

预期性姿势调整在脑卒中步态康复中的应用及脑机制探索

冯婷怡^{1,2} 张立超¹ 李源莉^{3,4} 单春雷^{1,3,4}

¹上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院康复医学中心, 上海 200437; ²上海中医药大学岳阳临床医学院, 上海 200437; ³中医智能康复教育部工程研究中心, 上海 201203; ⁴上海中医药大学康复医学院, 上海 201203

通信作者: 单春雷, Email: shanchunlei@163.com

【摘要】 在步行等动作开始前的姿势控制调整称之为预期性姿势调整, 而脑卒中患者在步态启动前, 由于脑损伤导致的异常预期性姿势控制模式可能会激活本不该被激活的肌肉, 从而诱发异常步态。目前临床常见的步态训练更多注重患者行走时的下肢肌力、肌张力、关节活动度以及支撑摆动相比值等参数, 而鲜有针对步行前预期性姿势控制的临床干预。本文将针对步态启动前预期性姿势调整的相关概念、机制假说、治疗等方面进行简要总结, 以促进临床医师更多关注和利用预期性姿势调整提高脑卒中患者的步行能力。

【关键词】 脑卒中; 姿势控制; 步态异常; 预期性姿势调整

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81874035); 上海市优秀学术带头人项目 (19XD1403600); 上海市卫生健康委加快中医药事业发展三年行动计划项目 [ZY (2018-2020)-CCCX-2001-06/2004-05]; 上海市卫生健康委中西医结合康复诊疗提升项目 (ZY (2018-2020)-FWTX-8002); 上海市卫生健康委智慧医疗专项 (2018ZHYL0216)

Funding: National Natural Science Fund (81874035); Program of Shanghai Academic Research Leader (19XD1403600); Shanghai Health Commission accelerated the development of traditional Chinese medicine three-year action plan project [ZY (2018-2020)-CCCX-2001-06/2004-05]; Shanghai Health Commission's rehabilitation diagnosis and treatment promotion project of integrated traditional Chinese and Western medicine [ZY (2018-2020)-FWTX-8002]; Intelligent Medical Program of Shanghai Health Commission (2018ZHYL0216)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.09.017

研究显示, 2020 年我国 40 岁以上人群中脑卒中患者数量高达 1780 万, 2020 年新发卒中患者 340 万, 居世界首位, 且每年脑卒中发病率呈递增趋势^[1]。脑卒中引起的肌力减退、肌张力异常、关节挛缩等后遗症会导致步态异常, 从而增加患者跌倒风险, 给其日常生活带来极大不便。Belenkiy 等^[2]首次观察到, 受试者在站立并举起手臂过程中, 在原动肌 (即上肢主动肌) 激活前约 50~100 ms 期间, 首先被激活的肌肉是参与姿势控制的下肢肌肉, 该现象被称为预期性姿势调整 (anticipatory postural adjustments, APAs)。APAs 发生在由于运动引起的姿势干扰出现之前, 防止出现与运动表现相关的姿势及平衡干扰, 与前馈姿势控制及运动控制相关。目前通常将 APAs 分为两种^[3]: 在人体进行运动时具有预测性调整姿势的能力, 称之为准备性预期性姿势调整 (preparatory anticipatory postural adjustments, pAPA), 而在运动开始后随着动作变化需进一步进行重心位置及姿势的实时调整称为伴随性预期性姿势调整 (accompanying anticipatory postural adjustments, aAPA)。脑卒中功能脑区损伤除导致双侧下肢行动模式不对等外, 伴随的步态启动前异常的预期性姿势调整模式也会影响到卒中后步态。

脑卒中患者的预期性姿势调整模式

健康人在步态起始时, 步态启动-预期性姿势调整 (gait initiation-APA, GI-APA) 在矢状面的特点是压力中心 (center of pressure, COP) 位置相对于质量中心 (center of mass, COM) 位置

向后移动, 从而提供向前推进的初始动力。这种 COP 变化主要是由双侧比目鱼肌紧张导致的活动减少及胫骨前肌紧张引起。GI-APA 在冠状面的特点是 COP 向摆动腿移动, COM 向对侧移动。上述 COM 变化对于机体迈步时保持躯干稳定至关重要^[4]。有很多因素会影响步态中的 APAs, 例如年龄^[5]、体重^[6]、使用的鞋垫^[7]等。非急性期脑卒中患者步态主要存在 3 种模式的 APAs, 分别为单个 APA、APAs 缺失及多个 APAs (即持续性 APAs)^[8-9], 其中 APAs 缺失和多个 APAs 均会导致卒中后步态异常。Onuma 等^[10]发现与对照组比较, 当卒中患者患侧足或健侧足前移时, 很难将重心调整到站立侧, 患侧足 COP 后移峰值潜伏期明显延长, 导致运动启动延迟且推进不充分。Delafontaine 等^[11]研究表明, 脑卒中患者表现出胫前肌激活不充分, 与患侧比目鱼肌过度兴奋、COP 移位减少、重心移动不充分等因素有关; 同时脑卒中患者用患侧腿迈步时其胫前肌及臀中肌激活较健康人减弱, 导致平衡不稳, 故用健侧腿作迈步腿是一种相对较好的开步方法。与患侧 APAs 缺失相对的是, 当步行启动前健侧下肢由远端至近端激活时, 由于患侧下肢支撑力减弱, 身体重心多次且不充分向患侧移动而产生多次 APAs^[12]。对于该现象目前更倾向于认为, 健侧肢体启动时伴随的多次 APAs 作为患侧下肢支撑无力的代偿是一种适应性策略, 反而是患侧肢体 APAs 缺失表明肢体力量或运动控制不佳^[13]。

预期性姿势调整的相关脑机制

一、预期性姿势调整相关理论假说

传统观点认为,平衡控制的发生主要涉及脊髓和脑干组织^[14],但同时有越来越多证据表明大脑皮质及认知加工参与平衡控制的某些方面。早在 1992 年 Massion 等^[15]根据负责运动和姿势控制的脑区是否相同而提出了“分级控制”假说和“平行理论”假说,这也是目前关于 APAs 脑机制的两种主流假说。“分级”控制假说认为,运动皮质同时发出运动和抑制运动的姿势控制信号,在持续发送运动信号的同时,通过可能由不同递质介导的抑制性姿势控制信号来调控实际运动发生的时机。“平行”理论假说则认为,运动和姿势控制分别由不同的皮质区域负责,两条通路相互独立且负责姿势控制的脑区相对处于低位。Massion 等^[15]推测脑干及脊髓网状束参与平衡控制,而当实际运动产生时,大脑运动皮质会发送大量运动信号并对姿势控制通路产生交互抑制,促使靶肌产生主动运动。其后还有研究提出,存在另一些具有运动信息整合作用的脑区担负运动及姿势控制通路的“切换”,能通过全局抑制来避免运动过早释放,同时也会在适当时机向运动通路发送信号促使动作发生^[16]。

二、预期性姿势调整相关脑区

(一) 辅助运动区 (supplementary motor area, SMA)

SMA 是连接大脑皮质与脊髓的重要脑区,在脑卒中患者的姿势控制中具有重要作用^[17]。众所周知, SMA 参与整合触发步态的视觉、听觉及本体刺激^[18],规划行动路线和进行运动想象^[19]。Maki 等^[20]利用经颅磁刺激 (transcranial magnetic stimulation, TMS) 和双重任务训练发现受试者踝关节的早期 APAs 由大脑运动皮质控制,具体的平衡机制与视觉任务有关。而 SMA 作为额叶-顶叶信息整合的重要脑区,在整个 APAs 中均发挥关键作用。Solis 等^[21]进一步提出 SMA 是皮质-皮质下网络“自上而下”的抑制节点。

(二) 前运动皮质区 (premotor cortex, PMC)

根据相关研究报道, PMC 参与了与踏步步态相关的 APAs 神经递质的发放^[22-25]。Chang 等^[26]发现一侧 PMC 受损会导致卒中患者踏步步态时双侧胫骨前肌收缩潜伏期延长,表明一侧 PMC 能同时影响双侧肢体的 APAs。Yang 等^[27]采用经颅直流电刺激 (transcranial direct current stimulation, tDCS) 阴极刺激脑卒中患者病灶侧 PMC,发现患者躯干启动受累。上述研究均提示, PMC 可能同时涉及两条通路,第一条为 PMC-运动皮质 (包括 M1 区和其他辅助运动区)-皮质脊髓束-脊髓通路,该通路将运动信息汇总后并下行传导;第二条为 PMC-脊髓网状结构-脊髓通路,这是一条抑制通路,以防动作过早释放。而在卒中步态的姿势控制中, PMC 可能同时参与了迈步前支撑侧下肢及迈步侧下肢不同模式的 APAs^[28]。总之 PMC 是两条平行通路切换的关键靶点^[29],而非进行单纯的抑制调节。

(三) 其它脑区

Schepens 等^[30]通过研究猫的伸展姿势动作发现,脊髓网状神经元的激活与 APAs 产生密切相关。人体桥脑髓通过 SMA 与大脑运动皮质连接, Delval 等^[31]认为大脑在接受到相关感觉刺激后,脑皮质将信息整合并下传至延髓网状结构,激活预置的 APAs 程序,与 Naito 等^[18]提出的分级理论假说高度吻合。

另有学者发现,在运动发生前,肌肉未产生实际动作时可在顶叶、中央前回、中央后回、额中回的腹侧运动前区、基底神经节及丘脑等部位捕捉到脑电活动^[16]。Naito 等^[18]在其理论中早就提出 APAs 是综合了躯体对外部环境判断、自身位置感知等多方因素的结果,当视觉、前庭或本体感觉输入受到干扰时,机体本身的姿势控制模式将会发生改变。近期 Huang 等^[32]利用视觉对姿势控制的影响,采用激光照明器对脑卒中患者步态进行引导干预,促使患者步行对称性获得改善。综上, APAs 在实际运动未发生时将自身姿势调整成最适于发生运动的状态,为了处理运动和保持静止这一相互冲突的指令, APAs 发生与机体认知、感觉等脑功能区密切相关。

预期性姿势调整在临床治疗中的应用

一、物理治疗方法

临床上针对脑卒中患者平衡及步态的训练方法较多,但鲜见直接训练 APAs 的相关报道。Lee 等^[33]发现与传统有意识控制下的核心稳定性训练比较,动态神经肌肉稳定训练 (dynamic neuromuscular stabilization, DNS) 通过有序激活膈肌-多裂肌-盆底肌以及其他浅表的腹外斜肌、竖脊肌等核心肌群,能进一步调节呼吸及腹内压功能,从而有效改善 APAs。此外在常规核心稳定性训练及 DNS 干预期间,通过有经验的物理治疗师采用超声进行测量监测,可确保脑卒中患者膈肌及腹部核心肌群被正确激活。DNS 训练有助于改善患者膈肌运动,在吸气时能条件反射性激活腹横肌-腹内斜肌-盆底多裂肌运动链,从而改善前馈激活,实现动态平衡和躯干运动控制,有助于降低患者跌倒风险。

当前 Bobath 理论认为骨盆小范围的前后倾运动可改善多裂肌灵敏性,提高桥脑网状脊髓束对下部躯干的核心控制能力,激活 APAs 使双侧躯干活动功能增强^[34]。Curuk 等^[35-36]指导脑卒中患者推一个悬挂在天花板上的健身球,并在球返回时用手掌将其停止,该项训练包括快速、不连续肩部屈曲运动引起的自我扰动,以及由“摆锤”撞击引起的外部扰动。与训练前比较,患者经训练后发现其躯干及腿部肌肉均出现明显的早期 APAs 启动。Aloraini 等^[37]发现脑卒中患者在执行下肢踏台阶任务时,相较于内部动作关注目标 (focus of attention, FoA) 即对自身肢体的关注 (如对踏步步速及幅度的关注),外部 FoA (如对周围环境的关注) 对脑卒中患者 APAs 的改善作用更显著。综上,针对 APAs 训练的重点是核心控制,预防跌倒,使卒中患者能安全有效地完成步行动作。

二、常见非侵入性神经调控技术

包括 TMS、tDCS 等在内的非侵入性神经调控技术,可通过改变大脑皮质兴奋性产生持续、长时程的影响,从而调节大脑皮质代谢及电生理活动^[38],被广泛应用于神经系统疾病治疗中^[39-40]。Richard 等^[41]使用 TMS 对健康受试者 SMA 及小脑分别进行抑制性刺激,发现 SMA 被抑制时胫骨前肌及比目鱼肌收缩潜伏期缩短, APAs 减弱,步行启动速度加快。近期有研究对脑卒中患者在作业治疗时辅以 TMS 干预,发现干预后患者双侧 SMA 及 PMC 激活均明显增强,上肢运动功能也显著提高^[42]。上述研究为脑卒中患者步行时异常 APAs 的治疗靶点提供了参考资料。Coppens 等^[43]在减重跑台训练基础上采用 tDCS 阳极刺激患侧 SMA 治疗脑卒中患者,发现干预后患者步行能力明显

改善。Hasui 等^[44]在步行训练基础上采用 tDCS 刺激患侧 SMA 治疗脑卒中患者,发现 SMA 能通过调控 APAs 改善脑卒中患者异常步态。Yang 等^[45]以站立时伸展反应时间作为主要结局指标,发现 tDCS 阳极刺激脑卒中患者病灶侧运动皮质 M1 对 APAs 的改善作用优于 tDCS 阴极刺激运动前区 (premotor area, PMA),但 PMA 对 APAs 的作用可能并不是一个单纯的抑制靶点。综上,非侵入性神经调控治疗通过对脑卒中患者受损脑区靶点进行兴奋性/抑制性干预,促使患者在步行开始前、步行时产生双侧对称且匹配的脑激活,以改善其异常步态并降低跌倒风险。

结语

卒中后步态异常是影响患者日常生活活动的重要因素之一。目前国内研究多重点探讨脑卒中患者步行时各种参数指标变化,对 APAs 的关注较少^[46-47]。预期性姿势调整作为机体正常动作开始时的静态姿势调整,其缺失或异常将直接导致后续步态发生改变。目前针对 APAs 的干预手段较为缺乏,评定方式也未统一,且关于 APAs 的产生机制仍存在争议,相关研究更多集中在步行准备期的 pAPA,鲜见关于步行时 aAPA 的报道,故针对 APAs 还需开展更进一步的深入探讨。

参考文献

- [1] 《中国卒中中心报告 2020》编写组.《中国卒中中心报告 2020》概要[J].中国脑血管病杂志,2021,18(11):737-743.DOI:10.3969/j.issn.1672-5921.2021.11.001.
- [2] Belenkiy VE, Gurfinkel VS, Paltsev EI. On elements of control of voluntary movements[J]. Biofizika, 1967, 12: 135-141.
- [3] 古泽正道, 高桥幸治. Bobath 概念的理论与实践(基础篇)[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2019: 43-45.
- [4] Yiou E, Artico R, Teyssedre CA, et al. Anticipatory postural control of stability during gait initiation over obstacles of different height and distance made under reaction-time and self-initiated instructions[J]. Front Hum Neurosci, 2016, 10: 449. DOI: 10.3389/fnhum.2016.00449.
- [5] Kimijanova J, Bzdukova D, Hirjakova Z, et al. Age-related changes of the anticipatory postural adjustments during gait initiation preceded by vibration of lower leg muscles[J]. Front Hum Neurosci, 2021, 15: 771446. DOI: 10.3389/fnhum.2021.771446.
- [6] Qu X, Hu X, Tao D. Gait initiation differences between overweight and normal weight individuals[J]. Ergonomics, 2021, 64(8): 995-1001. DOI: 10.1080/00140139.2021.1896788.
- [7] Curuk E, Aruin AS. The effect of a textured insole on anticipatory postural adjustments[J]. Somatosens Mot Res, 2021, 38(3): 188-193. DOI: 10.1080/08990220.2021.1918659.
- [8] Genthon N, Rougier P, Gissot AS, et al. Contribution of each lower limb to upright standing in stroke patients[J]. Stroke, 2008, 39(6): 1793-1799. DOI: 10.1161/STROKEAHA.107.497701.
- [9] 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(2): 124-130. DOI: 10.1080/08990220.2018.1484354.
- [10] Onuma R, Masuda T, Hoshi F, et al. Measurements of the centre of pressure of individual legs reveal new characteristics of reduced anticipatory postural adjustments during gait initiation in patients with post-stroke hemiplegia[J]. J Rehabil Med, 2021, 53(7): jrm00211. DOI: 10.2340/16501977-2856.
- [11] Delafontaine A, Vialleron T, Hussein T, et al. Anticipatory postural adjustments during gait initiation in stroke patients[J]. Front Neurol, 2019, 10: 352. DOI: 10.3389/fneur.2019.00352.
- [12] Curuk E, Lee Y, Aruin AS. Individuals with stroke use asymmetrical anticipatory postural adjustments when counteracting external perturbations[J]. Motor Control, 2019, 23(4): 461-471. DOI: 10.1123/mc.2018-0083.
- [13] Rajachandrakumar R, Fraser JE, Schinkel IA, et al. Atypical anticipatory postural adjustments during gait initiation among individuals with sub-acute stroke[J]. Gait Posture, 2017, 52(1): 325-331. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2016.12.020.
- [14] Dietz V. Human neuronal control of automatic functional movements: interaction between central programs and afferent input[J]. Physiol Rev, 1992, 72(1): 33-69. DOI: 10.1152/physrev.1992.72.1.33.
- [15] Massion J. Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination[J]. Prog Neurobiol, 1992, 38(1): 35-56. DOI: 10.1016/0301-0082(92)90034-c.
- [16] Ng TH, Sowman PF, Brock J, et al. Premovement brain activity in a bi-manual load-lifting task[J]. Exp Brain Res, 2011, 208(2): 189-201. DOI: 10.1007/s00221-010-2470-5.
- [17] Fujimoto H, Mihara M, Hattori N, et al. Cortical changes underlying balance recovery in patients with hemiplegic stroke[J]. Neuroimage, 2014, 85(1): 547-554. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2013.05.014.
- [18] Naito E, Kinomura S, Geyer S, et al. Fast reaction to different sensory modalities activates common fields in the motor areas, but the anterior cingulate cortex is involved in the speed of reaction[J]. J Neurophys, 2000, 83(3): 1701-1709. DOI: 10.1152/jn.2000.83.3.1701.
- [19] Maruno N, Kaminaga T, Mikami M, et al. Activation of supplementary motor area during imaginary movement of phantom toes[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2000, 14(4): 345-349. DOI: 10.1177/154596830001400410.
- [20] Maki BE, McIlroy WE. Cognitive demands and cortical control of human balance-recovery reactions[J]. J Neural Transm, 2007, 114(10): 1279-1296. DOI: 10.1007/s00702-007-0764-y.
- [21] Solis ET, van der Cruysen J, de Kam D, et al. Cortical dynamics during preparation and execution of reactive balance responses with distinct postural demands[J]. Neuroimage, 2019, 188: 557-571. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2018.12.045.
- [22] Kurata K. Information processing for motor control in primate premotor cortex[J]. Behav Brain Res, 1994, 61(2): 135-142. DOI: 10.1016/0166-4328(94)90154-6.
- [23] Cisek P, Kalaska JF. Neural correlates of reaching decisions in dorsal premotor cortex: specification of multiple direction choices and final selection of action[J]. Neuron, 2005, 45(5): 801-814. DOI: 10.1016/j.neuron.2005.01.027.
- [24] Miyai I, Yagura H, Hatakenaka M, et al. Longitudinal optical imaging study for locomotor recovery after stroke[J]. Stroke, 2003, 34(12): 2866-2870. DOI: 10.1161/01.STR.0000100166.81077.8A.
- [25] Gerloff C, Corwell B, Chen R, et al. The role of the human motor cortex in the control of complex and simple finger movement sequences[J]. Brain, 1998, 121(9): 1695-1709. DOI: 10.1093/brain/121.9.1695.
- [26] Chang WH, Tang PF, Wang YH, et al. Role of the premotor cortex in leg selection and anticipatory postural adjustments associated with a

- rapid stepping task in patients with stroke[J]. *Gait Posture*, 2010, 32(4): 487-493. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2010.07.007.
- [27] Yang CL, Gad A, Creath RA, et al. Effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on posture, movement planning, and execution during standing voluntary reach following stroke[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 5. DOI: 10.1186/s12984-020-00799-8.
- [28] Massion J. Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination[J]. *Prog Neurobiol*, 1992, 38(1): 35-56. DOI: 10.1016/0301-0082(92)90034-c.
- [29] Cohen O, Sherman E, Zinger N, et al. Getting ready to move: transmitted information in the corticospinal pathway during preparation for movement[J]. *Curr Opin Neurobiol*, 2010, 20(6): 696-703. DOI: 10.1016/j.conb.2010.09.001.
- [30] Schepens B, Drew T. Independent and convergent signals from the pontomedullary reticular formation contribute to the control of posture and movement during reaching in the cat[J]. *J Neurophysiol*, 2004, 92(4): 2217-2238. DOI: 10.1152/jn.01189.2003.
- [31] 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. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2012.05.032.
- [32] Huang WY, Tuan SH, Li MH, et al. Efficacy of a novel walking assist device with auxiliary laser illuminator in stroke patients: a randomized control trial[J]. *J Formos Med Assoc*, 2022, 121(3): 592-603. DOI: 10.1016/j.jfma.2021.06.019.
- [33] Lee NG, You JSH, Yi CH, et al. Best core stabilization for anticipatory postural adjustment and falls in hemiparetic stroke[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2018, 99(11): 2168-2174. DOI: 10.1016/j.apmr.2018.01.027.
- [34] Diaz-Arribas MJ, Martin CP. Effectiveness of the Bobath concept in the treatment of stroke: a systematic review[J]. *Disabil Rehabil*, 2020, 42(12): 1636-1649. DOI: 10.1080/09638288.2019.1590865.
- [35] 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. DOI: 10.1016/j.humov.2019.102559.
- [36] Curuk E, Aruin AS. Perturbation-based training enhances anticipatory postural control in individuals with chronic stroke: a pilot study[J]. *Int J Rehabil Res*, 2022, 45(1): 72-78. DOI: 10.1097/MRR.0000000000000515.
- [37] Aloraini SM, Glazebrook CM, Pooyania S, et al. An external focus of attention compared to an internal focus of attention improves anticipatory postural adjustments among people post-stroke[J]. *Gait Posture*, 2020, 82: 100-105. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.08.133.
- [38] Lisanby SH, Luber B, Perera T, et al. Transcranial magnetic stimulation: applications in basic neuroscience and neuropsychopharmacology[J]. *Int J Neuropsychopharmacol*, 2000, 3(3): 259-273. DOI: 10.1017/S1461145700002005.
- [39] 徐高静, 吴毅. 康复治疗新技术对脑卒中后脑可塑性影响的研究进展[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, 41(2): 150-153. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.02.018.
- [40] Brunoni AR, Nitsche MA, Bolognini N, et al. Clinical research with transcranial direct current stimulation (tDCS): challenges and future directions[J]. *Brain Stimul*, 2012, 5(3): 175-195. DOI: 10.1016/j.brs.2011.03.002.
- [41] Richard A, Van HA, 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. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2017.06.047.
- [42] Wann PR, Ryo U, Karunaratna S, et al. Evaluation of fMRI activation in hemiparetic stroke patients after rehabilitation with low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation and intensive occupational therapy[J]. *Int J Neurosci*, 2021, 15: 1-9. DOI: 10.1080/00207454.2021.1968858.
- [43] Coppens MJ, Staring WH, Nonnekens J, et al. Offline effects of transcranial direct current stimulation on reaction times of lower extremity movements in people after stroke: a pilot cross-over study[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1): 136. DOI: 10.1186/s12984-019-0604-y.
- [44] Hasui N, Mizuta N, Taguchi J, et al. Effects of transcranial direct current stimulation over the supplementary motor area combined with walking on the intramuscular coherence of the tibialis anterior in a subacute post-stroke patient: a single-case study[J]. *Brain Sci*, 2022, 12(5): 540. DOI: 10.3390/brainsci12050540.
- [45] Yang CL, Gad A, Creath RA, et al. Effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on posture, movement planning, and execution during standing voluntary reach following stroke[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 5. DOI: 10.1186/s12984-020-00799-8.
- [46] 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(5): 568-571. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2020.05.015.
- [47] 尹群辉, 张皓. 脑卒中偏瘫患者预期性姿势调节的研究进展[J]. *中国康复理论与实践*, 2017, 23(11): 1250-1253. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2017.11.003.

(修回日期: 2022-12-27)

(本文编辑: 易 浩)