



(扫描二维码查看原文)

· 新进展 ·

三维步态分析技术在脑卒中后偏瘫步态中的应用进展

胡填¹, 古剑雄²

【摘要】 脑卒中患者步行能力的恢复是其回归家庭、重返社会的基础, 为了更准确地量化脑卒中患者的步行能力, 临床工作者引入了三维步态分析系统。本文总结了三维步态分析技术在脑卒中后偏瘫步态中的应用、存在的问题及展望, 旨在为三维步态分析技术的临床推广、应用提供更多参考。

【关键词】 卒中; 偏瘫步态; 三维步态分析; 康复

【中图分类号】 R 743 **【文献标识码】** A DOI: 10.12114/j.issn.1008-5971.2021.00.264

胡填, 古剑雄. 三维步态分析技术在脑卒中后偏瘫步态中的应用进展[J]. 实用心脑血管病杂志, 2021, 29(11): 124-128. [www.syxnf.net]

HU T, GU J X. Application progress of three-dimensional gait analysis technology in hemiplegia gait after stroke [J]. Practical Journal of Cardiac Cerebral Pneumal and Vascular Disease, 2021, 29(11): 124-128.

Application Progress of Three-dimensional Gait Analysis Technology in Hemiplegia Gait after Stroke HU Tian¹, GU Jianxiong²

1. Guangdong Medical University, Zhanjiang 524002, China

2. Department of Rehabilitation Medicine, Affiliated Hospital of Guangdong Medical University, Zhanjiang 524002, China

Corresponding author: GU Jianxiong, E-mail: kfkjx@163.com

【Abstract】 The recovery of walking function of stroke patients is the basis for their return to family and society. How to further accurately quantify the walking ability of stroke patients, clinicians have introduced a three-dimensional gait analysis technology. This paper summarizes the application, existing problems and prospects of three-dimensional gait analysis technology in hemiplegic gait after stroke, aiming to provide more reference for the clinical popularization and application of three-dimensional gait analysis technology.

【Key words】 Stroke; Hemiplegic gait; Three-dimensional gait analysis; Rehabilitation

1. 524002 广东省湛江市, 广东医科大学

2. 524002 广东省湛江市, 广东医科大学附属医院康复科

通信作者: 古剑雄, E-mail: kfkjx@163.com

[30] 周轲, 曹敏. 吴银根治疗肺系疑难病的经验[J]. 江苏中医药, 2021, 53(1): 14-17. DOI: 10.19844/j.cnki.1672-397X.2021.01.007.

[31] 崔红生, 武维屏, 姜良铎. 毒损肺络与肺间质纤维化[J]. 中医杂志, 2007, 48(9): 858-859. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1668.2007.09.040.

[32] 安慧娟. 张锡纯辨治喘证经验及在肿瘤内科中的应用[J]. 亚太传统医药, 2018, 14(6): 105-106. DOI: 10.11954/ytctty.201806035.

[33] 李新存. 喘证从肝论治举隅[J]. 光明中医, 2008, 23(9): 1344-1345. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8914.2008.09.077.

[34] 朱丹溪. 朱丹溪医学全书[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2014: 83.

[35] 孟芝, 方向明. 程国彭《医学心悟》喘证治法浅析[J]. 天津中医药大学学报, 2020, 39(2): 152-154. DOI: 10.11656/j.issn.

1673-9043.2020.02.07.

MENG Z, FANG X M. Analysis of asthma treatment in Yixue Xinwu written by CHENG Guopeng [J]. Journal of Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, 2020, 39(2): 152-154. DOI: 10.11656/j.issn.1673-9043.2020.02.07.

[36] 刘浩, 杨阳, 曲妮妮, 等. 论《伤寒论》三阴三阳及喘证辨治[J]. 中国药物经济学, 2020, 15(12): 124-128. DOI: 10.12010/j.issn.1673-5846.2020.12.031.

LIU H, YANG Y, QU N N, et al. Analysis on diagnose and treatment of three yin three yang and asthma syndrome in Shanghan Lun [J]. China Journal of Pharmaceutical Economics, 2020, 15(12): 124-128. DOI: 10.12010/j.issn.1673-5846.2020.12.031.

(收稿日期: 2021-06-06; 修回日期: 2021-10-12)

(本文编辑: 李越娜)

一项流行病学调查显示,中国脑卒中发病率较过去30年明显增加^[1]。脑卒中是成年人获得性残疾的主要病因^[2],其中步行障碍是影响脑卒中患者正常生活的主要运动功能障碍之一。脑卒中患者多因下肢伸肌痉挛而出现骨盆后缩、髋关节伸展内旋、膝关节伸展、足内翻、跖屈,致使其行走时需提髋,下肢外旋、外展才能顺利迈步,表现为患侧下肢经外侧划半圆弧再回旋向前迈步,这种偏瘫步态模式又称“划圈步态”^[3]。为了更准确地量化脑卒中患者的步行能力,临床工作者引入了三维步态分析系统。三维步态分析系统是由三维光电跟踪系统、肌电遥测系统、足底压力采集测量系统及计算机处理系统4部分组成,其中三维光电跟踪系统可捕捉放置于受试者身体特定位置的反射标志物,肌电遥测系统可动态观察受试者肌电活动情况,足底压力采集测量系统可以反映受试者行走时地面对足底的支撑反应力,计算机处理系统可整合处理各项数据并描绘成数据表格或统计图^[4]。三维步态分析技术是指检查者通过三维步态分析系统所导出的关于受试者行走时的时空参数、运动机能学参数、动力学参数、肌电活动参数和能量消耗参数等^[5]来客观地评价其步行能力,总结步态规律,分析步态异常的病因,从而为医学诊断、手术决策制定和疗效评定提供科学依据。

近年来,随着现代医学技术的持续发展和三维步态分析系统的不断改进,三维步态分析技术已广泛应用于生物力学、临床医学、康复工程和体育科学等诸多领域。三维步态分析系统客观、精准的测量结果有助于医务工作者鉴定伤残、制定治疗方案、评价疗效及设计研发矫形器具等,且其在探究脑卒中后偏瘫患者异常运动模式中的应用已日趋成熟。三维步态分析技术是临床评价脑卒中后偏瘫患者步态的“金标准”^[6-7]。本文就三维步态分析技术在评估脑卒中后偏瘫步态中的应用进展进行综述,以期为患者制定更有针对性的康复方案提供参考。

1 脑卒中后偏瘫步态的三维步态分析

1.1 时空参数研究 步态的时空参数包括步速、步频、步长、步幅、步宽、步态周期和步态时相。脑卒中后偏瘫患者的异常步态主要表现为步速减慢,步长缩短,步幅降低,步宽增大,步态周期延长^[8]。步速和步长的改善常作为偏瘫患者的主要结局指标或次要结局指标而被临床研究者广泛应用^[9-11]。步速、步长可用于评价脑卒中患者的步行能力,且步长的偏差可用于评价步态的对称性^[12]。单莎瑞等^[13]研究表明,步速和双支撑相是社区健康老年人 Berg 平衡量表(Berg Balance Scale, BBS)得分的主要影响因素。PARK 等^[14]通过三维步态分析技术发现,步速和步长的改善可以提高脑卒中患者卒中专门生存质量量表(Stroke-specific Quality-of-life, SSQOL)得分,且患者 BBS 得分与 SSQOL 得分呈正相关。上述研究均提示步速、双支撑相、步长对脑卒中后偏瘫患者平衡能力具有潜在的评估价值。

脑卒中患者常因偏瘫侧肢肌肉无力、痉挛和活动受限而导致其出现不对称行走,步态不稳,进而增加跌倒风险^[15]。步态周期参数中的摆动相/支撑相比值常用于衡量患者步行质量和步态恢复情况^[16]。荣湘江等^[17]指出,患侧下肢单支撑

期缩短是导致脑卒中患者步行能力下降的根本原因。盛逸澜等^[18]研究也证实了这一观点,而踝关节、足下垂功能矫正贴治疗可增强脑卒中患者患侧肢体的支撑能力,降低摆动相/支撑相比值,从而改善步态,增强步行能力。

1.2 运动机能学参数研究 脑卒中患者由于患侧下肢各关节活动受限、控制能力下降及分离运动不充分等原因而导致患侧髋、膝、踝关节的活动度均较正常健康人减小^[19],主要体现在患侧下肢在摆动过程中屈髋、屈膝和踝背屈的角度不足。国内外大量研究表明,干预性的康复治疗可通过改善患者患侧髋、膝、踝关节的活动度来增强患者的步行能力^[20-24]。因此,利用三维步态分析技术测量患侧髋、膝、踝关节的活动角度也可用于评价脑卒中后偏瘫程度。此外,行走时下肢各关节活动的相互关系也可用于指导康复方案的制定。ROCHE 等^[25]首次发现,脑卒中患者患侧下肢在跨步时髋关节屈曲角度与踝关节背屈角度呈负相关($r=-0.26$),提示临床可通过采取近端策略(踝背屈能力不足时增加屈髋能力进行补偿)或远端策略(锻炼踝背屈能力以克服屈髋能力不足)来改善足廓清障碍。

1.3 动力学参数研究

1.3.1 足-地接触力 足-地接触力可按垂直、前后和左右方向做三维记录。在整个步态周期中,正常健康人在垂直方向上的地面反作用力(ground reaction force, GRF)曲线表现为对称双峰^[5],可反映“足跟着地-足部放平-足尖蹬地”的过程。受偏瘫步态的影响,脑卒中患者足跟着地和足尖蹬地的表现减弱或消失,GRF 曲线由正常的对称双峰变为不规则,且由于患侧下肢单支撑相缩短,存在对称双峰第一波峰延迟和第二波峰提前的现象^[26]。另外,脑卒中后偏瘫患者由于患侧肢体无力,需要依靠健侧肢体支撑身体,所以脑卒中后偏瘫患者与正常健康人的区别主要在于双下肢的不对称性,且 LEE 等^[27]发现脑卒中患者健侧 GRF 明显小于健康受试者的优势侧。ARDESTANI 等^[28]在探究脑卒中患者行走能力时发现,脑卒中患者在训练室行走时,患侧 GRF 曲线的双峰比明显增高,患侧负重能力增加 15%~25%,负重对称性增加 11%~24%,提示在对脑卒中后偏瘫患者进行步行训练时可能会高估患者的行走能力而导致跌倒风险增加。

1.3.2 关节力矩 力矩是描述力对物体转动作用的物理量。人类所有的复杂动作是由肌肉收缩发力牵拉骨骼引起关节转动所促成的,并由神经系统控制,因此关节力矩是力与关节活动范围的乘积。在已知 GRF 和关节角度曲线的情况下,可采用逆向动力学分析法计算下肢关节力矩^[5]。关节力矩是临床诊断下肢功能损伤最敏感的指标^[29]。

脑卒中患者下肢关节力矩降低多因相关肌肉群肌力下降和下肢伸肌痉挛所致,主要体现在屈髋、伸髋、伸膝和踝背伸^[30]。全俊等^[31]研究发现,脑卒中后偏瘫患者患侧膝关节屈肌/伸肌峰值力矩(hamstring/quadriceps, H/Q)比值与 BBS 得分、起立-行走计时测试(timed up and go test, TUGT)得分、10 m 步行距离(ten-meter walking distance, 10MWD)、稳定极限和偏移指数等均具有相关性,提示 H/Q 比值可较客观地评价脑卒中后偏瘫患者的平衡和步行能力。

1.4 肌电活动参数研究 已有研究证实,脑卒中后偏瘫患者患侧肌肉运动功能单位数量及放电量均减少,肌肉纤维类型发生转变^[32],这些因素均可导致偏瘫侧肌无力,不利于步行能力的恢复。杨慧馨等^[33]通过表面肌电分析系统探讨太极拳和八段锦是否可以改善脑卒中患者下肢运动功能,结果显示,治疗后八段锦组、太极拳组患者踝背屈时胫骨前肌肌电积分值(integrated electromyogram, iEMG)升高,且均高于常规治疗组,表明患者练习太极拳和八段锦后小腿主动肌电活动增强,两种锻炼方法均可有效恢复患者的下肢运动功能。D'SOUZA等^[34]研究表明,脑卒中后偏瘫患者在社区环境下行走时,患侧下肢股直肌、股二头肌、胫前肌和腓肠肌的肌肉最大自主收缩(maximum voluntary contraction, MVC)百分比均降低,肌电活动明显减少。上述研究提示在训练患者步行能力时应注重模拟真实环境,加强患者在双重任务甚至多任务下的步行训练。

1.5 能量消耗参数研究 氧价(oxygen cost, OC)是指运动时人体单位体质量、单位距离所消耗的氧气量,其单位是 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[5],主要通过气体代谢分析仪测出的耗氧量(oxygen consumption, VO_2)进行计算,可定量评价人体在运动过程中的能量消耗,OC越小,表明人体运动时所消耗的能量越少。脑卒中后偏瘫患者步速缓慢、不对称性行走^[35]等异常步态均可增加能量消耗。 VO_2 的研究有利于为脑卒中患者制定个体化的运动强度。MUNARI等^[36]将16例慢性脑卒中患者分为两组,一组接受高强度间歇跑步机训练(high-intensity treadmill training, HITT),另一组接受低强度持续跑步机训练(low-intensity treadmill training, LITT),结果显示,与接受LITT患者相比,接受HITT患者的步行能力较好,且最大步速行走时OC降低,同时 VO_2 峰值升高,提示HITT对于脑卒中患者是可行、安全的。

2 三维步态分析技术在中国的挑战

上述研究表明,三维步态分析技术中的时空、运动机能学和动力学等步态参数能较好地反映脑卒中后偏瘫患者的步行功能。但三维步态分析技术因仪器昂贵、评估耗时长、产生数据较多且不易使用等限制了其在临床中的广泛应用。

2.1 三维步态分析技术应用成本昂贵 目前,三维步态分析系统需要有足够的空间来安放多摄像机运动捕捉系统和力检测平台^[37],且患者在评估时需要一个相对安静的环境,这就要求医院需要建设专门的实验室来摆放三维步态分析系统。另外,由于国内对于研发系统的技术还不成熟,主流三维步态分析系统多来自国外^[38],这无疑增加了科室的运营成本。

2.2 三维步态分析技术耗时、费力 三维步态分析技术主要是依赖放置于人体上反射标志物的反馈,这些常用的反射标志物多达30个^[39],这在准备、测量过程中十分耗时。此外,在系统采集数据时需要患者进行反复行走,这对脑卒中后偏瘫患者无疑是一项不小的挑战。

2.3 三维步态分析技术数据应用困难 基于三维步态分析技术的评估会产生大量数据,虽然客观,但在临床应用中十分复杂。研究表明,由于步行期间关节之间的相互关系,即一个关节的异常可能会在另一个关节、另一个平面或步态周期

的另一个阶段产生异常步态的效应^[40],这就要求评估者需要具备扎实的生物力学理论基础和足够的多学科知识储备。同时如何更好地将这些“过载”数据与脑卒中患者功能障碍联系起来对评估者来说也是一项挑战。

3 小结与展望

三维步态分析技术因其可客观、敏感地定量评价患者的下肢运动功能而广泛应用于神经科、骨科和康复科等临床一线科室,帮助医生和治疗师对患者的步行功能进行临床诊断、制定康复方案和疗效评估。三维步态分析技术在临床应用中虽存在着诸多不足,但随着我国医疗事业的不断发展,患者对精准诊疗的需求不断提高,三维步态分析技术的优势还有待进一步挖掘。

3.1 测量结果的解释需要标准化 三维步态分析技术会产生大量数据,且测量数据较客观,但检查者对于各项参数的解释却是主观的,因此有必要建立一个广泛认可的参数指南用以标准化解读各项步态参数,进而客观地评估患者的步行能力。

3.2 推广便携式步态分析仪的使用 近年来,便携式步态分析仪凭借其操作简便、所需成本较低等特点而被研发并代替三维步态分析系统。有研究表明,通过便携式步态分析仪分析的健康人群^[41]和脑卒中患者^[42]的步态参数均具有良好的信度。因此,笔者认为便携式步态分析仪值得在一些无法提供特殊场地和经费不足的医院如二级医院和社区医院中推广使用,使精确化诊疗走向社区。

作者贡献:胡填进行文章的构思与设计,文献/资料的收集、整理,撰写及修订论文;古剑雄进行文章的可行性分析,负责文章的质量控制及审校,并对文章整体负责、监督管理。

本文无利益冲突。

参考文献

- [1] WANG W Z, JIANG B, SUN H X, et al. Prevalence, incidence, and mortality of stroke in China: results from a nationwide population-based survey of 480 687 adults [J]. *Circulation*, 2017, 135 (8): 759-771. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.116.025250.
- [2] LANGHORNE P, COUPAR F, POLLOCK A. Motor recovery after stroke: a systematic review [J]. *Lancet Neurol*, 2009, 8 (8): 741-754. DOI: 10.1016/S1474-4422(09)70150-4.
- [3] 张泓. 康复评定学 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 2017.
- [4] BAKER R, ESQUENAZI A, BENEDETTI M G, et al. Gait analysis: clinical facts [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2016, 52 (4): 560-574.
- [5] 张峻霞. 步态分析与行走稳定性研究 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2020.
- [6] GEIGER M, SUPLOT A, PRADON D, et al. Minimal detectable change of kinematic and spatiotemporal parameters in patients with chronic stroke across three sessions of gait analysis [J]. *Hum Mov Sci*, 2019, 64: 101-107. DOI: 10.1016/j.humov.2019.01.011.
- [7] FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ P, KOUTSOU A, CUESTA-GÓMEZ A, et al. Reliability of kinovea® software and agreement with a three-

- dimensional motion system for gait analysis in healthy subjects [J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20 (11): E3154. DOI: 10.3390/s20113154.
- [8] 励建安, 孟殿怀. 步态分析的临床应用 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2006, 28 (7): 500-503. DOI: 10.3760/j.issn:0254-1424.2006.07.022.
- [9] 董晓琼, 吴月峰, 范虹, 等. 步行支持带联合常规康复治疗脑卒中患者步态的疗效观察 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2020, 42 (6): 528-532. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2020.06.010.
- DONG X Q, WU Y F, FAN H, et al. The effects of using a walking support band on the gait of stroke survivors [J]. *Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2020, 42 (6): 528-532. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2020.06.010.
- [10] LEE S M, CYNN H S, YI C H, et al. Wearable tubing assistive walking device immediately enhances gait parameters in subjects with stroke: a randomized controlled study [J]. *NeuroRehabilitation*, 2017, 40 (1): 99-107. DOI: 10.3233/NRE-161394.
- [11] PARK J, SEO D, CHOI W, et al. The effects of exercise with TENS on spasticity, balance, and gait in patients with chronic stroke: a randomized controlled trial [J]. *Med Sci Monit*, 2014, 20: 1890-1896. DOI: 10.12659/MSM.890926.
- [12] 李华, 姚红华, 刘利辉. 肌力训练对偏瘫步态的影响及下肢功能评定与步态分析间的相关性 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2003, 25 (1): 34-36. DOI: 10.3760/j.issn:0254-1424.2003.01.011.
- LI H, YAO H H, LIU L H. Effects of muscle strengthening exercise on gait of stroke patients and the relationship between the evaluation of gait analysis and functional assessment [J]. *Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2003, 25 (1): 34-36. DOI: 10.3760/j.issn:0254-1424.2003.01.011.
- [13] 单莎瑞, 黄旭明, 张明兴, 等. 基于三维步态分析仪对社区老人平衡能力与步态时空参数的相关性分析 [J]. *广东医学*, 2021, 42 (3): 365-369. DOI: 10.13820/j.cnki.gdyx.20203780.
- SHAN S R, HUANG X M, ZHANG M X, et al. The study on the correlation between balance ability and gait spatial-temporal parameters of the elderly in community based on three-dimensional gait analyzer [J]. *Guangdong Medical Journal*, 2021, 42 (3): 365-369. DOI: 10.13820/j.cnki.gdyx.20203780.
- [14] PARK J, KIM T H. The effects of balance and gait function on quality of life of stroke patients [J]. *NeuroRehabilitation*, 2019, 44 (1): 37-41. DOI: 10.3233/NRE-182467.
- [15] PATTERSON K K, GAGE W H, BROOKS D, et al. Evaluation of gait symmetry after stroke: a comparison of current methods and recommendations for standardization [J]. *Gait Posture*, 2010, 31 (2): 241-246. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2009.10.014.
- [16] ROZANSKI G M, WONG J S, INNESS E L, et al. Longitudinal change in spatiotemporal gait symmetry after discharge from inpatient stroke rehabilitation [J]. *Disabil Rehabil*, 2020, 42 (5): 705-711. DOI: 10.1080/09638288.2018.1508508.
- [17] 荣湘江, 姚鸿恩, 王卫强, 等. 偏瘫步态中时相与周期的定量研究 [J]. *天津体育学院学报*, 2004, 19 (2): 56-58. DOI: 10.13297/j.cnki.issn1005-0000.2004.02.019.
- RONG X J, YAO H E, WANG W Q, et al. Quantitative analyses of gait cycle in hemiplegia [J]. *Journal of Tianjin University of Sport*, 2004, 19 (2): 56-58. DOI: 10.13297/j.cnki.issn1005-0000.2004.02.019.
- [18] 盛逸澜, 冉军, 胡国炯, 等. 肌内效贴改善脑卒中后足下垂患者步行功能的即时疗效观察 [J]. *中国运动医学杂志*, 2019, 38 (9): 802-805. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6710.2019.09.010.
- [19] 沈新培, 夏清, 杜玲玲. 三维步态在脑卒中足下垂患者下肢节段协调性分析的应用 [J]. *中国康复*, 2021, 36 (3): 144-149. DOI: 10.3870/zgkf.2021.03.004.
- SHEN X P, XIA Q, DU L L. SHEN X P, XIA Q, DU L L. Application of three-dimensional gait in the analysis of coordination of lower limbs in stroke patients with foot drop [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation*, 2021, 36 (3): 144-149. DOI: 10.3870/zgkf.2021.03.004.
- [20] 廖燕钺, 刘凤彬, 林茜, 等. 经丘墟穴诱发踝背屈运动对脑卒中患者步态的影响 [J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35 (1): 84-87. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2020.01.017.
- LIAO Y X, LIU F B, LIN X, et al. Effect of ankle dorsiflexion movement induced by Qiu Xu on gait of stroke patients [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2020, 35 (1): 84-87. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2020.01.017.
- [21] WANG H Q, DONG G R, BAO C L, et al. Immediate effect of scalp acupuncture on the gait of patients with subacute intracerebral haemorrhage analysed by three-dimensional motion: secondary analysis of a randomised controlled trial [J]. *Acupunct Med*, 2018, 36 (2): 71-79. DOI: 10.1136/acupmed-2016-011272.
- [22] FERREIRA L A B, CIMOLIN V, NETO H P, et al. Effect of postural insoles on gait pattern in individuals with hemiparesis: a randomized controlled clinical trial [J]. *J Bodyw Mov Ther*, 2018, 22 (3): 792-797. DOI: 10.1016/j.jbmt.2017.08.004.
- [23] 赵秦, 魏慧, 王威, 等. 全身振动训练对脑卒中患者步态的影响 [J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35 (6): 676-681. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2020.06.006.
- ZHAO Q, WEI H, WANG W, et al. Effects of whole body vibration training on gait in stroke patients [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2020, 35 (6): 676-681. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2020.06.006.
- [24] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2019.05.006.
- ZHANG S X, GUO Y L, HE L H, et al. Immediate effects of functional electrical stimulation based on a normal walking pattern on walking ability of patients with stroke: a randomized controlled trial [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2019, 34 (5):

- 527-532.DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2019.05.006.
- [25] ROCHE N, BONNYAUD C, GEIGER M, et al.Relationship between hip flexion and ankle dorsiflexion during swing phase in chronic stroke patients [J].Clin Biomech (Bristol, Avon), 2015, 30(3): 219-225.DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2015.02.001.
- [26] KIM W S, KIM M J.Individual joint contribution to body weight support in the affected lower limb during walking in post-stroke hemiplegia [J].Top Stroke Rehabil, 2017, 24(3): 170-176. DOI: 10.1080/10749357.2016.1219128.
- [27] LEE D H, CHANG W N, JEON H J.Comparison of ground reaction force during gait between the nonparetic side in hemiparetic patients and the dominant side in healthy subjects [J].J Exerc Rehabil, 2020, 16(4): 344-350.DOI: 10.12965/jer.2040488.244.
- [28] ARDESTANI M M, HORNBY T G.Effect of investigator observation on gait parameters in individuals with stroke [J].J Biomech, 2020, 100: 109602.DOI: 10.1016/j.jbiomech.2020.109602.
- [29] 周敬宾, 李国平. 膝关节前交叉韧带损伤与重建术后的步态分析研究现状 [J]. 中国运动医学杂志, 2006, 25(3): 323-326, 372.DOI: 10.16038/j.1000-6710.2006.03.015.
- [30] 毛玉蓉, 李乐, 陈正宏, 等. 脑卒中患者步行能力与下肢三维运动学及动力学相关性分析 [J]. 中国康复医学杂志, 2012, 27(5): 442-447.DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2012.05.013.
- MAO Y R, LI L, CHEN Z H, et al.Correlation analysis between gait function and three dimension kinematic and kinetic parameters of lower limb in stroke patients [J].Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2012, 27(5): 442-447.DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2012.05.013.
- [31] 全俊, 黄墩兵, 郑绍敏, 等. 脑卒中偏瘫患者膝关节屈/伸力矩比值与平衡及步行功能的相关性研究 [J]. 中华物理医学与康复杂志, 2021, 43(1): 17-20.DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2021.01.004.
- QUAN J, HUANG D B, ZHENG S M, et al.The ratio of hamstring to quadriceps peak torque predicts balance and walking quality among hemiplegic stroke survivors [J].Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation, 2021, 43(1): 17-20.DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2021.01.004.
- [32] ARENE N, HIDLER J.Understanding motor impairment in the paretic lower limb after a stroke: a review of the literature [J].Top Stroke Rehabil, 2009, 16(5): 346-356.DOI: 10.1310/tsr1605-346.
- [33] 杨慧馨, 刘晓蕾. 太极拳和八段锦对脑卒中患者偏瘫下肢运动功能和表面肌电的效果 [J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(1): 101-106.DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2019.01.014.
- YANG H X, LIU X L.Effects of Taiji Quan and Baduanjin on motor function of lower limbs for stroke patients using surface electromyography [J].Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2019, 25(1): 101-106.DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2019.01.014.
- [34] D' SOUZA J, NATARAJAN D M, KUMARAN D D S.Does the environment cause changes in hemiparetic lower limb muscle activity and gait velocity during walking in stroke survivors? [J].J Stroke Cerebrovasc Dis, 2020, 29(10): 105174.DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105174.
- [35] AWAD L N, PALMER J A, POHLIG R T, et al.Walking speed and step length asymmetry modify the energy cost of walking after stroke [J].Neurorehabil Neural Repair, 2015, 29(5): 416-423.DOI: 10.1177/1545968314552528.
- [36] MUNARI D, PEDRINOLLA A, SMANIA N, et al.High-intensity treadmill training improves gait ability, VO₂peak and cost of walking in stroke survivors: preliminary results of a pilot randomized controlled trial [J].Eur J Phys Rehabil Med, 2018, 54(3): 408-418.DOI: 10.23736/S1973-9087.16.04224-6.
- [37] TIAN T, WANG C, XU Y, et al.A wearable gait analysis system used in type 2 diabetes mellitus patients: a case-control study [J].Diabetes Metab Syndr Obes, 2021, 14: 1799-1808.DOI: 10.2147/DMSO.S305102.
- [38] 张彦新. 三维步态分析技术的现状与发展 [J]. 康复学报, 2017, 27(3): 1-4.DOI: 10.3724/SP.J.1329.2017.03001.
- ZHANG Y X.Three-dimensional gait analysis: current status and future developments [J].Journal of Fujian University of Traditional Chinese Medicine, 2017, 27(3): 1-4.DOI: 10.3724/SP.J.1329.2017.03001.
- [39] MUKAINO M, OHTSUKA K, TANIKAWA H, et al.Clinical-oriented three-dimensional gait analysis method for evaluating gait disorder [J].J Vis Exp, 2018(133): 57063.DOI: 10.3791/57063.
- [40] SCHWARTZ M H, ROZUMALSKI A.The gait deviation index: a new comprehensive index of gait pathology [J].Gait Posture, 2008, 28(3): 351-357.DOI: 10.1016/j.gaitpost.2008.05.001.
- [41] DONATH L, FAUDE O, LICHTENSTEIN E, et al.Validity and reliability of a portable gait analysis system for measuring spatiotemporal gait characteristics: comparison to an instrumented treadmill [J].J Neuroeng Rehabil, 2016, 13: 6.DOI: 10.1186/s12984-016-0115-z.
- [42] 张文通, 钮金圆, 许光旭, 等. 一种便携式步态分析仪评估脑卒中步态时空参数的信度与效度研究 [J]. 康复学报, 2016, 26(5): 25-28.DOI: 10.3724/SP.J.1329.2016.05025.
- ZHANG W T, NIU J Y, XU G X, et al.Reliability and validity of the portable analyses of temporal and spatial gait parameters in patients with stroke [J].Journal of Fujian University of Traditional Chinese Medicine, 2016, 26(5): 25-28.DOI: 10.3724/SP.J.1329.2016.05025.

(收稿日期: 2021-07-06; 修回日期: 2021-09-27)

(本文编辑: 李越娜)