

# 脑卒中偏瘫患者水中平板步行步态及表面肌电实时监测的观察

吴琼<sup>1,2</sup>, 张通<sup>2,3a</sup>, 丛芳<sup>2,3b</sup>, 潘钰<sup>1</sup>, 吴瑞斌<sup>4</sup>

**【摘要】** 目的:探索脑卒中偏瘫患者水中平板步行过程中步态参数及表面肌电图特征。方法:分别在水中平板步行训练(UWTT)及陆地步行(LW)过程中,采用无线三维步态分析系统及表面肌电图系统同步采集脑卒中偏瘫患者步行时空参数及表面肌电信号。结果:在自感轻松地用力状态下,脑卒中患者 UWTT 过程中步频、步速、健侧步长、患侧步长、双侧步长差及患侧下肢摆动相百分比(SP%)均显著降低于 LW(均  $P < 0.05$ ),步行周期显著高于 LW( $P < 0.05$ );健侧摆动相百分比及双侧摆动相百分比之差未见显著差异。在表面肌电信号特征方面,UWTT 过程中健侧下肢股二头肌(BF)、股直肌(RF)、胫骨前肌(TA)的积分肌电值(iEMG)均显著低于 LW(均  $P < 0.05$ ),腓肠肌外侧头(LGA)iEMG 值未见差异;患侧下肢 BF、RF、TA 的 iEMG 值均显著低于 LW(均  $P < 0.05$ ),LGA 未见差异;UWTT 过程中双侧下肢 iEMG 差值在 BF、RF、TA、LGA 均显著低于 LW(均  $P < 0.05$ )。结论:脑卒中患者 UWTT 步行时空参数与 LW 差异显著,UWTT 显著影响脑卒中患者下肢步行关键肌激活程度,有助于改善步行对称性。

**【关键词】** 水中平板步行训练;三维步态分析;表面肌电图;脑卒中

**【中图分类号】** R49;R743.3    **【DOI】** 10.3870/zgkf.2021.12.002

**Gait and Surface Electromyogram Characteristics of stroke patients on Underwater Treadmill Training** Wu Qiong, Zhang Tong, Cong Fang, et al. Department of Rehabilitation Medicine, Beijing Tsinghua Changgung Hospital, School of Clinical Medicine, Tsinghua University, Beijing 102218, China

**【Abstract】** **Objective:** To explore the characteristics of gait and surface electromyography (sEMG) of stroke patients walking on underwater treadmill training (UWTT). **Methods:** Gait and sEMG parameters of 20 stroke patients were synchronously collected through three-dimensional gait analysis system and sEMG systems on land walking (LW) and UWTT. **Results:** When walking in easy self-exertion state, compared with LW, there were significant gait parameter reductions when patients walked on UWTT, including step frequency walking speed, step length of both affected lower extremity and affected step length, percentage of swing phase (SP%) of unaffected lower extremity and the absolute difference between lower extremities (ADLE) of step length (all  $P < 0.05$ ). On the other hand, there was significant increase in gait cycle, no significant variance was found between unaffected SP% and of SP% ADLE. Meanwhile, integral electromyography (iEMG) of unaffected biceps femoris (BF), rectus femoris (RF) and tibialis anterior (TA) was significantly reduced in UWTT as compared with LW (all  $P < 0.05$ ). The significant iEMG reduction was also shown on affected BF, RF, and TA (all  $P < 0.05$ ). No significant difference was shown on neither unaffected lateral gastrocnemius (LGA) nor affected LGA . The iEMG difference between the bilateral lower extremities on BF, RF, TA and LGA was significantly decreased in UWTT as compared with LW (all  $P < 0.05$ ). **Conclusion:** There are noteworthy differences in gait and muscle contraction intensity for stroke patients between UWTT and LW. UWTT significantly reduces the load on both lower extremities and contributes to improving walking symmetry for stroke patients.

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助  
(2015CZ-39)

收稿日期:2021-04-13

作者单位:1. 清华大学临床医学院,清华大学附属北京清华长庚医院康复医学科,北京 102218;2. 首都医科大学康复医学院,中国康复科学所,神经损伤与康复北京市重点实验室,北京脑重大疾病研究院神经损伤与修复研究所,北京 100068;3. 中国康复研究中心北京博爱医院 a. 神经康复科, b. 理疗科, 北京 100068;4. 中国航天科技集团第一研究院, 北京 100076

作者简介:吴琼(1982-),女,主治医师,主要从事康复医学与理疗学方面的研究。

通讯作者:张通,ZT61611@sohu.com

**【Key words】** underwater treadmill training; three-dimensional gait analysis; surface electromyography; stroke

我国是全球卒中危险因子暴露水平较高国家之一,大约 3/4 脑卒中患者遗留有不同程度的偏侧运动功能障碍,其中步行和下肢功能障碍比例高达 80%<sup>[1]</sup>,步行能力的恢复是偏瘫康复的重点和难点。

类似生理负重状态下垂直完成重复性模拟步态训练,如减重步行训练,有利于提高中枢神经通路的传递效率,扩大下肢运动区在大脑皮层的支配范围,促进神经功能重塑和运动再学习<sup>[2]</sup>。水中平板步行训练(underwater treadmill training, UWTT)是一种特殊形式的步行训练形式,是利用水及活动平板的特性,促进下肢功能恢复的训练方法<sup>[3]</sup>。大量研究证实UWTT可改善脑卒中偏瘫患者平衡功能、步行功能、心肺功能、下肢肌力以及日常生活活动能力<sup>[4~7]</sup>。然而由于水中环境的特殊性、复杂性,脑卒中偏瘫患者UWTT训练过程中下肢步态特征、肌电活动等运动参数尚不明确。本研究将利用UWTT系统、便携式三维运动步态和无线表面肌电系统检测脑卒中偏瘫患者完成UWTT或陆地步行过程中步态参数及肌电信号,获取UWTT运动模式对脑卒中偏瘫患者步行运动特征的影响。

## 1 资料与方法

**1.1 一般资料** 本研究于2015年1月~11月在中国康复研究中心北京博爱医院理疗科水疗室完成。招募25名脑卒中住院患者作为受试者。纳入标准:首次卒中,偏侧肢体功能障碍,经头颅CT或MRI证实;病情稳定,病程1~6个月;具有一定平衡功能,Berg平衡量表(Berg balance scale, BBS)评分>40分,且约翰霍普金斯跌倒风险评估量表(Johns Hopkins fall risk assessment scale, JHFRAS)评分<13分;具有一定步行能力,患侧下肢Brunnstrom分期≥4期,功能性步行量表(functional ambulation category scale, FAC)≥3级,可平地独立步行10m以上;能理解并完成动作性指令;体质量指数(body mass index, BMI):18.5~23.9 kg/m<sup>2</sup>。排除标准:合并其他神经系统及下肢骨关节疾病;患侧下肢各关节被动活动度受限或跟腱挛缩,患侧下肢踝关节伸肌改良Ashworth分级(modified Ashworth scale, MAS)>I<sup>+</sup>级;合并癫痫、重要器官衰竭或传染病;恐水及严重认知、言语、精神、心理障碍,不能配合;受试前2h进行过剧烈运动。本研究经北京博爱医院药物临床试验机构伦理委员会批准[伦理号:(2015)K(025)],并在http://www.chictr.org.cn注册(ChiCTR2000040112)。所有患者均在试验前签署知情同意书,排除不完整及信号质量较差的数据,最终纳入20名受试者的数据,受试者一般资料见表1。

**1.2 方法** ①运动数据采集设备:采用HLKF-Reha Gait无线惯性步态分析系统及HLKF-sEMG表面肌电信号采集系统评估脑卒中受试者运动数据。将高性

表1 受试者基本信息

编号	项目	统计值
1	年龄(岁,M(P <sub>25</sub> ,P <sub>75</sub> ))	56.50(43.00,63.00)
2	卒中类型(脑梗死/脑出血,%)	13/7(65%/35%)
3	BMI(kg/m <sup>2</sup> , $\bar{x} \pm s$ )	21.20±1.66
4	病程[月,M(P <sub>25</sub> ,P <sub>75</sub> )]	2.50(2.00,4.00)
5	性别(男/女,%)	9/11(45%/55%)
6	偏瘫侧(左/右,%)	16/4(80%/20%)
7	FAC[级,M(P <sub>25</sub> ,P <sub>75</sub> )]	4.00(3.00,4.00)
8	患侧下肢 Brunnstrom 分期[期,M(P <sub>25</sub> ,P <sub>75</sub> )]	4.00(4.00,5.00)
9	BBS(分, $\bar{x} \pm s$ )	49.65±3.38
10	JHFRAS(分, $\bar{x} \pm s$ )	6.00±2.73
11	患侧踝关节伸肌 MAS[分,M(P <sub>25</sub> ,P <sub>75</sub> )]	1.00(0.25,1.00)

注:为统计方便,患侧踝关节伸肌MAS评分分值记录方法如下:0级,记0分;I级,记1分;I<sup>+</sup>级,记2分;II级,记3分;III级,记4分<sup>[4~8]</sup>。

能嵌入式微处理数据采集传感器(内含加速度计、陀螺仪等惯性测量模块)分别固定在受试者双下肢股骨前侧中点、胫骨近端内侧、足背以及髌骨处,采集步态参数<sup>[9]</sup>。对受试者双侧下肢关键肌肌腹进行皮肤处理(包括刮除汗毛,局部使用砂纸及酒精擦拭等),具体包括股直肌(rectus femoris, RF)、胫前肌(anterior tibia-1, TA)、腓肠肌外侧(lateral gastrocnemius, LGA)、股二头肌(biceps femoris, BF)。将表面肌电传感器沿肌纤维走向,贴于肌腹最高点,将采集频率设置为1000 Hz,记录运动过程中肌电信号变化<sup>[10~11]</sup>。步态分析系统及表面肌电系统信号采集范围均为50 m,系统间通过GaitWatch步态同步软件(广州章和)连接进行数据同步采集。②UWTT设备:采用HM-200T型Aquamill水中步行运动系统(日本酒井医疗株式会社)进行测试。该系统具有不锈钢浴槽,可自动循环换水,调节水温。通过浴槽侧方的超大双层夹胶钢化玻璃可清楚直观地观察受试者步态、平衡情况。根据受试者身高调整放水量,水深调节范围为0~120cm。电脑控制电动平板步行速度及方向,具有前、后方喷流功能,平板运行速度范围为6~133m/min。浴槽设有安全扶手及紧急停止按钮,扶手高度距平板1m。

**1.3 评价标准** ①临床评价及数据采集:采用改良版Borg自觉用力程度量表测量受试者运动中的主观疲劳程度(rating of perceived exertion, RPE)。该量表将抗阻运动中的主观感受分为10个等级,其中0表示非常轻松,2表示轻松,4表示较为轻松,6表示较为吃力,8表示很吃力,10表示相当吃力且几乎不能完成。在实验开始前,向受试者解释各等级的标准含义<sup>[12]</sup>。陆地步行(land walk, LW)数据采集:受试者暴露双下肢,室温25℃左右,进行适应性活动(包括站立、步行)3~5 min后正式开始步行测试。嘱患者以自感轻松地用力程度(RPE:2级)沿直线行走,记录此时受试

者步行速度,并要求其保持步行 3~5 min,选取较为稳定的连续 1 min 步态片段进行分析<sup>[13]</sup>。测试过程中治疗师在受试者身旁 1m 范围内进行保护,并记录其可能发生的气促、胸痛等不适;如受试者出现不适或体力难支可及时给予保护并暂停或终止测试。UWTT 步行数据采集:传感器及数据传送器表面使用医用防水敷料(美国 3M)进行初步防水覆盖。受试者穿好定制全身连体防水服完成二次防水,进入 HM-200T 型 Aquamill 水中步行运动系统,水位调整至剑突水平,水温 30~33℃。受试者进入水槽后首先适应性活动(包括站立、步行)3~5 min。随后电动活动平板以 0.1 m / s 的速度逐渐增加,直到受试者可以自感轻松地用力程度(RPE: 2 级)进行步行。记录此时的平板运行速度,并要求受试者以此速度步行 3~5 min,选取较为稳定的连续 1 min 步态片段进行分析。测试过程中治疗师通过侧窗观察受试者步行安全性,并记录其可能发生的气促、胸痛等不适;如受试者出现不适或体力难支可随时通过 UWTT 水槽内的扶手保持安全,并通过紧急停止按键暂停或终止测试。同一受试者在完成陆地测试后进行 UWTT 测试,两次测试之间至少间隔 30 min。数据处理:从步态及肌电分析测试系统导出原始数据,导入 Matlab 7.0 软件完成信号归一化、降噪、平滑、滤波、抽样、采集、叠加、绘图等步骤,获得脑卒中患者步态周期时空参数以及测试肌肉的主要运动信号特征,并进行统计处理。②主要观察指标:观察两种环境下脑卒中受试者步态周期时空参数、表面肌电参数以及健侧—患侧下肢之间的差异(以下简称为差值)。时空参数包括步行周期、步长、步速、步频、双侧下肢摆动相百分比(percentage of swing phase, SP%)以及差值。表面肌电参数包括受试者健侧及患侧 RF、TA、LGA、BF 表面肌电参数,具体为每块肌肉在平均单个步行周期内的积分肌电值(integral electromyography, iEMG)以其差值<sup>[14~15]</sup>。

**1.4 统计学分析** 用 SPSS 22.0 统计软件进行数据分析,计量资料以  $\bar{x} \pm s$  或  $M(P_{25}, P_{75})$  表示, Shapiro-Wilk 检验检查连续变量的正态性,符合正态分布的计量资料使用配对 *t* 检验,不符合正态分布的计量资料使用配对样本 Wilcoxon 分析,  $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 2 结果

**2.1 步态参数** 在自感轻松地用力状态下,脑卒中患者 UWTT 过程中步频、步速、健侧步长、患侧步长、双侧步长差异均显著降低于 LW(均  $P < 0.05$ ),步行周期显著高于 LW( $P < 0.05$ );各步态时相在步行周期的百分

比方面,患侧下肢 SP% 显著降低于 LW( $P < 0.05$ );健侧 SP% 及 SP% 差值未见显著性差异。见表 2。

表 2 不同步行环境下脑卒中患者步态参数

		$\bar{x} \pm s, M(P_{25}, P_{75})$
项目	步行周期(sec)	双侧步长差(cm)
LW	1.18(1.00,1.42)	9.50(4.27,13.32)
UWTT	2.33(1.98,2.38)	2.00(1.00,2.88)
<i>t/Z</i>	-3.920	3.248
<i>P</i>	0.000	0.001
项目	步频(step/min)	健侧步长(cm)
LW	0.85±0.23	34.69±8.79
UWTT	0.45±0.07	17.89±2.86
<i>t/Z</i>	7.749	7.197
<i>P</i>	0.000	0.000
项目	患侧 SP%	健侧 SP%
LW	49.49±8.96	40.00±9.49
UWTT	47.15±9.93	35.45±9.88
<i>t/Z</i>	2.318	1.285
<i>P</i>	0.032	0.214
		SP%差值
LW	49.49±8.96	40.00±9.49
UWTT	47.15±9.93	35.45±9.88
<i>t/Z</i>	2.318	1.285
<i>P</i>	0.032	0.641

**2.2 sEMG 特征** 在自感轻松地用力状态下,脑卒中患者 UWTT 过程中,无论健侧、患侧还是健患侧差值 BF、RF、TA 的 iEMG 值均显著低于 LW(均  $P < 0.05$ );在 UWTT 状态下,无论健侧或患侧 LGA, iEMG 值较 LW 均未见显著差异,但 LGA 的健侧患侧 iEMG 差异显著低于 LW( $P < 0.05$ )。见表 3。

表 3 不同步行环境下脑卒中患者 iEMG 值

		$M(P_{25}, P_{75})$
项目	健侧 BF	患侧 BF
LW	7.41(6.49,8.46)	4.56(3.42,5.42)
UWTT	3.77(3.24,5.20)	3.64(3.27,5.09)
<i>t/Z</i>	3.920	3.901
<i>P</i>	0.000	0.000
项目	健侧 RF	患侧 RF
LW	26.50(24.00,33.50)	21.50(20.00,24.00)
UWTT	17.00(13.25,20.00)	17.00(12.25,20.75)
<i>t/Z</i>	16.140	6.760
<i>P</i>	0.000	0.000
项目	健侧 TA	患侧 TA
LW	13.50(11.25,16.00)	12.00(8.50,13.75)
UWTT	8.00(5.25,13.00)	8.00(5.25,12.16)
<i>t/Z</i>	3.850	3.810
<i>P</i>	0.000	0.001
项目	健侧 LGA	患侧 LGA
LW	26.50(24.00,28.00)	20.00(18.00,22.00)
UWTT	22.90(20.15,26.59)	24.65(21.15,27.98)
<i>t/Z</i>	1.776	-1.758
<i>P</i>	0.092	0.095
		差值 LGA
LW	26.50(24.00,28.00)	20.00(18.00,22.00)
UWTT	22.90(20.15,26.59)	24.65(21.15,27.98)
<i>t/Z</i>	1.776	3.750
<i>P</i>	0.092	0.000

## 3 讨论

脑卒中患者发病后,损伤脑区的皮质脊髓下行通路受损,极大依赖间接的、脑干介导的下行传导束以及网状脊髓束,运动恢复以躯干及肢体近端为主、缺乏准确性、对称性,步行方面表现为典型的偏瘫步态<sup>[16]</sup>。

大量研究证实了UWTT具有改善脑卒中偏瘫患者运动功能的作用,尤其是《脑卒中水中运动治疗中国循证临床实践指南(2019版)》明确提出推荐利用水中运动治疗<sup>[7]</sup>,包括UWTT对脑卒中患者进行平衡功能、步行功能、心肺功能、下肢肌力以及日常生活活动能力训练<sup>[17~19]</sup>。

本研究采用便携式三维运动采集分析系统和无线表面肌电系统采集脑卒中偏瘫患者UWTT过程中实时的步态及表面肌电图特征,其目的不在于比较患者康复治疗效果,而是以陆地步行为参考,探索UWTT状态下脑卒中患者的运动特征,为深入研究脑卒中后步行功能恢复神经机制,改进UWTT处方奠定基础。这种针对脑卒中患者UWTT过程中实时、同步、多运动参数采集的研究在国内外尚属首次。本研究结果提示,在自感轻松的用力状态下,与陆地步行相比,当水深为剑突水平时脑卒中患者UWTT过程中总体表现为步速慢、步长短而较为对称;与之相对应,双下肢大部分肌肉活动减少、健/患侧差异缩小;至于双侧腓肠肌,虽然肌电活动无明显下降,但也显现健/患侧差异缩小的特点。以上运动特征的形成可能源于平板步行运动及水中环境特性的融合。

平板步行训练是一种典型的任务导向性训练,在完整的步态周期内,通过反复、节奏性、强制使用患侧肢体辅助步态训练。对于脑卒中偏瘫患者,平板步行训练产生的下肢运动感觉可触发脊髓中枢模式发生器(central pattern generators,CPG)活动。CPG产生节律性活动控制,如在站立相,通过加强伸肌活动抑制迈步;在站立相末,通过反馈降低载荷,启动迈步,维持站立相到迈步相的转换;并通过接收皮肤感觉调整步伐,以适应不同的地面及障碍物。此外,活动平板对于下肢的带动作用以及恒定的步行节律性可以补偿患侧下肢力弱、改善蹬地推动力、减少迈步的不对称性,从而改善步态,减少耗能。不仅如此,CPG的持续激活有助于整个中枢神经网络的广泛重组,对脑卒中后运动恢复有积极影响<sup>[20~21]</sup>。大量研究显示,平板步行及减重平板步行训练有助于缓解脑卒中偏瘫患者下肢痉挛、提高下肢肌肉活动、平衡功能、步行耐力及步态时空参数的对称性<sup>[22]</sup>。而当脑卒中患者采用CPG模式的外骨骼机器人进行站立时,其双下肢比目鱼肌、RF的平均iEMG显著降低,股外侧肌和RF的肌电信号对称性也获得明显改善<sup>[23]</sup>。另一方面,水中环境也会对脑卒中患者步态造成影响。当水位位于剑突水平时,受试者下肢负荷为陆地步行时的30%<sup>[24~25]</sup>,使患者可进行减重步行训练。不仅如此,水中运动时,浮力的托效应会显著增加受试者屈髋幅度<sup>[26~27]</sup>,弥补伸

膝肌群肌力不足导致的膝关节屈曲或过伸模式<sup>[28]</sup>。此外,在本研究中,受试者在陆地和UWTT环境未采取相同的步行速度,而以相同的用力程度作为步行参数。这是因为同样步行速度下,水中运动时黏滞阻力的抗阻效应与运动速度显著相关,因此UWTT时运动强度和难度会显著增加。尤其对于存在步行障碍的脑卒中偏瘫患者,在首次接触UWTT系统时即采用与陆地步行相同的步行速度进行测试,容易造成动作变形,难以反映受试者的自然步态特征<sup>[29]</sup>。

UWTT与水中步行也有明显不同,这些差异主要在于平板运动对步行模式的影响。UWTT过程中,传送带以稳定速度不断向后运动,促使受试者髋关节伸展,增加屈髋肌群离心收缩张力,辅助屈髋动作产生;同时牵拉腓肠肌,增加踝关节跖屈及对地面的推进力。尤其对于脑卒中偏瘫患者,双下肢交替迈步可阻止患者依赖健肢,防止获得性失用。此外相较于水中步行,UWTT模式还具有易于观察受试者完整步态周期运动表现,无需吊带或漂浮物辅助,运动参数易于控制及安全性好的特点。值得注意的是,本研究结果显示,脑卒中患者UWTT过程中腓肠肌肌电活动与陆地步行时类似。可能的原因是,一方面前进过程中矢状位黏滞阻力抵消了部分浮力的减重作用,腓肠肌的活动并没有显著下降。另一方面,平板的辅助作用降低了步行运动的难度,使健侧与患侧肌电活动差距缩小。在这种运动模式下,脑卒中偏瘫患者步行训练完成难度相对降低,有助于形成良好的步态特征,避免异常模式的形成。但以上结果的出现需要严格控制训练参数,如果水中步行速度加快、增加湍流或喷流、或者水深有较大变化,可能导致明显差异。

本研究存在一些不足:首先,由于研究过程中传感器及电极脱落,信号质量差等情况,导致样本量较小,数据脱落量较大;其次,笨重的连体乳胶防水服可能会对步态及肌电信号产生影响;然后,iEMG指标并不能提供肌电活动周期性及峰值等信息。最后,本研究步态参数仅涉及时空参数,缺乏关节角度、足底压力及动量分析;另外,UWTT训练模式丰富,还可以结合天轨悬吊系统进行双重减重步行训练<sup>[30]</sup>,不同训练模式对受试者步态、肌电活动影响巨大,尚需进一步研究。本研究结果提示,在自感轻松地用力状态下,脑卒中患者UWTT过程中表现为步态及下肢肌电活动对称性提高,有助于改善其步态对称性。下一步需要在此基础上改进研究方案,扩大样本量,进行不同运动模式下水中关节角度、动量分析与表面肌电相关性的研究。UWTT治疗模式的运动生理学、神经控制机制以及对脑卒中患者的康复效果尚需进一步研究。

## 【参考文献】

- [1] 詹青, 王丽晶. 2016 AHA/ASA 成人脑卒中康复治疗指南解读[J]. 神经病学与神经康复学杂志, 2017, 13(1): 1-9.
- [2] Calabro RS, Naro A, Russo M, et al. Shaping neuroplasticity by using powered exoskeletons in patients with stroke: A randomized clinical trial[J]. J Neuroeng Rehabil, 2018, 15(1): 35-39.
- [3] Nascimento LR, Flores LC, de Menezes K, et al. Water-based exercises for improving walking speed, balance, and strength after stroke: A systematic review with meta-analyses of randomized trials[J]. Physiotherapy, 2020, 107(1): 100-110.
- [4] 丛芳, 崔尧. 脑卒中水中运动治疗中国循证临床实践指南(2019版)[J]. 中国康复理论与实践, 2020, 26(3): 249-262.
- [5] 曾明, 崔尧, 王月丽, 等. 水中平板步行训练对脑卒中患者步行功能的影响[J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(1): 76-80.
- [6] 陈颖, 张健, 郑广昊, 等. 水中运动疗法联合电针对恢复期脑卒中患者下肢肌力和平衡功能的影响[J]. 中国康复, 2019, 34(4): 191-194.
- [7] 温子星, 邓奇, 危小焰, 等. 前后方向水平姿势扰动对人体站立平衡响应的影响[J]. 中国康复, 2017, 32(5): 404-407.
- [8] 芦海涛, 崔利华, 王艺铮. 不同方式引导肉毒毒素注射治疗脑卒中后屈腕屈指肌痉挛的效果比较[J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(11): 1352-1355.
- [9] 王铁强, 王晶, 张曼, 等. 三维步态分析对下肢生物力学变化的重测信度研究[J]. 中国康复, 2018, 33(6): 486-489.
- [10] Wang W, Li K, Yue S, et al. Associations between lower-limb muscle activation and knee flexion in post-stroke individuals: A study on the stance-to-swing phases of gait[J]. PLoS One, 2017, 12(9): 183865-183872.
- [11] 戴珞珞, 章茜, 饶高峰. 踝足矫形器辅助本体感觉训练对脑卒中后偏瘫患者运动功能及表面肌电图的影响[J]. 中国康复, 2019, 34(6): 287-290.
- [12] 张潇雅, 郑海清, 陈曦, 等. 基于表面肌电技术对卒中患者上肢运动时躯干肌用力疲劳程度的研究[J]. 中国卒中杂志, 2020, 15(9): 960-966.
- [13] Papagiannis GI, Triantafyllou AI, Roumpelakis IM, et al. Methodology of surface electromyography in gait analysis: Review of the literature[J]. J Med Eng Technol, 2019, 43(1): 59-65.
- [14] 罗梦, 周国平, 杨路, 等. 表面肌电图在脑卒中后运动功能障碍康复中的应用[J]. 中国康复, 2017, 32(1): 67-70.
- [15] 关晨霞, 郭钢花, 郭小伟, 等. 脑卒中偏瘫患者在坐位躯干旋转时躯干肌群表面肌电信号特征研究[J]. 中国康复, 2017, 32(3): 192-195.
- [16] Selvès C, Stoquart G, Lejeune T. Gait rehabilitation after stroke: Review of the evidence of predictors, clinical outcomes and timing for interventions[J]. Acta Neurol Belg, 2020, 120(4): 783-790.
- [17] Chan K, Phadke CP, Stremler D, et al. The effect of water-based exercises on balance in persons post-stroke: A randomized controlled trial[J]. Top Stroke Rehabil, 2017, 24(4): 228-235.
- [18] Ditroilo M, O'Sullivan R, Harnan B, et al. Water-filled training tubes increase core muscle activation and somatosensory control of balance during squat[J]. J Sports Sci, 2018, 36(17): 2002-2008.
- [19] Kim NH, Park HY, Son JK, et al. Comparison of underwater gait training and overground gait training for improving the walking and balancing ability of patients with severe hemiplegic stroke: A randomized controlled pilot trial[J]. Gait Posture, 2020, 80: 124-129.
- [20] 王熠钊, 陆敏. 中枢神经系统损伤后跨突触变性及其机制[J]. 中国康复, 2017, 32(6): 512-514.
- [21] 解二康, 李策, 陆蓉蓉, 等. 骨盆减重康复机器人训练对脑卒中后偏瘫患者下肢功能的影响[J]. 中国康复, 2020, 35(8): 404-408.
- [22] 袁松, 刘飞, 张保, 等. 基于表面肌电探讨蝶形浴对脑卒中偏瘫患者上肢痉挛的影响[J]. 中国康复, 2019, 34(5): 231-234.
- [23] 盛逸澜, 瞿强, 冉军, 等. 功能矫正贴扎技术改善脑卒中后足下垂患者步行功能的即刻效果观察[J]. 中国康复, 2019, 34(4): 199-202.
- [24] Lim CG. Effect of underwater treadmill gait training with water-jet resistance on balance and gait ability in patients with chronic stroke: A randomized controlled pilot trial[J]. Front Neurol, 2019, 10(11): 1246-1250.
- [25] Heywood S, McClelland J, Geigle P, et al. Spatiotemporal, kinematic, force and muscle activation outcomes during gait and functional exercise in water compared to on land: A systematic review [J]. Gait Posture, 2016, 48(2): 120-130.
- [26] Matsumoto S, Uema T, Ikeda K, et al. Effect of underwater exercise on lower-extremity function and quality of life in post-stroke patients: A pilot controlled clinical trial[J]. J Altern Complement Med, 2016, 22(8): 635-641.
- [27] Kim MK, Lee SA. Underwater treadmill training and gait ability in the normal adult[J]. J Phys Ther Sci, 2017, 29(1): 67-69.
- [28] Kim MC, Han SK, Kim SK. Changes in the range of motion of the hip joint and the muscle activity of the rectus femoris and biceps femoris of stroke patients during obstacles crossing on the ground and underwater[J]. J Phys Ther Sci, 2014, 26(8): 1143-1146.
- [29] Lee ME, Jo GY, Do HK, et al. Efficacy of aquatic treadmill training on gait symmetry and balance in subacute stroke patients [J]. Ann Rehabil Med, 2017, 41(3): 376-386.
- [30] 余雨荷, 许明, 张泓. 双重减重智能步态康复水疗训练系统的设计与研发[J]. 中国康复, 2019, 34(2): 93-97.