

·综述·

预期性姿势调节重建卒中后高效运动的机制及方案

毛锐涛¹,李政超¹,马惠²,贾程森²

作者单位

1. 昆明医科大学第二附属医院康复医学科
昆明 650000
2. 四川大学华西医院康复医学科/康复医学四川省重点实验室
成都 610041
基金项目
四川省科技计划项目(No. 2018FZ0114)
收稿日期
2021-08-05
通讯作者
贾程森
jiachengseng
2005@163.com

摘要 脑卒中后上肢运动功能的康复是临床治疗的难点之一。良好的姿势控制和高效运动离不开预期性姿势调节(APAs)的作用,目前训练卒中后上肢功能的方法繁多,但较少关注整体姿势的控制。本文阐述了APAs在上肢运动功能训练中的重要性,并提出相应精细化进阶的训练方案,以期卒中患者恢复高效运动提供新思路。

关键词 脑卒中;姿势控制;预期性姿势调节;康复

中图分类号 R741;R493 **文献标识码** A **DOI** 10.16780/j.cnki.sjssgncj.20210731

本文引用格式:毛锐涛,李政超,马惠,贾程森. 预期性姿势调节重建卒中后高效运动的机制及方案[J]. 神经损伤与功能重建, 2023, 18(3): 166-168, 172.

Mechanism and Scheme of Anticipatory Postural Adjustments for Reconstruction of Post-stroke Efficient Movement MAO Rui-tao¹, LI Zheng-chao¹, MA Hu², JIA Cheng-sen². 1. The second affiliated hospital of Kunming medical university, Kunming, Yunnan 650000, China; 2. Rehabilitation Medicine Center, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

Abstract The rehabilitation of upper limb motor function after cerebral apoplexy is one of the difficulties in clinical treatment. Good postural control and efficient movement cannot be achieved without anticipatory postural adjustments (APAS). At present, there are many methods to train the upper limb function after stroke, but less attention is paid to the control of the overall posture. This paper expounds the importance of APAS in the training of upper limb motor function, and puts forward the corresponding refined and advanced training program, to provide a new idea for stroke patients to recover efficient exercise.

Keywords stroke; postural control; anticipatory postural adjustments; rehabilitation

任何体位或动作的维持和发生都离不开一系列的姿势控制,运动的整个过程即是姿势平衡被打破和重建的往复,而恢复平衡的能力也间接反映个体功能活动的独立程度与运动效率^[1,2]。高效运动依赖于优良的姿势控制,无论卧位、坐位还是站立等其它体位下,姿势的核心稳定性都是远端肢体可完成各种功能活动的必要保障^[3]。随着环境的改变,重力与支持面的关系也不断变化,基于个体所具备的力量和耐力,采用的平衡策略、运动模式以及任务需要的速度和准确性,神经系统通过脊髓回路对姿势张力进行调整的同时,身体的局部稳定肌(local stability muscle, LSM)、整体稳定肌(global stability muscle, GSM)及整体运动肌(global mobility muscle, GMM)也随之进行动态调控来实现平稳流畅的高效运动。高质量的运动包括实现最大的目标、最小的能耗及最短的时间,是一个涉及效率的复合性概念。Bobath理念认为,正常人所产生的运动与高质量的运动并不完全相同,也存在效率低下和一定的代偿。某些条件下,个体的运动模式能折射出各种后天因素的影子,如成长环境、教育与生活背景等。面对人体复杂的运动控制机制,认清功能活动中姿势控制的内涵对提高运动效率至关重要。本文紧密结合与预期性姿势调节(anticipatory postural adjustments, APAs)调节相关的中枢神经传导通路,重视运动中的整体反应及整体APAs调控对肢体局部运动表现的影响,更新以往

为导向的功能性训练观念,提出以任务为导向的姿势控制训练来提升卒中患者运动效率的思路。

1 APAs对运动表现的意义

1.1 参与APAs的重要生理结构

姿势控制贯穿于整个运动过程,包括运动前准备、对运动自扰的实时调整以及面对突发干扰时做出的反应,即前馈控制或APAs与反馈控制,APAs又分为预备性APAs(preparatory APAs, pAPAs)和伴随性APAs(accompanying APAs, aAPAs)^[4,5]。Stadler等^[6-8]研究发现,前运动皮质在运动开始前有双侧对称的预期电位出现,表明前运动皮质对即将发生的运动方式有预测作用,甚至参与运动方案的制定,即APAs神经调控。基底节可能参与APAs调控,多项对帕金森病的相关研究显示,一方面在患者手指快速屈曲时参与上肢稳定的肌群APAs表现异常,另一方面在站立或迈步阶段存在躯干和下肢相应稳定肌群的APAs异常^[9]。有研究者根据听神经的解剖位置,通过不同强度的听觉刺激观察其对步行起始时APAs的影响,证实脑桥延髓网状结构也与APAs调控相关^[10,11]。小脑具有调节肌张力,维持平衡与协调的作用。研究显示,小脑损伤后存在APAs调控但不能与整个运动过程相同步,应用经颅磁刺激抑制小脑后叶可改变肌肉的激活模式并增强肌群内的共同激活,预测小脑可能参与肌群内和肌群间的协调作

用以完善 APAs 的产生^[12,13]。

1.2 APAs 对高效运动的影响

人体习得运动的过程大致可被分为三个阶段,早期表现运动缓慢、动作不协调、耗时不定;中期的运动速度有所提高,运动感觉逐渐整合;末期运动迅速且高效,动作协调。最终,平稳流畅的运动模式离不开整个神经系统在不同环境下对姿势控制和运动感觉整合的调节,主导的感觉器官随着运动技能逐渐成熟,也由视觉转变为躯体感觉,其外显性离不开基于 APAs 调控下 LSM、GSM 及 GMM 与各关节之间精准的时序协调。发生于运动之前的 pAPAs 或伴随运动的 aAPAs 起着姿势定向及维持身体各节段稳定的重要作用,并根据重复运动的次数及得到的反馈信息反复修正^[14,15]。核心肌得以适时的激活可以获得高效的姿势稳定并助益于远端肢体的功能活动。Aruin 等^[16-18]发现,在健康人上肢外展时,可能出现与 APAs 不足相关的下肢非对称姿势。

2 脑卒中中 APAs 的影响

2.1 脑卒中后上肢异常运动模式的形成

脑卒中患者在功能活动中常显得刻板、不协调且能耗较高。造成此类异常运动模式的原因可大致归纳为以下两种:一是失去高级中枢神经调控后表现出的控制障碍;二是在异常姿势控制下日积月累形成的异常生物力学模式。正常情况下,运动启动和执行过程中的姿势控制接受多个不同传导通路的相互调控。例如,腹内侧下行系统主要包括前庭脊髓束和脑桥网状脊髓束,起到快速募集中轴或其他近端的肌肉以控制躯干姿势稳定并协调远端肢体动作的作用;皮质脊髓侧束和红核脊髓束属于背外侧下行系统,主要负责募集肢体远端肌群产生选择性运动的同时配合姿势控制。一项经颅磁刺激的相关研究显示,卒中后皮质脊髓束的损害减弱了上肢肌群间的协同性及姿势性张力产生的控制,同时引起健侧皮质运动投射的激活与增强,这种现象虽有助于保留患侧肢体近端的控制,也会诱发近端关节的异常运动,表现为肌肉募集效率低,姿势控制肌群与功能肌群间启动时序紊乱,产生不必要的肌肉收缩与关节活动^[19,20]。

痉挛是导致卒中后运动功能受限的主要原因之一。在 Bobath 的理论中,脑卒中后躯体抗重力肌群(上肢屈肌、下肢伸肌)的运动出现早、张力增高明显,如本体感觉、视觉、前庭觉等信息输入异常造成的错误认知也会形成不恰当的运动输出,在神经功能重塑的过程中优势运动单元与异常姿势相互作用形成新的模式(代偿模式)。上肢在进行够取任务时,肩胛胸壁关节的稳定是关键部分,除外肩袖肌群诸如斜方肌、前锯肌和肩胛提肌等需要在上肢运动之前募集激活,并在保持动态稳定的基础上提供一定的机动能力。卒中后 APAs 丧失,通常会利用躯干过度前屈、耸肩等异常模式来替代肘关节伸展和肩关节屈曲的不足^[21,22]。

2.2 APAs 缺失对上肢功能恢复的影响

双手抓握并操控物体以及感知环境等功能活动都离不开肩胛带、躯干甚至下肢的协调稳定作用。卒中后中枢神经系统

损伤引起患侧躯干及下肢的姿势性张力异常,导致坐位或立位时的不稳定而限制上肢远离躯干实现功能,长此以往便会阻碍上肢功能的恢复^[23,24]。研究证实,躯干浅层肌群的激活与肢体活动的方向具有相关性,可防止运动产生的自扰^[25-27]。处于水平面 T₂ ~ T₇ 之间的肩胛骨稳定与以 T₄ ~ T₈ 为主的上段胸椎周围精确的神经肌肉控制息息相关^[23]。例如,在站立位下肩胛骨关节盂面维持在偏向前上方、外侧的位置是盂肱关节的锁定机制之一,而这一空间位置的丢失也是偏瘫患者肩关节半脱位的原因之一。反复使用代偿性运动策略以及不恰当的功能训练致使正常的肩肘节律丢失,肩关节复合体周围肌群失衡,最终抑制患者重新获得正常的 APAs。APAs 的缺失势必在运动中诱发远端肢体各肌群的张力异常增高,阻碍肢体各个节段自身功能性活动的高效完成。

3 基于 APAs 机制的上肢功能训练方案

研究显示,在训练中给予即时反馈可使患者较多地专注于运动模式而非运动结果可改善运动表现^[28],而延时反馈则能减少外显指令的干扰从而获得运动时序更好的内隐学习^[29]。可见,恰当的反馈方式对促进患者的运动效率很重要,并贯穿整个运动学习的过程,例如在运动学习从中期向末期过渡的期间内过多与表现相关的即时反馈会对高效运动 APAs 的形成起负作用^[30]。同时,为了实现真实世界中上肢各种复杂精细运动的高效性,躯干及下肢各肌群复杂的 APAs 机制不可忽视^[31]。根据 APAs 机制对姿势控制的重要性以及实现高效运动的关键要素(平衡策略,运动模式,速度和准确性,力量和耐力),提供针对脑卒中患者上肢功能恢复的康复治疗思路,见图 1。

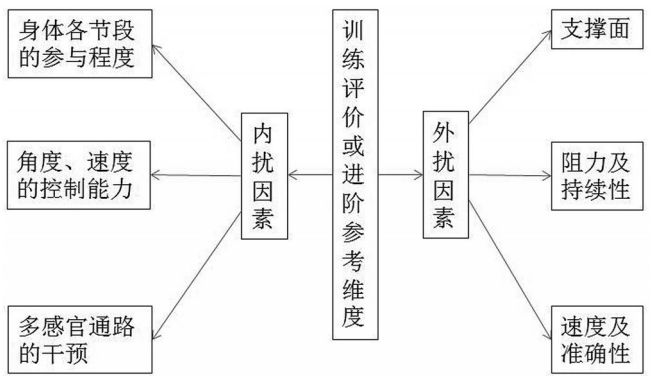


图1 针对脑卒中患者上肢功能恢复的康复治疗思路

在排除意识与认知的问题后,从客观评价运动效率的角度出发,兼顾评估疗效与细化训练进阶的思路三位一体,针对影响运动的因素大致分为内源性干扰因素和外源性干扰因素。从内源性干扰因素来看,但凡得不到有效支撑的身体节段在运动时都需要 APAs 的参与,即参与到运动中的肢体节段越多则运动中姿势控制难度越大;肌肉长度张力曲线显示不同的功能肌群与相应关节在特定角度可产生最大的内力矩,除特定角度以外的功能活动则需要更多的大脑皮质参与以更快更多地募集肌纤维以达到运动速度的要求或维持姿势稳定;身体接受外界信息的感官通路主要为本体觉、前庭觉与视觉,治疗时可对输入通路

进行单一干预或多种任务干预来调控皮质干预的强度。如前所述,APAs涉及多个脑神经结构。通过诸多研究已证实,在个体的运动模式发展成熟后,相关的神经环路中储存着一套完整的APAs程序,在特定的神经结构受损后继而表现出相应的APAs表现障碍,如激活障碍^[32]、激活时程延长^[8]、激活时序紊乱^[33,34]等。因此,即使是针对存在重度感觉缺失的卒中患者,也可以通过上述训练思路及手法的引导来激发后天习得的非意识性感觉信息,并获得有效的APAs。

就外源性干扰因素而言,可通过改变支撑面的质地、大小、与水平面夹角等因素,诱发启动身体自支撑端至功能端各节段的APAs以维持姿势稳定及运动轨迹的平顺;其次,在不同负荷及时长的任务中根据身体各节段LSM、GSM及GMM的高尔基腱器、肌梭等的反馈信息可不断促进APAs机制的完善;随着任务对速度和准确性需求的提高,外力所带来的重心迅速改变也增加了姿势控制的难度,调节以上干扰因素可促进完善高级运动技能的APAs机制。

4 总结

上肢功能的恢复是脑卒中患者及康复治疗师需要面临的挑战。一方面,在度过急性期后,人们在经济、医疗资源有限的前提下通常更注重移动功能的训练,以期尽快获得改变体位、居家转移的能力,使上肢功能的恢复错过了最佳时期;另一方面,双上肢能够远离身体实现功能都离不开肩胛胸壁关节、双侧躯干以及骨盆和下肢的协调配合,而卒中后对上述部位的影响又进一步阻碍了上肢功能的恢复。目前,国内外针对卒中后上肢功能训练的研究可谓五花八门,但多数情况还仅限于坐位下将患侧上肢置于支撑较好的状态进行训练,一旦离开外力的支撑,也并不能获得独立运动的功能,而且仍会影响整体活动的协调和平衡,与实际生活中所需的功能相差甚远。以APAs机制为出发点的训练思路强调了人体运动的整体观,符合真实世界的人体运动力学原理。以任务为导向根据运动技能所掌握的程度从以上两大影响因素入手,选择调节单一影响因素,或多种因素的联合调节可诱发适度适时的APAs机制,从而优化患者的运动模式,提高运动效率。

需要注意的是,是否需要避免大脑皮质过多参与以及给予反馈的方式应当取决于对运动技能所掌握的阶段。形成熟练的运动技能需要主动参与到与目标技能相关的重复练习中,对一系列的实践经验进行整合。在起始阶段,运动技能的学习需要更多注意力,外显学习与现实信息摄取及有意识的高级认知功能相关,真实生活场景中的目标导向性训练可直接影响大脑边缘系统,意识控制较少的内隐学习是运动技能的学习,例如调整运动方向、速度和启动时序,增强本体感觉输入提高自身感,均可诱发正确的APAs并促进高效运动的实现。基于该理论思路,本课题组已在临床康复治疗中进行实践并显示出较好疗效,后续研究可着重根据不同部位损伤后引起的功能障碍特点,提出并实践相应的针对性训练方式,促进脑卒中患者尽可能地恢复高效运动。

参考文献

[1] Gilfriche P, Deschodt-Arsac V, Blons E, et al. Frequency-Specific Fractal Analysis of Postural Control Accounts for Control Strategies[J]. Front Physiol, 2018, 9: 1566.

[2] Deprá PP, Amado A, van Emmerik REA. Postural Control Underlying Head Movements While Tracking Visual Targets[J]. Motor Control, 2019, 23: 365-383.

[3] 潘顺丹, 阮传亮. 脑卒中后姿势控制障碍的康复研究进展[J]. 神经损伤与功能重建, 2020, 15: 522-527.

[4] Piscitelli D, Falaki A, Solnik S, et al. Anticipatory postural adjustments and anticipatory synergy adjustments: preparing to a postural perturbation with predictable and unpredictable direction[J]. Exp Brain Res, 2017, 235: 713-730.

[5] Xie L, Wang J. Anticipatory and compensatory postural adjustments in response to loading perturbation of unknown magnitude[J]. Exp Brain Res, 2019, 237: 173-180.

[6] Stadler W, Schubotz RI, von Cramon DY, et al. Predicting and memorizing observed action: Differential premotor cortex involvement [J]. Hum Brain Mapp, 2011, 32: 677-687.

[7] Guo ZV, Li N, Huber D, et al. Flow of cortical activity underlying a tactile decision in mice[J]. Neuron, 2014, 81: 179-194.

[8] Li N, Daie K, Svoboda K, et al. Robust neuronal dynamics in premotor cortex during motor planning [J]. Nature, 2016, 532: 459-464.

[9] Bolzoni F, Esposti R, Marchese SM, et al. Disrupt of intra-limb APA pattern in Parkinsonian patients performing index-finger flexion[J]. Front Physiol, 2018, 9: 1745.

[10] Tan JL, Perera T, McGinley JL, et al. Neurophysiological analysis of the clinical pull test[J]. J Neurophysiol, 2018, 120: 2325-2333.

[11] Liang H, Kaewmanee T, Aruin AS. The role of an auditory cue in generating anticipatory postural adjustments in response to an external perturbation [J]. Exp Brain Res, 2020, 238: 631-641.

[12] Kelly G, Shanley J. Rehabilitation of ataxic gait following cerebellar lesions: Applying theory to practice[J]. Physiother Theory Pract, 2016, 32: 430-437.

[13] 陈意, 谢运娟, 高强. 预期性姿势调节的神经调控网络研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2020, 26: 568-571.

[14] 冯祺, 任杰. 平衡与动作控制中的预期性姿势调节[J]. 中国运动医学杂志, 2017, 36: 1017-1025.

[15] Bleuse S, Delval A, Defebvre L. Does overestimation of an object's mass during arm-raising modify postural adjustments?[J]. Neurosci Lett, 2014, 578: 12-16.

[16] Aruin AS. The effect of asymmetry of posture on anticipatory postural adjustments[J]. Neurosci Lett, 2006, 401: 150-153.

[17] 曾涵涓, 黄之峰, 林中秀, 等. 预期姿势调节对协作任务运动姿势控制的影响[J]. 广东工业大学学报, 2019, 36: 25-32.

[18] Smith JA, Ignasiak NK, Jacobs JV. Task-invariance and reliability of anticipatory postural adjustments in healthy young adults[J]. Gait Posture, 2020, 76: 396-402.

[19] Beer RF, Ellis MD, Holubar BG, et al. Impact of gravity loading on post-stroke reaching and its relationship to weakness [J]. Muscle Nerve, 2010, 36: 242-250.

[20] Li S, Francisco GE. New insights into the pathophysiology of post-stroke spasticity [J]. Front Hum Neurosci, 2015, 9: 192.

[21] Ng TH, Sowman PF, Brock J, et al. Neuromagnetic brain activity associated with anticipatory postural adjustments for bimanual load lifting [J]. Neuroimage, 2013, 66: 343-352.

[22] Silva CF, Pereira S, Silva CC, et al. Anticipatory postural adjustments in the shoulder girdle in the reach movement performed in standing by post-stroke subjects[J]. Somatosens Mot Res, 2018, 35: 124-130.

[23] Lee LJ, Coppieters MW, Hodges PW. Anticipatory postural adjustments to arm movement reveal complex control of paraspinal muscles in the thorax[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2009, 19: 46-54.

[24] Curuk E, Lee Y, Aruin AS. Individuals with stroke improve anticipatory postural adjustments after a single session of targeted exercises [J]. Hum Mov Sci, 2020, 69: 102559.

[25] Aimola E, Santello M, La Grua G, et al. Anticipatory postural adjustments in reach-to-grasp: Effect of object mass predictability[J].

期出现语言功能倒退,起病前语言发育正常,智力及听力正常,脑电图提示ESES,激素治疗后好转。排除儿童精神发育障碍性疾病、自身免疫相关性脑炎及脑结构性异常,临床诊断LKS明确,遗憾的是未能从基因层面进一步了解病因。LKS目前仍为罕见病,无大量临床标本研究,目前对于治疗的诊疗指南及专家共识都欠缺,因此为了对LKS进行更深入的研究,迫切需要一个大型、前瞻性、多中心的合作。

参考文献

[1] Landau WM, Kleffner FR. Syndrome of acquired aphasia with convulsive disorder in children[J]. *Neurology*, 1957, 7: 523-530.
 [2] Kaga M, Inagaki M, Ohta R. Epidemiological study of Landau-Kleffner syndrome (LKS) in Japan[J]. *Brain Dev*, 2014, 36: 284-286.
 [3] Yang X, Qian P, Xu X, et al. GRIN2A mutations in epilepsyaphasia spectrum disorders[J]. *Brain Dev*, 2018, 40: 205-210.
 [4] Conroy J, McGettigan PA, McCreary D, et al. Towards the identification of a genetic basis for Landau-Kleffner syndrome[J]. *Epilepsia*, 2014, 55: 858-865.
 [5] Husari KS, Dubey D. Autoimmune Epilepsy. *Neurotherapeutics*. 2019 Jul;16(3):685-702.
 [6] Granata T, Cross H, Theodore W, et al. Immune-mediated epilepsies [J]. *Epilepsia*, 2011, 52: 5-11.
 [7] Bakker DP, Catsman-Berrevoets CE, Neuteboom RF. Effectiveness of a hybrid corticosteroid treatment regimen on refractory childhood seizures and a review of other corticosteroid treatments[J]. *Eur J Paediatr Neurol*, 2015, 19: 553-560.
 [8] Van Bogaert P. Epileptic encephalopathy with continuous spike waves during slow-wave sleep including Landau-Kleffner syndrome[J]. *Handb Clin Neurol*, 2013, 111: 635-640.

[9] Pullens P, Pullens W, Blau V, et al. Evidence for normal letter-sound integration, but altered language pathways in a case of recovered Landau-Kleffner Syndrome[J]. *Brain Cogn*, 2015, 99: 32-45.
 [10] Muzio MR, Cascella M, Al Khalili Y. Landau Kleffner Syndrome. // StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2020.
 [11] Tuft M, Arva M, Bjornvold M, et al. Landau-Kleffner syndrome[J]. *Tidsskr Nor Laegeforen*, 2015, 135: 2061-2064.
 [12] Stefanatos GA, Wasserstein MJ. Acquired epileptiform aphasia: a dimensional view of Landau-Kleffner syndrome and the relation to regressive autistic spectrum disorders[J]. *Child Neuropsychol*, 2002, 8: 195-228.
 [13] Hughes JR. A review of the relationships between Landau-Kleffner syndrome, electrical status epilepticus during sleep, and continuous spike-waves during sleep[J]. *Epilepsy Behav*, 2011, 20: 247-253.
 [14] Veggioni P, Pera MC, Teutonico F, et al. Therapy of encephalopathy with status epilepticus during sleep (ESES/CSWS syndrome): an update [J]. *Epileptic Disord*. 2012, 14: 1-11.
 [15] Escobar Fernández L, Cocco G, Góngora A, Vázquez López M, et al. Patrón punta-onda continua en el sueño lento: nuestra experiencia durante 20 años [Continuous spike-waves during slow-wave sleep: Experience during 20 years] [J]. *An Pediatr (Barc)*, 2019, 91: 180-188.
 [16] Arts WF, Aarsen FK, Scheltens-de Boer M, et al. Landau-Kleffner syndrome and CSWS syndrome: treatment with intravenous immunoglobulins[J]. *Epilepsia*, 2009, 50: 55-58.
 [17] Fine A, Nickels K. Temporoparietal resection in a patient with Landau-Kleffner syndrome[J]. *Semin Pediatr Neurol*, 2014, 21: 96-100.
 [18] 潘岗. Landau-Kleffner综合征的预后特征及全基因组拷贝数变异的验证研[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
 [19] Caraballo RH, Cejas N, Chamorro N, et al. Landau-Kleffner syndrome: a study of 29 patients[J]. *Seizure*, 2014, 23: 98-104.
 [20] 潘岗, 周水珍. 预后不良Landau-Kleffner综合征5例的临床特征与治疗[J]. *中华实用儿科临床杂志*, 2015, 3: 857-859.

(本文编辑:王晶)

(上接第168页)

Neurosci Lett, 2011, 502: 84-88.
 [26] Tomita H, Fujiwara K, Mori E, et al. Effects of anticipation certainty on preparatory brain activity and anticipatory postural adjustments associated with voluntary unilateral arm movement while standing[J]. *Hum Mov Sci*, 2012, 31: 578-591.
 [27] Callegari B, Saunier G, Duarte MB, et al. Anticipatory Postural Adjustments and kinematic arm features when postural stability is manipulated[J]. *Peer J*, 2018, 6: e4309.
 [28] Widmer M, Held JP, Wittmann F, et al. Does motivation matter in upper-limb rehabilitation after stroke? ArmeoSenso-Reward: study protocol for a randomized controlled trial[J]. *Trials*, 2017, 18: 580.
 [29] Held JPO, Luft AR, Veerbeek JM. Encouragement-Induced Real-World Upper Limb Use after Stroke by a Tracking and Feedback Device: A Study Protocol for a Multi-Center, Assessor-Blinded, Randomized Controlled Trial[J]. *Front Neurol*, 2018, 9: 13.

[30] Ziebart C, MacDermid JC. Reflective Practice in Physical Therapy: A Scoping Review[J]. *Phys Ther*, 2019, 99: 1056-1068.
 [31] Chiou SY, Hurry M, Reed T, et al. Cortical contributions to anticipatory postural adjustments in the trunk[J]. *J Physiol*, 2018, 596: 1295-1306.
 [32] Delval A, Dujardin K, Tard C, et al. Anticipatory postural adjustments during step initiation: elicitation by auditory stimulation of differing intensities[J]. *Neuroscience*, 2012, 219: 166-174.
 [33] Richard A, Van Hamme A, Drevelle X, et al. Contribution of the supplementary motor area and the cerebellum to the anticipatory postural adjustments and execution phases of human gait initiation[J]. *Neuroscience*, 2017, 358: 181-189.
 [34] Gallea C, Ewencyk C, Degos B, et al. Pedunculopontine network dysfunction in Parkinson's disease with postural control and sleep disorders [J]. *Mov Disord*, 2017, 32: 693-704.

(本文编辑:王晶)