	5.91±0.67	4.24±0.44	4.32±0.33	4.57±0.57	4.28±0.51
治疗后	20	7.43±0.69 ^a	9.58±0.81	7.97±0.51 ^a	8.81±0.69 ^a	8.73±0.80 ^a	9.43±0.80
观察组							
治疗前	20	3.47±0.36	5.16±0.80	3.65±0.30	4.54±0.72	3.66±0.59	3.94±0.44
治疗后	20	9.90±0.77 ^{ab}	8.53±1.08	10.18±0.72 ^{ab}	9.19±0.95 ^a	7.90±0.83 ^a	7.54±0.68

注:与组内治疗前比较,^a $P<0.05$;与对照组治疗后比较,^b $P<0.05$

表 4 2 组患者治疗前、后姿势控制肌群 CPAs 阶段的激活强度比较 ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	患侧			健侧		
		股直肌	股二头肌	竖脊肌	股直肌	股二头肌	竖脊肌
对照组							
治疗前	20	21.36±0.88	18.27±0.91	22.06±1.38	19.65±0.64	19.43±1.37	19.35±1.29
治疗后	20	18.31±0.64 ^a	15.94±0.87	16.43±0.83 ^a	14.10±0.74 ^a	13.22±1.03 ^a	13.87±1.04 ^a
观察组							
治疗前	20	22.04±1.10	19.79±1.13	20.44±1.24	20.62±1.03	18.89±1.14	18.49±1.03
治疗后	20	15.48±0.96 ^a	13.14±1.21 ^a	13.68±0.90 ^a	14.55±1.11 ^a	13.24±0.97 ^a	12.51±0.88 ^a

注:与组内治疗前比较,^a $P<0.05$

表 5 2 组患者治疗前、后临床功能评定指标比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	BBS 评分(分)	下肢 FMA 评分(分)	步幅(cm)	步速(cm/s)
对照组					
治疗前	20	39.10±4.36	22.45±3.30	56.95±5.04	52.55±6.42
治疗后	20	46.15±3.44 ^a	26.70±2.49 ^a	66.00±6.06 ^a	61.00±5.68 ^a
观察组					
治疗前	20	41.00±5.80	22.75±2.94	58.40±5.40	56.05±6.92
治疗后	20	48.80±3.52 ^{ab}	29.20±2.42 ^{ab}	71.25±4.81 ^{ab}	70.20±5.00 ^{ab}

注:与组内治疗前比较,^a $P<0.05$;与对照组治疗后比较,^b $P<0.05$

讨 论

本研究结果显示,经过 8 周训练后,观察组双侧股直肌、股二头肌、竖脊肌的 APAs 激活时间提前,APAs 阶段和 CPAs 阶段的激活强度、BBS、下肢 FMA、步幅、步速均较组内治疗前不同程度改善,表明动态失稳训练联合常规康复治疗可显著提高脑卒中偏瘫患者的姿势控制能力、平衡与步行功能,对患者的下肢运动功能亦有明显的改善作用,且疗效优于单一常规康复治疗。

人体平衡功能正常时,可以使身体重心在空间上处于稳定或处在稳定极限范围内^[22]。根据扰动形式的不同,可以将扰动训练模式分为:①通过控制骨盆固定带进行扰动训练,该方法虽然能够有效降低脑卒中患者的跌倒风险,提高步行稳定性,但针对骨盆所产生的扰动难以对步行功能产生直接影响^[23];②利用不稳定平面提供持续扰动,此法对动态平衡功能的影响有限,主要用于改善静态平衡功能^[24]。因此,本研究选择了由支撑面产生扰动的动态失稳训练。有相关生物力学研究表明,针对平衡功能和姿势反应的特定任务训练,可以提高姿势扰动的反应性,降低模拟环境中的绊倒和滑倒风险,且这种效果长期存在^[25-26]。Bhatt 等^[27]研究报道,青年人经过单次滑倒训练后,控制身体重心的能力有所改善,主动步态适应性增强,滑倒风险下降。在一项有关老年人跌倒风险的研究中,Lurie 等^[12]将 506 例跌倒高风险的老年人随机分为表面扰动失稳训练组和常规康复治疗组,进行 4~6 周训练和 1 年随访,结果显示表面扰动失稳训练可显著降低老年人 3 个月内的跌倒发生率。Esmaeili 等^[3]将 21 例脑卒中患者随机分为实验组和对照组,分别给予动态失稳训练和步行训练,3 周后,实验组患者对平衡能力恢复的信心显著提高。有研究报道,动态失稳训练能够改善帕金森病患者的步行能力,如步长、步速、步行耐力^[28]。本研究中,观察组患者治疗后步幅、步速显著改善,与 Coelho 等^[28]的研究结果类似。

既往研究多局限于动态失稳训练对患者行为学的影响,而未就机制进行深入探讨。本研究从动态失稳训练对相关姿势稳定肌群激活的影响方面着手,探讨

脑卒中患者姿势控制能力和平衡功能改善的相关机制。APAs 属于前馈调节,即在扰动作用于身体前,提前激活躯干和下肢肌肉的过程,脑干网状结构是产生 APAs 的重要结构,脑卒中常损伤皮质脊髓束和皮质网状纤维,因此脑卒中后 APAs 激活受损较为常见;而 CAPs 属于反馈调节,是当扰动作用于身体后,中枢神经系统根据感觉反馈调整姿势,维持姿势稳定的过程^[29]。与正常成年人比较,APAs 受损主要表现为肌肉激活延迟、激活强度下降、肌群募集次序异常,在受到相同程度的扰动时,发生跌倒的风险较高^[30]。本研究结果显示,脑卒中患者治疗后患侧股直肌、股二头肌和竖脊肌的 APAs 显著改善,表现为激活时间提前和激活强度增高,提示动态失稳训练可有效改善脑卒中患者受损的前馈姿势控制能力,提前激活的姿势控制肌群能够降低扰动对患者姿势控制的影响,从而提高脑卒中患者受到扰动时的姿势稳定性;观察组患者治疗后两侧股直肌、股二头肌、竖脊肌在 CPAs 阶段的激活强度较对照组有下降趋势,但差异无统计学意义,表明治疗后前馈姿势控制能力提高能够降低扰动对姿势稳定性的影响。分析认为,产生上述效应的原因是:动态失稳训练在多个方向予以患者不同强度的扰动,可以增强患者的适应性,提高失稳状态下的反应性,抑制躯干和下肢的联合反应,使姿势稳定肌群的激活顺序趋于正常化。

综上所述,动态失稳训练是一种无创、有效的训练方法,可以改善脑卒中患者的姿势控制能力、平衡与步行功能,提高下肢运动功能,增强日常生活中的抗干扰能力,值得临床应用。本研究此次仅分析了前-方向扰动时肌肉的激活情况,后期将会考虑根据不同的平衡功能状态、不同的扰动方向和速度、睁眼或闭眼等因素设计研究方案,并在治疗后增加随访。

参 考 文 献

[1] 张莹莹,蒋丹青,李莎莎,等. 自身运动感知中视觉-前庭整合的研究进展[J]. 生理学报,2017,69(5):693-702. DOI:10.13294/j.aps.2017.0068.

[2] Weerdesteijn VG, Niet M, Van Duynhoven HJ, et al. Falls in individuals with stroke[J]. J Rehabil Res Dev,2008,45(8):1195. DOI:

- 10.1682/JRRD.2007.09.0145.
- [3] Esmaceli V, Juneau A, Dyer JO, et al. Intense and unpredictable perturbations during gait training improve dynamic balance abilities in chronic hemiparetic individuals: a randomized controlled pilot trial [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17(1): 79. DOI: 10.1186/s12984-020-00707-0.
- [4] Brown KE, Neva JL, Feldman SJ, et al. Sensorimotor integration in chronic stroke: baseline differences and response to sensory training [J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2018, 36(2): 245-259. DOI: 10.3233/RNN-170790.
- [5] Yang C, Creath RA, Magder L, et al. Impaired posture, movement preparation, and execution during both paretic and nonparetic reaching following stroke [J]. *J Neurophysiol*, 2019, 121(4): 1465-1477. DOI: 10.1152/jn.00694.2018.
- [6] Sawacha Z, Carraro E, Contessa P, et al. Relationship between clinical and instrumental balance assessments in chronic post-stroke hemiparesis subjects [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2013, 10: 95. DOI: 10.1186/1743-0003-10-95.
- [7] Mansfield A, Aqui A, Centen A, et al. Perturbation training to promote safe independent mobility post-stroke: study protocol for a randomized controlled trial [J]. *BMC Neurol*, 2015, 15(1). DOI: 10.1186/s12883-015-0347-8.
- [8] 孙良文, 刘森, 卢敏, 等. 交替垂直振动训练对脑卒中偏瘫患者平衡功能及移动能力的影响 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, 41(7): 520-522. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.07.010.
- [9] 王爱君, 金瑛, 林玲, 等. 头针联合镜像疗法对脑卒中偏瘫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(2): 135-137. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.02.008.
- [10] 王鑫, 孟兆祥, 钱贞, 等. 丰富平衡训练对脑卒中偏瘫患者平衡功能的影响 [J]. *中国康复*, 2016, 31(6): 438-441. DOI: 10.3870/zgkf.2016.06.010.
- [11] Wu M, Ni CM, Cui J, et al. Trunk exercise using the Swiss ball improves the functional balance and walking of stroke patients in the early stages of recovery [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2018, 61: 206-207. DOI: 10.1016/j.rehab.2018.05.477.
- [12] Lurie JD, Zagaria AB, Ellis L, et al. Surface perturbation training to prevent falls in older adults: a highly pragmatic, randomized controlled trial [J]. *Phys Ther*, 2020, 100(7): 1153-1162. DOI: 10.1093/ptj/pzaa023.
- [13] Liang H, Kaewmanee T, Aruin AS. Older adults can rely on an auditory cue to generate anticipatory postural adjustments prior to an external perturbation [J]. *Exp Brain Res*, 2022, 240(4): 1279-1292. DOI: 10.1007/s00221-022-06336-4.
- [14] 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. 中国脑血管疾病分类 2015 [J]. *中华神经科杂志*, 2017, 50(3): 168-171. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-7876.2017.03.003.
- [15] 陈伟, 巩尊科, 韩良, 等. 洛文斯顿作业疗法认知评定量表和简易精神状态检查评定脑卒中患者认知功能的比较分析 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2012, 34(1): 26-30. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2012.01.008.
- [16] 陈昕, 王盛, 黄森, 等. 外界干扰对健康人姿势调整时肢体活动影响的表面肌电研究 [J]. *中国康复医学杂志*, 2018, 33(3): 304-309. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2018.03.010
- [17] 何怀, 戴桂英, 刘传道. 静态平衡仪及平衡功能量表在偏瘫患者平衡功能评定中的应用及相关性分析 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2011, 33(2): 134-136. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2011.02.018
- [18] 施爱梅, 郑琦, 顾旭东, 等. 骨盆辅助式康复机器人训练对急性期脑梗死患者躯干控制及步行功能的影响 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2022, 44(8): 695-699. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.08.005.
- [19] Santos MJ, Kanekar N, Aruin AS. The role of anticipatory postural adjustments in compensatory control of posture: 1. Electromyographic analysis [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2010, 20(3): 388-397. DOI: 10.1016/j.jelekin.2009.06.006.
- [20] 韦益毅, 谢琳, 张芷, 等. 10000 米耐力跑对腰椎稳定肌预期与补偿姿势调节的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2018, 37(2): 121-126. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6710.2018.02.005.
- [21] Strang AJ, Berg WP. Fatigue-induced adaptive changes of anticipatory postural adjustments [J]. *Exp Brain Res*, 2007, 178: 49-61. DOI: 10.1007/s00221-006-0710-5.
- [22] 吉潮鹏. 躯干和骨盆稳定性对脑卒中患者姿势控制的影响 [D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [23] Punt M, Bruijn SM, van de Port IG, et al. Does a perturbation-based gait intervention enhance gait stability in fall-prone stroke survivors? A pilot study [J]. *J Appl Biomech*, 2019, 35(3): 173-181. DOI: 10.1123/jab.2017-0282.
- [24] Lee PY, Huang JC, Tseng HY, et al. Effects of trunk exercise on unstable surfaces in persons with stroke: a randomized controlled trial [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(23): 9135. DOI: 10.3390/ijerph17239135.
- [25] Mansfield A, Wong JS, Bryce J, et al. Does perturbation-based balance training prevent falls? Systematic review and meta-analysis of preliminary randomized controlled trials [J]. *Phys Ther*, 2015, 95(5): 700-709. DOI: 10.2522/ptj.20140090.
- [26] Bieryla KA, Madigan ML, Nussbaum MA. Practicing recovery from a simulated trip improves recovery kinematics after an actual trip [J]. *Gait Posture*, 2007, 26(2): 208-213. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2006.09.010.
- [27] Bhatt T, Wang TY, Yang F, et al. Adaptation and generalization to opposing perturbations in walking [J]. *Neuroscience*, 2013, 246: 435-450. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2013.04.013.
- [28] Coelho DB, de Oliveira CEN, Guimarães MVC, et al. A systematic review on the effectiveness of perturbation-based balance training in postural control and gait in Parkinson's disease [J]. *Physiotherapy*, 2022, 116: 58-71. DOI: 10.1016/j.physio.2022.02.005.
- [29] 江汉宏, 叶赛青, 高强. 脑卒中后姿势控制机制与训练的研究进展 [J]. *中国康复医学杂志*, 2021, 36(8): 1020-1025. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2021.08.024.
- [30] Kaewmanee T, Liang H, Aruin AS. Effect of predictability of the magnitude of a perturbation on anticipatory and compensatory postural adjustments [J]. *Exp Brain Res*, 2020, 238(10): 2207-2219. DOI: 10.1007/s00221-020-05883-y.

(修回日期: 2023-01-05)

(本文编辑: 凌 琛)