

· 综述 ·

脑卒中后上肢及手运动功能定量评定方法的研究进展

钱叶叶^{1,2} 吴毅¹¹复旦大学附属华山医院康复医学科,上海 201300; ²复旦大学附属浦东医院康复医学科,上海 200040

通信作者:吴毅,Email:wuyi4000@163.com

【摘要】 脑卒中是临床常见疾病,患者常遗留上肢及手功能障碍。目前临床评定脑卒中患者上肢及手功能主要采用主观的问卷评定或量表评测,尽管其具有良好的信效度,但由于主观性较强、评定较粗略,其结果很难反映微小功能变化,难以满足临床精细评定及分析的需求,因此对脑卒中后上肢及手运动功能进行客观定量评定逐渐引起临床重视。本文将从关节活动度、肌肉情况及针对功能性活动的评定 3 个方面对脑卒中患者上肢及手功能客观定量评定方法及相关进展作一简要综述。

【关键词】 脑卒中; 上肢及手功能; 客观定量评定; 进展

基金项目:上海市科学技术委员会资助项目(16411955400,17411953900)

Fund program: The Key Projects of Shanghai Science and Technology on Biomedicine (16411955400, 17411953900)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.06.018

脑卒中是一种高死亡率及高致残率的全球性疾病^[1]。根据流行病学调查,我国目前约有 750 万脑卒中幸存者^[2],约 70% 幸存者遗留有不同程度上肢及手运动功能障碍^[3]。上肢及手运动功能障碍患者常见表现包括肌无力或肌张力异常、运动控制受损^[4]等,从而对患者日常生活活动能力造成严重影响。

针对脑卒中后运动功能障碍,临床多采用量表进行评定,其常用量表大致分为以下 4 大类:①以肌肉情况变化为主;②以运动模式改变为主;③以上肢功能变化为主;④以手功能变化为主等^[5]。虽然这些量表已长期应用于临床,信效度也被广泛认可^[6-9],但在实际应用中仍存在以下问题:首先这些量表容易受评定者个人经验及测量标准影响^[10];其次这些量表大都基于数值范围的评分,对一些微小、但却重要的变化缺乏敏感性,且部分量表存在天花板及地板效应^[6, 11-13];第三,其中有些量表如 Wolf 运动功能测试(Wolf motor function test, WMFT)及上肢动作研究量表(action research arm test, ARAT)评定较繁琐、耗时长^[8],易降低患者依从性;最后量表结果尚不能完全判断功能改变是疾病恢复或是代偿引起^[14]。而评定是康复的基石,没有评定就无法制订康复治疗计划、评价康复治疗效果,因此能更精准描述患者上肢及手运动功能障碍程度,并对康复结果做出更恰当合理解释的定量评定方法越来越受到临床康复医师及治疗师的重视。近年来随着神经电生理技术、生物力学、康复机器人、微型传感器等新技术广泛应用于临床,关于脑卒中后上肢及手功能障碍客观定量评定方法的研究日益增多。基于此,本文将从关节活动度(range of motion, ROM)、肌肉情况、针对功能性活动的评定三个方面,对脑卒中后上肢及手运动功能定量评定方法的研究进展简要综述如下。

关节活动度评定

关节活动度(ROM)指关节从起始端到终末端的正常运动

范围^[15],作为一项基础评估项目,已广泛应用于临床以确定患者功能受限程度及疗效情况。从 1980 年开始临床便利用测角器测量关节 ROM 并一直使用至今,但测角器测量受患者体位、软组织及骨骼位置影响较大,尤其在测量指间关节 ROM 时容易造成较大误差^[16-17]。

针对测角器的不足,目前通过 3D 运动捕捉系统和计算机技术监测上肢及手部在空间的位置变化,再利用特殊的算法计算关节 ROM 的定量评定方法被视为 ROM 测量金标准,常用作新评定方法的参考标准^[18-19];但 3D 运动捕捉系统过于笨重且需要标记,不适宜作为临床常规评定项目及应用于家庭环境。目前有许多优化的评定设备逐渐涌现,如上海大学与复旦大学附属华山医院康复医学科联合研发的多维视觉手功能康复定量评估系统^[20]及 Pham 等^[17]开发的一款非接触手部 ROM 测量系统。这些系统可消除患者体位、软组织等因素对结果的影响,并可通过三维骨骼位置变化感知微小的角度变化,具有较高的敏感性,且相对耗时较短。同时复旦大学附属华山医院研发的评定系统还可对传统方法无法测量的柱状抓握、球状抓握及拇指环转等动作进行定量评定,丰富了评定内容。不过目前只有该设备的小样本可行性研究,其应用于临床还需确切的信效度研究支持^[21]。

除此之外,利用微软 Kinect 技术研发的多种惯性可穿戴传感器也被应用于脑卒中后上肢及手功能 ROM 测量中。在测量肩 ROM 过程中发现其重测信度较高,但精确度一般,与金标准相比约有 8~14° 误差^[18],且容易受测量位置影响^[22]。不过有研究表明当 Kinect 传感器位于患者正前方斜上 45° 位置时,肩 ROM 测量错误率最低^[23]。与 3D 运动捕捉系统比较,一款基于 Kinect 技术的新研发 POM-Checker 系统测量肩关节屈曲和外展 ROM 具有较好的信效度^[24]。不过目前以小样本研究居多,在广泛投入临床使用前,还需进一步了解 Kinect 技术在测量特定 ROM 精度和准确度方面的局限性,同时制订统一的测量标准,

方便临床使用。当然目前 Kinect 技术也在发展,基于二代 Kinect 技术获取的数据较一代更准确^[25]。

肌肉情况评定

一、肌力评定

上肢及手的肌力 (muscle strength) 是预测脑卒中功能预后的重要指标之一^[26],而目前临床常用的徒手肌力检查 (manual muscle testing, MMT) 其分级标准缺乏明确定量界限,因此临床出现一些肌力定量检查工具,如等速肌力测试、握力计、握力计、手持测力计等^[27]。大量研究表明等速肌力测试是一个有效且准确的肌力定量评定工具^[28],常用作其他肌力测量仪器的参考标准^[29],但其信效度研究主要集中在运动损伤或下肢肌力测量方面^[30],涉及脑卒中后上肢及手肌力评定的信效度研究较少。尽管如此,等速肌力测试用于脑卒中上肢肌力评定仍是可靠的^[31];但等速肌力测试费用高、设备体积大、摆放体位耗时,在一定程度上限制其使用;与之相比,手持测力计因其方便携带,同时相关研究表明其与等速肌力测试具有很好的相关性,不过手持测力计测量数据受体位影响较大,在一定程度上影响重测信度并限制其临床使用^[27]。握力计及握力计也是临床常用的手部肌力评定工具,Ekstrand 等^[32]通过比较脑卒中恢复期患者握力计与等速肌力测试结果,发现握力是较好的检测脑卒中后上肢及手肌无力的代表性指标,且测试过程较等速肌力测试更方便、耗时更少。因此可针对不同需求及自身环境选择适宜的肌力定量测量方法。

二、肌张力评定

肌张力 (muscle tone) 异常分肌张力弛缓、肌张力增高及肌张力障碍三种。对脑卒中患者而言,肌张力增高引起痉挛是其常见表现^[15]。等速肌力测试也可用于痉挛定量评定,相关研究表明其具有较好的信效度^[33],但和肌力评定一样存在耗时、设备体积大、成本高等不足。表面肌电图仪由于方便携带已逐步应用于临床,大量研究表明 H 反射的 Hmax/Mmax 比值可作为量化痉挛的有效指标^[34],能客观判断长期治疗效应,并且与改良 Ashworth 量表评分 (modified Ashworth scale, MAS) 具有显著相关性^[35]。有学者利用肌电及测角仪信号获得紧张性牵张反射阈值 (tonic stretch reflex threshold, TSRT),量化在零速度下发生反射反应的最小阈值,用于评定肌痉挛状态及治疗后的微小改变,可作为一种有效衡量肌张力的敏感指标^[36]。

此外 Chuang 等^[37]发现采用 Myoton-3 型快速肌肉检测系统评定恢复期脑卒中患者肱二头肌及肱三头肌肌张力具有较好的重测信度;考虑临床评定多是单关节评估,有研究者开发一款可同时定量评定多个关节肌张力的机器人系统,结果表明该系统能有效准确诊断脑卒中后肌张力损伤情况^[38]。上述研究表明肌张力定量评定设备可作为未来的一个研究方向,为肌张力定量评定提供了新思路。

三、针对功能性活动的评定

上肢及手的功能性活动是多关节参与的活动,临床较多通过研究与日常生活活动能力密切相关的够取、抓握及轨迹等三大类动作^[39],借以反映患者上肢及手功能性活动能力。现有研究主要利用 3D 运动捕捉系统、康复机器人及微型传感器等技术,近年来逐步发展出可针对功能活动定量评定的运动学分析方法,其中基于主动或被动标记的光电系统被视为人体运动学

分析的金标准,能较好地评定脑卒中后上肢损伤的运动性能及质量^[40]。运动学分析通过工具采集不同任务下与运动准确度、平滑度及轨迹^[41]相关的参数来定量评定患者上肢及手的功能性活动,相关研究表明运动准确度指标与临床量表结果具有显著相关性^[7]。

康复机器人是运动学分析常用的采集工具, Maria 等^[42]利用 Armeo® Spring 外骨骼机器人采集垂直捕获任务中 9 个运动学指标,结果表明手径比 (hand path ratio)、平均速度、速度分布峰速度可分别用来评定运动精确度、速度及平滑度,并与 WMFT 评分具有中度相关性,可有效评定脑卒中患者上肢功能,并能区分正常人和患者及同一 WMFT 水平患者在精确度、速度及平滑度上的差异。Tyryshkin 等^[12]采用一款 KINARM 外骨骼机器人设计一个击球实验,通过收集 154 例脑卒中患者运动学指标,发现可简单定量评定脑卒中患者上肢运动功能,且富有趣味性,患者依从性较好。Hussain 等^[44]研究同样表明,利用机器人执行相关任务获得的运动学指标,能为受试者功能性活动评定提供标准、有效、可靠及灵敏数据,但需大样本研究支持^[43]。此外机器人评定还可发现传统量表检测不出的微小差异。

除了运动学分析外,神经电生理学相关指标也被用于上肢及手功能性活动定量评定。Trujillo 等^[45]研究恢复期脑卒中患者经上肢机器人治疗后其脑电图变化,发现功率比指数能较好地预测上肢运动康复结局;Phadke 等^[46]研究发现正中神经 H 反射是定量评定运动功能恢复的可靠方法;也有研究者利用表面肌电图观察够物动作中肱三头肌与前三角肌协同表现情况,发现其与较差的肢体功能表现密切相关^[47]。国内罗春等^[48]通过研究脑卒中患者够物动作中运动学及表面肌电指标变化,发现能识别正常人与脑卒中患者功能表现差异。

上肢及手运动的灵巧性及协调性也是功能性活动的重要部分。Teremetz 等^[49]通过研发一款新的设备来定量评定与手灵巧度相关的重要指标,为手灵活度定量评定提供参考。也有研究者采用红外成像传感器测量手部多关节 ROM 来定量评定手部精细功能,发现其结果与上肢 Fugl-Meyer 评分 (Fugl-Meyer assessment, FMA) 具有高度相关性^[50]。上肢及手运动的灵巧性和协调性与脑卒中患者后期回归社会密切相关,因此定量评定也尤为重要,但现有这方面研究相对较少,未来需进一步加强。

结语

脑卒中后患者上肢及手功能恢复程度直接关系到患者能否生活自理、恢复工作及最终重返社会。当前临床多凭借体格检查及问卷评定或量表评测来评定脑卒中后上肢及手功能情况,但上述方法均具有一定局限性;准确而经济有效的定量评定方法可作为临床评定的补充,从而帮助康复医师及治疗师制订精准的治疗计划;而且不同客观定量评定方法除了弥补传统评定量表不足外,还可作为家庭康复评定的补充,如方便易携带的微型传感器可帮助医生远程定量评定患者功能,从而指导患者家庭康复,加强医生对患者的监控,节约双方时间成本。

需要指出的是,尽管客观定量评定方法较主观量表有较大优势,临床研究也证明其具有较好信效度,与传统量表结果相关性亦可,但仍有一些问题值得思考。目前临床研究采用的定量评定工具种类繁多,不同型号设备的评定结果存在差异;同时患者体位、选取的测量任务及测量指标均无统一标准,以致

不同研究缺乏可比性;而且大部分定量评定方法缺乏大样本多中心信效度研究支持;再诸如等速肌力测试仪、三维运动捕捉系统等还存在设备占地面积大、价格昂贵等不足。当然定量评定方法仍在不断完善和发展,同时不同评定方法也在取长补短,相互结合研发成综合的定量评定系统并尽快投入临床使用,这将是未来定量评定的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Feigin VL, Forouzanfar MH, Krishnamurthi R, et al. Global and regional burden of stroke during 1990-2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. *Lancet*, 2014, 383(9913): 245-254.
- [2] Wang Z, Hu S, Sang S, et al. Age-period-cohort analysis of stroke mortality in China [J]. *Stroke*, 2017, 48(2): 271-275. DOI: 10.1161/STROKEAHA.116.015031.
- [3] Persson HC, Parziali M, Danielsson A, et al. Outcome and upper extremity function within 72 hours after first occasion of stroke in an unselected population at a stroke unit [J]. *BMC Neurol*, 2012, 12(1): 162. DOI: 10.1186/1471-2377-12-162.
- [4] Langhorne P, Coupar F, Pollock A. Motor recovery after stroke: a systematic review [J]. *Lancet Neurol*, 2009, 8(8): 741-754. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(09\)70150-4](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(09)70150-4).
- [5] 贾杰. 脑卒中后手功能康复应评价和治疗并重 [J]. *上海医药*, 2014, 35(2): 6-9.
- [6] 吴媛媛, 闵瑜, 燕铁斌. Wolf 运动功能测量量表评定脑卒中急性期患者上肢功能的效度和信度研究 [J]. *中国康复医学杂志*, 2009, 24(11): 992-994. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2009.11.011.
- [7] Nordin N, Xie SQ, Wunsche B. Assessment of movement quality in robot-assisted upper limb rehabilitation after stroke: a review [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2014, 11: 137. DOI: 10.1186/1743-0003-11-137.
- [8] Lang CE, Bland MD, Bailey RR, et al. Assessment of upper extremity impairment, function, and activity after stroke: foundations for clinical decision making [J]. *J Hand Ther*, 2013, 26(2): 104-115. DOI: 10.1016/j.jht.2012.06.005.
- [9] Lundquist CB, Maribo T. The Fugl-Meyer assessment of the upper extremity: reliability, responsiveness and validity of the Danish version [J]. *Disabil Rehabil*, 2017, 39(9): 934-939. DOI: 10.3109/09638288.2016.1163422.
- [10] Page SJ, Levine P, Hade E. Psychometric properties and administration of the wrist/hand subscales of the Fugl-Meyer assessment in minimally impaired upper extremity hemiparesis in stroke [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2012, 93(12): 2373-2376. DOI: 10.1016/j.apmr.2012.06.017.
- [11] Hsueh IP, Hsu MJ, Sheu CF, et al. Psychometric comparisons of 2 versions of the Fugl-Meyer Motor Scale and 2 versions of the stroke rehabilitation assessment of movement [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2008, 22(6): 737-744. DOI: 10.1177/1545968308315999.
- [12] Tyryshkin K, Coderre AM, Glasgow JI, et al. A robotic object hitting task to quantify sensorimotor impairments in participants with stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2014, 11(1): 47. DOI: 10.1186/1743-0003-11-47.
- [13] Thompson-Butel AG, Lin G, Shiner CT, et al. Comparison of three tools to measure improvements in upper-limb function with poststroke therapy [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2015, 29(4): 341-348. DOI: 10.1177/1545968314547766.
- [14] Li HT, Huang JJ, Pan CW, et al. Inertial sensing based assessment methods to quantify the effectiveness of post-stroke rehabilitation [J]. *Sensors (Basel)*, 2015, 15(7): 16196-16209. DOI: 10.3390/s150716196.
- [15] 王玉龙. 康复功能评定学(供康复治疗专业用) [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008: 194-195.
- [16] Gajdosik RL, Bohannon RW. Clinical measurement of range of motion. Review of goniometry emphasizing reliability and validity [J]. *Phys Ther*, 1987, 67(12): 1867-1872.
- [17] Pham T, Pathirana P, Trinh H, et al. A non-contact measurement system for the range of motion of the hand [J]. *Sensors*, 2015, 15(8): 18315-18333. DOI: 10.3390/s150818315.
- [18] Huber ME, Seitz AL, Leeser M, et al. Validity and reliability of Kinect skeleton for measuring shoulder joint angles: a feasibility study [J]. *Physiotherapy*, 2015, 101(4): 389-393. DOI: 10.1016/j.physio.2015.02.002.
- [19] Lee WW, Yen S, Tay EB, et al. A smartphone-centric system for the range of motion assessment in stroke patients [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2014, 18(6): 1839-1847. DOI: 10.1109/JBHI.2014.2301449.
- [20] 陆雅婷, 陆小锋, 王聪, 等. 基于手功能评估系统的“腕背伸”动作定量评估 [J]. *电子测量技术*, 2017, 40(10): 127-133. DOI: CNKI: SUN: DZCL.0.2017-10-026.
- [21] 付江红, 陈树耿, 钱叶叶, 等. 多维视觉手功能康复定量评估系统在脑卒中患者手功能评估中的可行性研究 [J]. *中国康复理论与实践*, 2018, 24(12): 1380-1383. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2018.12.004.
- [22] Hawi N, Liodakis E, Musolli D, et al. Range of motion assessment of the shoulder and elbow joints using a motion sensing input device: a pilot study [J]. *Technol Health Care*, 2014, 22(2): 289-295. DOI: 10.3233/THC-140831.
- [23] Seo NJ, Fathi MF, Hur P, et al. Modifying Kinect placement to improve upper limb joint angle measurement accuracy [J]. *J Hand Ther*, 2016, 29(4): 465-473. DOI: 10.1016/j.jht.2016.06.010.
- [24] Chu H, Joo S, Kim J, et al. Validity and reliability of POM-Checker in measuring shoulder range of motion [J]. *Medicine*, 2018, 97(25): e11082. DOI: 10.1097/MD.00000000000011082.
- [25] Reither LR, Foreman MH, Migotsky N, et al. Upper extremity movement reliability and validity of the Kinect version 2 [J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2018, 13(1): 54-59. DOI: 10.1080/17483107.2016.1278473.
- [26] Counsell C, Dennis M, McDowall M, et al. Predicting outcome after acute and subacute stroke: development and validation of new prognostic models [J]. *Stroke*, 2002, 33(4): 1041-1047.
- [27] 刘根林, 李建军, 周红俊, 等. 肌力定量检查方法研究进展 [J]. *中国康复理论与实践*, 2017, 23(7): 766-769. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2017.07.005.
- [28] Kristensen OH, Stenager E, Dalgas U. Muscle strength and poststroke hemiplegia: a systematic review of muscle strength assessment and muscle strength impairment [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2017, 98(2): 368-380. DOI: 10.1016/j.apmr.2016.05.023.
- [29] Stark T, Walker B, Phillips JK, et al. Hand-held dynamometry correlation with the gold standard isokinetic dynamometry: a systematic review [J]. *PM&R*, 2011, 3(5): 472-479. DOI: 10.1016/j.pmrj.2010.10.025.
- [30] Feiring DC, Ellenbecker TS, Derscheid GL. Test-retest reliability of the biodex isokinetic dynamometer [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1990,

- 11(7):298-300.
- [31] Ekstrand E, Lexell J, Brog C. Isometric and isokinetic muscle strength in the upper extremity can be reliably measured in persons with chronic stroke[J]. *J Rehabil Med*, 2015, 47(8):706-713. DOI: 10.2340/16501977-1990.
 - [32] Ekstrand E, Lexell J, Brogardh C. Grip strength is a representative measure of muscle weakness in the upper extremity after stroke[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2016, 23(6):400-405. DOI: 10.1080/10749357.2016.1168591.
 - [33] Sunnerhagen KS, Olver J, Francisco GE. Assessing and treating functional impairment in poststroke spasticity[J]. *Neurology*, 2013, 80(3):35-44. DOI: 10.1212/WNL.0b013e3182764aa2.
 - [34] Caker T, Evcik FD, Subasi V, et al. Investigation of the H reflexes, F waves and sympathetic skin response with electromyography (EMG) in patients with stroke and the determination of the relationship with functional capacity[J]. *Acta Neurologica Belgica*, 2015, 115(3):295-301. DOI: 10.1007/s13760-014-0397-5.
 - [35] Pisano F, Miscio G, Del CC, et al. Quantitative measures of spasticity in post-stroke patients[J]. *Clin Neurophysiol*, 2000, 111(6):1015-1022. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(00\)00289-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(00)00289-3).
 - [36] Vieira D, Silva MB, Melo MC, et al. Effect of myofeedback on the threshold of the stretch reflex response of post-stroke spastic patients[J]. *Disabil Rehabil*, 2016, 39(5):458-467. DOI: 10.3109/09638288.2016.1146359.
 - [37] Chuang L, Wu C, Lin K, et al. Quantitative mechanical properties of the relaxed biceps and triceps brachii muscles in patients with subacute stroke: a reliability study of the myoton-3 myometer[J]. *Stroke Res Treat*, 2012, 2012:1-7. DOI: 10.1155/2012/617694.
 - [38] Zhang L, Son J, Park H, et al. Changes of shoulder, elbow, and wrist stiffness matrix post stroke[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2017, 25(7):844-851. DOI: 10.1109/TNSRE.2017.2707238.
 - [39] de Los Reyes-Guzmán A, Dimbwadyo-Terrer I, Trincado-Alonso F, et al. Quantitative assessment based on kinematic measures of functional impairments during upper extremity movements: a review[J]. *Clin Biomech*, 2014, 29(7):719-727. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2014.06.013.
 - [40] Alt MM, Murphy S, Persson HC, et al. Kinematic analysis using 3D motion capture of drinking task in people with and without upper-extremity impairments[J]. *J Vis Exp*, 2018:133. DOI: 10.3791/57228.
 - [41] Tran VD, Dario P, Mazzoleni S. Kinematic measures for upper limb robot-assisted therapy following stroke and correlations with clinical outcome measures: a review[J]. *Med Eng Phys*, 2018, 53(1):13-31. DOI: 10.1016/j.medengphy.2017.12.005.
 - [42] Longhi M, Merlo A, Prati P, et al. Instrumental indices for upper limb function assessment in stroke patients: a validation study[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2016, 13(1):52-68. DOI: 10.1186/s12984-016-0163-4.
 - [43] Gilliaux M, Lejeune T, Detrembleur C, et al. Using the robotic device REAplan as a valid, reliable, and sensitive tool to quantify upper limb impairments in stroke patients[J]. *J Rehabil Med*, 2014, 46(2):117-125. DOI: 10.2340/16501977-1245.
 - [44] Hussain A, Budhota A, Hughes CM, et al. Self-paced reaching after stroke: a quantitative assessment of longitudinal and directional sensitivity using the H-Man planar robot for upper limb neurorehabilitation[J]. *Front Neurosci*, 2016, 10:477. DOI: 10.3389/fnins.2016.00477.
 - [45] Trujillo P, Mastropietro A, Scano A, et al. Quantitative EEG for predicting upper limb motor recovery in chronic stroke robot-assisted rehabilitation[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2017, 25(7):1058-1067. DOI: 10.1109/TNSRE.2017.2678161.
 - [46] Phadke CP, Robertson CT, Condliffe EG, et al. Upper-extremity H-reflex measurement post-stroke: reliability and inter-limb differences[J]. *Clin Neurophysiol*, 2012, 123(8):1606-1615. DOI: 10.1016/j.clinph.2011.12.012.
 - [47] Kisiel-Sajewicz K, Fang Y, Hrovat K, et al. Weakening of synergist muscle coupling during reaching movement in stroke patients[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2011, 25(4):359-368. DOI: 10.1177/1545968310388665.
 - [48] 罗春, 谢斌, 黄真, 等. 微型传感器运动捕获系统结合同步表面肌电对脑卒中偏瘫患者上肢够物功能的定量评估[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2017, 39(4):253-258. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2017.04.003.
 - [49] Teremetz M, Colle F, Hamdoun S, et al. A novel method for the quantification of key components of manual dexterity after stroke[J]. *Neuroeng Rehabil*, 2015, 12(1):64. DOI: 10.1186/s12984-015-0054-0.
 - [50] Fang Q, Mahmoud SS, Gu X, et al. A novel multistandard compliant hand function assessment method using an infrared imaging device[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2019, 23(2):758-765. DOI: 10.1109/JBHI.2018.2837380.

(修回日期:2019-04-03)

(本文编辑:易 浩)