

- [30] Krewer C, Rieß K, Bergmann J, et al. Immediate effectiveness of single-session therapeutic interventions in pusher behaviour[J]. *Gait Posture*, 2013, 37(2): 246—250.
- [31] Oppenländer K, Utz KS, Reinhart S, et al. Subliminal galvanic-vestibular stimulation recalibrates the distorted visual and tactile subjective vertical in right-sided stroke[J]. *Neuropsychologia*, 2015, 74: 178—183.
- [32] Stamenova V, Jennings JM, Cook SP, et al. Repetition-lag memory training is feasible in patients with chronic stroke, including those with memory problems[J]. *Brain Inj*, 2017, 31(1): 57—67.
- [33] Wilkinson D, Zubko O, Degutis J, et al. Improvement of a figure copying deficit during subsensory galvanic vestibular stimulation[J]. *J Neuropsychol*, 2010, 4(Pt 1): 107—118.
- [34] Hilliard D, Passow S, Thurm F, et al. Noisy galvanic vestibular stimulation modulates spatial memory in young healthy adults[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 9310.
- [35] Gensberger KD, Kaufmann AK, Dietrich H, et al. Galvanic vestibular stimulation: cellular substrates and response patterns of neurons in the vestibulo-ocular network[J]. *J Neurosci*, 2016, 36(35): 9097—9110.
- [36] Ionov ID, Pushinskaya II, Gorev NP, et al. Cyclo-oxygenase-2-induced catalepsy in aged rats: specific change of brain c-Fos protein expression in the lateral entorhinal cortex[J]. *Brain Res Bull*, 2020, 159: 79—86.
- [37] Holstein GR, Friedrich VL Jr, Martinelli GP. Glutamate and GABA in vestibulo-sympathetic pathway neurons[J]. *Front Neuroanat*, 2016, 10: 7.
- [38] Keywan A, Wuehr M, Pradhan C, et al. Noisy galvanic stimulation improves roll-tilt vestibular perception in healthy subjects[J]. *Front Neurol*, 2018, 9: 83.
- [39] Wuehr M, Boerner JC, Pradhan C, et al. Stochastic resonance in the human vestibular system-noise-induced facilitation of vestibulospinal reflexes[J]. *Brain Stimul*, 2018, 11(2): 261—263.
- [40] Samoudi G, Nissbrandt H, Dutia MB, et al. Noisy galvanic vestibular stimulation promotes GABA release in the substantia nigra and improves locomotion in hemiparkinsonian rats[J]. *PLoS One*, 2012, 7(1): e29308.
- [41] Shaabani M, Lotfi Y, Karimian SM, et al. Short-term galvanic vestibular stimulation promotes functional recovery and neurogenesis in unilaterally labyrinthectomized rats[J]. *Brain Res*, 2016, 1648(Pt A): 152—162.
- [42] Lobel E, Kleine JF, Bihan DL, et al. Functional MRI of galvanic vestibular stimulation[J]. *J Neurophysiol*, 1998, 80(5): 2699—2709.
- [43] Helmchen C, Machner B, Rother M, et al. Effects of galvanic vestibular stimulation on resting state brain activity in patients with bilateral vestibulopathy[J]. *Hum Brain Mapp*, 2020, 41(9): 2527—2547.
- [44] 吴杰, 赵智勇, 唐朝正, 等. 基于独立成分分析的脑卒中感觉运动网络功能连接异常的研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2017, 32(6): 607—612.
- [45] Helmchen C, Rother M, Spliethoff P, et al. Increased brain responsivity to galvanic vestibular stimulation in bilateral vestibular failure[J]. *Neuroimage Clin*, 2019, 24: 101942.
- [46] Macaudo G, Moisa M, Mast FW, et al. Shared neural mechanisms between imagined and perceived egocentric motion: a combined GVS and fMRI study[J]. *Cortex*, 2019, 119: 20—32.
- [47] Cai J, Lee S, Ba F, et al. Galvanic vestibular stimulation (GVS) augments deficient pedunculopontine nucleus (PPN) connectivity in mild Parkinson's disease: fMRI effects of different stimuli[J]. *Front Neurosci*, 2018, 12: 101.
- [48] Becker-Bense S, Willoch F, Stephan T, et al. Direct comparison of activation maps during galvanic vestibular stimulation: a hybrid H2[15 O] PET-BOLD MRI activation study[J]. *PLoS One*, 2020, 15(5): e0233262.
- [49] 周波, 杨皖菁, 王勇, 等. 前庭电刺激在前庭周围性疾病的临床应用效果分析[J]. *医学研究杂志*, 2015, 44(11): 81—84.

· 综述 ·

基于功能性近红外光谱技术探索脑卒中恢复期患者障碍躲避的皮层调控机制的研究进展*

毛佳燕¹ 邱纪方^{1,2,3}

脑卒中是一种极为常见的高死亡率、高致残率疾病^[1-2], 对人类的生命健康造成了极大的威胁。随着康复医学的介入, 越来越多脑卒中后患者重获了基础步行能力。由此, 障

碍躲避成为一项更具挑战性的关卡, 它关系到脑卒中患者病后生活质量的高低。然而目前在临床上, 关于障碍躲避能力皮层调控机制的研究很少。近年来, 功能性近红外光谱技术

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.03.022

*基金项目: 2021年浙江省卫生健康科技计划面上项目(2021KY959)

1 浙江中医药大学第三临床医学院, 康复医学院, 浙江省杭州市, 310053; 2 浙江康复医疗中心(浙江中医药大学附属康复医院); 3 通讯作者
第一作者简介: 毛佳燕, 女, 硕士研究生; 收稿日期: 2021-09-09

(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)的发展为这个问题的解决提供了合适的工具。本文对fNIRS在探索脑卒中恢复期患者障碍躲避的相关皮层调控情况的研究进展进行综述。

1 fNIRS的原理

fNIRS是一项近十年兴起的脑功能成像技术。众所周知,局部脑区的激活伴随着局部脑血流量和局部脑氧代谢率的增加,最终表现为局部氧合血红蛋白(oxygenated hemoglobin, oxy-Hb)和总血红蛋白(total hemoglobin, t-Hb)浓度的增加,以及脱氧血红蛋白(deoxyhemoglobin, deoxy-Hb)浓度的减少。其中,oxy-Hb浓度是fNIRS测量中最敏感的局部脑血流量变化指标^[3-4]。由于oxy-Hb、deoxy-Hb对近红外光的吸收系数不同,fNIRS可以通过计算其探头收集到的不同光强,把数据转换为代表距头皮深度约2—3cm内的相关脑区皮层血管中oxy-Hb和deoxy-Hb的浓度,从而反映出相应脑区的激活情况,最后再将测量结果以图像的形式直观地显示出来^[5-6]。

过去常见的用于脑功能检测的技术包括了脑电图、功能磁共振技术、正电子发射断层成像等。这些技术各有其优缺点,与它们相比,fNIRS具有安全无创、允许长时程检测、便携性强、对身体和运动的约束较小、对oxy-Hb的浓度变化的敏感性高且成像清晰、噪音小、数据处理简便等优点,并且其价格也相对较低廉^[5,7]。

目前fNIRS在医学上已经有了广泛的应用,包括对于各类神经系统相关性疾病的机制探索、临床诊断、定位、评估及治疗等^[5,8-10]。

2 脑卒中后患者的功能障碍及其障碍躲避能力

2.1 脑卒中后患者的功能障碍

相关研究显示,70%—80%的脑卒中患者会遗留有不同程度的功能障碍,引起机体感觉功能减退、平衡能力降低,还有偏瘫等运动障碍的问题,从而增加了跌倒的风险^[11]。跌倒也因此成为脑卒中后恢复期患者最常发生的不良事件之一,其发生率高达30%—50%^[12]。

2.2 脑卒中后患者的障碍躲避能力

脑卒中后患者的跌倒事件,极易发生在躲避障碍的过程中,给患者造成极为严重的后果,对恢复期患者的日常生活造成了相当大的隐患^[13]。为此,脑卒中恢复期患者的障碍躲避能力是一项值得我们关注的康复指标。障碍躲避能力,顾名思义,是指个体在运动行进的过程中,通过自身各种功能的调节配合,来避开障碍物的能力。它对个体多个方面的能力都具有较高的要求,也是保障个体日常安全活动的必要条件之一。目前已经有研究证实了避障训练结合其他适应性

训练的康复治疗的有效性^[14],但仍需更多更加科学的试验来辅证^[13]。

3 影响障碍躲避的因素

障碍躲避能力涉及许多因素,例如认知功能、平衡功能、步态的控制、步行能力、视觉—运动转换、注意力等。步态的控制又包括了对步长、步速、步宽等的调控^[15]。其中,认知功能又可以通过对平衡与步态的调控影响避障能力。

3.1 认知与障碍躲避

众所周知,大脑认知功能对避障能力有重要影响,而它常常在对平衡与步态的调控方面发挥着一定作用。Goto^[16]的一项试验令218例受试者在感应脚板上保持静态直立姿势,分别在睁眼及闭眼情况下测量其压力中心的移动轨迹。最终发现,男性受试者睁眼或闭眼时压力中心移动的轨迹长度与MMSE评分呈显著负相关,而在女性中无显著关联。但这或许与这项研究中男性受试者的MMSE评分明显低于女性受试者有关,这也表明认知功能或许在平衡的调控方面起着一定的作用。Pieruccini-Faria等^[17]令有轻度认知障碍的老年人与正常对照组分别执行单纯行走和障碍躲避任务,结果发现在避障前,两组间的步态表现出明显差异,认知障碍组的步态调整较对照组减少,为此我们认为认知功能在步态的调整方面也起到了某些作用。由此可见,高级认知功能的缺陷可能会限制障碍躲避能力,这也是一个潜在的跌倒风险因素。Sakurai^[18]的试验计算了避障时后肢廓清高度(前肢廓清高度与后肢廓清高度:分别指先行下肢与跟随下肢跨越障碍物正上方时,趾尖至障碍物顶部的垂直距离)的衰减程度,并且结合认知测试的结果,最终发现有认知障碍的受试者,尤其是在认知测试的即时回忆部分得分较低的人,其后肢廓清高度相对较小,衰减程度更高。因此我们认为,记忆功能可能通过控制后肢的运动,从而确保避障运动的安全性。

另外,Smulders^[19]的双任务试验表明脑卒中后患者在步行与障碍躲避过程中为了保证不跌倒,常常会采用“姿势优先策略”,即在认知任务与避障任务同时进行,他们会首先保证机体的运动安全,这就意味着脑卒中后患者需要比健康人更加全神贯注才能完成相同难度的任务。这也表明障碍躲避对大脑的认知功能(注意力)也有着一定的要求。

3.2 平衡与障碍躲避

有研究表明,平衡功能在脑卒中后患者的避障过程中起到了很大的作用^[13,20]。一项初步研究显示,在脑卒中后患者中,几乎有一半试图跨越障碍的失败是由于无法保持姿势平衡所导致的^[21]。Said^[20]的团队对12例脑卒中后患者和12例健康人进行了相关研究,他们让受试者以舒适的速度跨过障碍物,同时获取步速、步长、质心(centre of mass, COM)、压力中心(centre of pressure, COP)等相关测试指标。最终得

出结论:相较于对照组的健康人,脑卒中后患者在试验中,COM和COP的前后分离增大,这或许造成了避障的不稳定性;同时他们在跨越障碍物前后的步长会相对缩短,这也可能增加了他们在运动过程中失去平衡的风险,而通过降低步速并保持COM靠近支撑足跟部,可以将避障对平衡的威胁最小化。在国内,陈娜^[22]的团队曾选取了12例脑卒中幸存者及12例健康人,令受试者以舒适的速度沿着走道行走(中途设有障碍物),同时获取其COM和COP。分析发现:①在前肢和后肢廓清(跨越障碍物正上方)时,脑卒中组所测得的COM速度小于健康对照组,因此可以增加运动的稳定性,更好地控制躯体运动,降低失去平衡的风险;②在先行肢的支撑相,脑卒中组的COM-COP前后距离明显小于健康对照组,由此可见,缩短COM-COP前后距离也有助于提高稳定性;③越障前和越障后两个阶段的双支撑相时,脑卒中组的最大COM横向运动速度明显大于健康对照组,这或许与脑卒中后患者的平衡功能降低有关。另外,也有研究证实在接受基于外部干扰的平衡训练后,原本极易发生跌倒的群体(包括健康老年人、脑卒中后患者、帕金森病患者等)的跌倒发生率显著降低,尤其是在障碍躲避的过程中^[23]。这也表明了平衡训练有助于提升障碍躲避能力。

3.3 步态与障碍躲避

Geerse等^[24]招募了30例脑卒中患者、30例帕金森病患者以及30例健康人,在不同步行条件下对他们进行了步态适应性评估。最终发现有潜在跌倒风险的患者(脑卒中患者及帕金森病患者)相比于健康受试者而言,在难度较高的步态适应性任务(例如避障、急停、转弯等)中的表现总体较差,他们的行走速度较健康组更为缓慢,且总体步幅也比正常受试者小。另一项研究^[25]选取了137例老年人,根据过去12个月内的跌倒发生情况分为易跌倒组和非跌倒组,受试者在无障碍和有障碍条件下分别进行步态评估。定义变异系数(coefficient variation, CV): $CV = (\text{步长的标准差} / \text{步长的平均值}) \times 100$ 或 $(\text{时间的标准差} / \text{时间的平均值}) \times 100$,发现与无障碍条件相比,两组在接近障碍物时表现出了更高的步态变异性,且易跌倒组的CV高于非跌倒组。此外, Schulz^[26]选取了28例不同年龄段的健康受试者,分组后分别执行单纯步行及步行结合避障任务,发现在避障时,受试者的步行速度明显减慢,其认为障碍躲避主要是通过调节步宽的大小来实现的,其次也可通过调节步长等方式来实现。由此,我们认为障碍躲避能力与步态的调控密切相关。为了防止在避障过程中跌倒,调整足的位置即调控步态,是调节和恢复步态稳定性的常用策略之一^[27]。

3.4 其他因素

患者对于自我步行能力的评估对社区步行参与度有着很大的影响,从而对避障能力的恢复也起到一定的作用,这

也得到了相关研究的佐证^[28]。McVea等^[29]的基础试验还告诉我们,视觉输入信号可以与身体正在进行的运动相关的信号相结合,从而影响人类和动物的运动控制,例如执行避障动作等。

4 fNIRS在探索障碍躲避皮层调控机制中的应用

4.1 fNIRS在探索平衡控制机制中的应用

Mihara等^[30]使用fNIRS测量了脑卒中偏瘫患者在不可预测的外部扰动(运动平台快速向前和向后平移)时大脑的皮质激活情况,发现脑卒中偏瘫患者的包括前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)、运动前皮质(premotor cortex, PMC)、辅助运动区(supplementary motor area, SMA)在内的广泛皮层网络对个体的动态姿势控制至关重要。之后Fujimoto^[31]又与Mihara原先的团队对20例皮质下脑卒中急性期的患者进行了研究,分别在他们康复治疗的前后,通过fNIRS技术评估了运动平台前后平移相关的外部姿势干扰运动(具体试验方法同上)引起的皮质激活,最终发现健侧SMA姿势扰动相关的含氧血红蛋白的增加与Berg平衡量表(Berg balance scale, BBS)测得的平衡功能增益显著相关。这证明了SMA在姿势平衡的控制中起到了重要作用。由此,我们认为PFC、PMC、SMA在脑卒中恢复期患者的动态姿势控制方面起到相当重要的作用,尤其是健侧的SMA对于外部的姿势扰动至关重要。George等^[32]也用fNIRS研究了与年龄相关的站立平衡的皮层控制的变化。他们发现在年龄较大的参与者中,PFC的激活最初随着站立平衡难度的增加而增加,但随后在更困难的双任务(连续减3)平衡条件下,由于较高的皮质负荷,PFC的激活反而开始减少。与年轻组相比,这种减少还伴随有姿势摇摆面积的相对增加。其结论是PFC可以在保持站立平衡方面发挥积极作用,并且这种参与的性质不是静态的,而是可以通过单侧或双侧皮层的调控来实现的;其次,平衡的控制或许与大脑皮层的总负荷容量相关。对此,我们推测,PFC作为认知相关皮层,在调控姿势平衡方面发挥了重要的作用,但与此同时,它还存在一个激活峰值,一旦皮层的“工作负荷”超过这个值,其激活程度反而开始减少。此外,Karim等^[33]让受试者在佩戴fNIRS设备的同时进行一款模拟滑雪游戏,而后他们又以更困难的模式(更长的路线以及更多的障碍)再次进行试验,由此来探索平衡与前庭功能的相关性,最终发现颞上回(superior temporal gyrus, STG)的激活与平衡功能密切相关,并且与优势手同侧的STG的激活程度受到平衡任务难度的调节。综上所述,大脑皮层不同的功能区,例如PFC、PMC、SMA及STG,在静态和动态平衡控制方面起到了或多或少的作用,且其调控机制还与健/患侧及大脑优势半球有关。

4.2 fNIRS在探索步态调控机制中的应用

Holtzer等^[34]利用fNIRS评估了一群老年人在执行不同运动任务时oxy-Hb的变化,发现双任务(步行的同时执行背诵任务)条件下,受试者双侧PFC相比在单纯行走或单纯认知干扰任务条件下显著激活。同时,对比行走的步幅及步速,其结论是:在双任务时,PFC中氧合水平的增加与步幅的增加和认知活动的提升有关,但与步行速度的增加无关。由此可见,行走步长的改变会导致PFC的激活。此外,他们还认为,单纯行走时氧合水平的初始高度先升高后下降,且任务结束时的氧合水平较初始水平更低,这表明在调节期内,步态会变得更加自动化,即单纯行走更有可能是由大脑皮层以下低位中枢机制调控的。相比之下,双任务的氧合水平升高在整个任务中保持一致,这表明完成需要注意力的运动任务需要持续的认知活动来支持。对此,我们推测,障碍躲避作为一项对注意力水平有着相当高要求的运动任务,在执行该任务时,PFC的激活也应当始终维持在一个较高的水平。国内也有人使用fNIRS对行走及步态调整与脑区激活间的相关性进行研究^[35],他们招募了30例健康人,随机分成2组,佩戴便携式fNIRS先后执行自发的步长调整以及步速调整的任务,最终发现PMC、SMA以及PFC的血红蛋白浓度变化速率在有步速增加的调整意图时有显著差异,即步速增加的调整意图与PMC、SMA和PFC的调控相关。同时,他们还发现PMC和SMA与步速减小的调整意图有关,且PMC还与步长增减的调整意图也密切相关。由此推测,当被试者执行障碍躲避任务时,随着步速、步长的调整,PMC、SMA以及PFC在其步态改变的节点应当表现出显著的激活状态。

4.3 fNIRS在探索障碍躲避机制中的应用

Maidan等^[36]选取了20例健康青年在障碍跑道上行走,同时设置了不同高度的可预知和不可预知的障碍物。使用fNIRS测量PFC的激活情况,发现不同高度的障碍物引起的PFC激活程度不具有显著性差异。然而,与可预知的障碍物相比,在躲避不可预知的障碍物时,PFC的激活与跨越障碍后前足的距离相关。受试者往往将前脚放在障碍后更远的位置,这种策略也被证明可以降低跌倒风险,并且在障碍躲避期间可以检测到更高的oxy-Hb峰值。因此他们认为PFC激活的模式取决于障碍物的性质。更具体地说,健康年轻人在进行不可预知的避障运动时,PFC的激活相比可预知的避障运动要更快更广泛。然而随着年龄的增长和疾病的产生,其激活效率(oxy-Hb的增加速度和幅度)可能会受到限制,这可能也解释了该人群跌倒高风险的原因。这些结果也证明了PFC的重要作用,以及这可能表明特定的前额叶激活模式有助于更好地执行障碍躲避策略。Chen M等^[37]聚焦于健康老年人群,他们令受试者执行相关步行及避障任务,发现步行结合避障任务后,PFC的激活较没有避障任务时显著增强。Orcioli-Silva D团队^[38]在帕金森病患者中也进行了相关

的研究,他们令不同帕金森病亚型的受试者分别以舒适的步行速度执行单纯行走以及避障任务,最终发现,不同帕金森病亚型在行走过程中的皮层活动是不同的,例如姿势不稳/步态障碍型(postural instability/gait disorder,PIGD)患者执行任务时需要更多地激活认知相关皮层,即在两种行走条件下,PIGD患者较震颤为主型(tremor dominate,TD)患者表现出更强的PFC活性,而TD患者在避障过程中在运动区域呈现更广泛的皮层调节。在有障碍物的环境中行走还需要激活其他相关的皮层区域,例如运动皮层、感觉运动皮层和视觉皮层等。这也表明脑区的调控机制十分复杂,即使是同一疾病的不同亚型,其激活的脑区也存在差异。综上可见,目前国内外已有一些应用fNIRS对障碍躲避的机制进行探索的研究,然而他们将目光聚焦于健康人群,现在还少有人对脑卒中患者的障碍躲避机制展开研究。

5 小结

目前国内外有人探索过障碍躲避与平衡功能、步态调控的关系,也有人研究了单纯平衡功能或步态调控与脑区激活之间的关系,我们认为PFC、PMC、SMA同时与平衡和步态的调控相关。具体来说,在平衡调控方面,以上三个区域都有一定作用,其中,健侧的SMA对姿势平衡的控制有重要影响;PFC在保持站立平衡方面发挥积极作用,并且其激活的程度或许与大脑皮层的总负荷容量相关。在步态控制方面,PFC的激活与步幅的增加和认知活动的提升有关,但与步行速度的增加无关,且在完成对注意力有要求的运动任务时,PFC会产生持续的激活;而PMC、SMA和PFC在步态改变的节点会产生不同的激活。此外,相比可预知的避障运动,在不可预知的避障运动中,PFC的激活要更快更大。并且,在不同人群中,各个脑区的激活情况也存在很大差异。不过目前针对脑卒中恢复期患者的避障障碍与大脑皮层激活相关性的研究并不多,仍需更多的研究来证实。我们相信,如果fNIRS在探索障碍躲避的皮层调控方面的作用能得到充分展现,技术更加完善熟练,那么对于今后评估康复干预治疗的效果,提高脑卒中恢复期患者的安全运动能力,提升他们的生活质量将会有重大意义。利用fNIRS测得的大脑皮层的血红蛋白浓度,或许能作为脑卒中恢复期患者障碍躲避能力恢复的生物标志物之一。

参考文献

- [1] 蒋爱敏. 中国心血管健康与疾病报告(2019)节选二:脑血管病[J]. 心脑血管病防治, 2020, 20(6): 544—552.
- [2] 王亚楠, 吴思缈, 刘鸣. 中国脑卒中15年变化趋势和特点[J]. 华西医学, 2021, 36(6): 803—807.
- [3] Fox PT, Raichle ME. Focal physiological uncoupling of cerebral blood flow and oxidative metabolism during somatosensory stimulation in human subjects [J]. Proc Natl Acad

- Sci USA, 1986, 83(4): 1140—1144.
- [4] Hoshi Y. Hemodynamic signals in fNIRS [J]. Prog Brain Res, 2016, 225: 153—179.
 - [5] 陈丽敏, 胡洋, 姜晓晗, 等. 近红外光谱分析技术在神经内科中的临床应用与新进展 [J]. 中风与神经疾病杂志, 2016, 33(11): 1045—1047.
 - [6] Menant JC, Maidan I, Alcock L, et al. A consensus guide to using functional near-infrared spectroscopy in posture and gait research [J]. Gait Posture, 2020, 82: 254—265.
 - [7] 吴毅. 功能性近红外光谱技术在脑卒中患者康复中的临床应用 [J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(11): 1281—1283.
 - [8] 曹朝霞, 张彦峰, 韩雅迪, 等. 功能性近红外光谱成像技术在脑功能成像中的应用研究进展 [J]. 甘肃中医药大学学报, 2018, 35(3): 99—103.
 - [9] Rahman MA, Siddik AB, Ghosh TK, et al. A Narrative Review on Clinical Applications of fNIRS [J]. J Digit Imaging, 2020, 33(5): 1167—1184.
 - [10] Mihara M, Yagura H, Hatakenaka M, et al. Clinical application of functional near-infrared spectroscopy in rehabilitation medicine[J]. Brain Nerve, 2010, 62(2): 125—132.
 - [11] 白利明, 李新平, 邱卓英, 等. 运用世界卫生组织残疾评定量表2.0评估老年脑卒中患者整体功能状态 [J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(9): 1000—1003.
 - [12] 刘华, 李茜茜, 霍云云, 等. 情景模拟式安全教育预防脑卒中患者跌倒的效果 [J]. 中国医药导报, 2014, 11(16): 139—142.
 - [13] Muroi D, Ohtera S, Kataoka Y, et al. Obstacle avoidance training for individuals with stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. BMJ Open, 2019, 9(12): e028873.
 - [14] Wevers L, Port I van de, Vermue M, et al. Effects of task-oriented circuit class training on walking competency after stroke: a systematic review [J]. Stroke, 2009, 40(7): 2450—2459.
 - [15] Liu YC, Yang YR, Tsai YA, et al. Cognitive and motor dual task gait training improve dual task gait performance after stroke: A randomized controlled pilot trial [J]. Sci Rep, 2017, 7(1): 4070.
 - [16] Goto S, Sasaki A, Takahashi I, et al. Relationship between cognitive function and balance in a community-dwelling population in Japan [J]. Acta Otolaryngol, 2018, 138(5): 471—474.
 - [17] Pieruccini-Faria F, Sarquis-Adamson Y, MMontero-Odasso. Mild cognitive impairment affects obstacle negotiation in older adults: Results from "Gait and Brain Study" [J]. Gerontology, 2019, 65(2): 164—173.
 - [18] Sakurai R, Kodama K, Ozawa Y, et al. Association of age-related cognitive and obstacle avoidance performances [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 12552.
 - [19] Smulders K, Swigchem R van, Swart BJ de, et al. Community-dwelling people with chronic stroke need disproportionate attention while walking and negotiating obstacles [J]. Gait Posture, 2012, 36(1): 127—132.
 - [20] Said CM, Goldie PA, Patla AE, et al. Balance during obstacle crossing following stroke [J]. Gait Posture, 2008, 27(1): 23—30.
 - [21] Said CM, Goldie PA, Patla AE, et al. Obstacle crossing in subjects with stroke [J]. Arch Phys Med Rehabil, 1999, 80(9): 1054—1059.
 - [22] Chen N, Xiao X, Hu H, et al. Identify the alteration of balance control and risk of falling in stroke survivors during obstacle crossing based on kinematic analysis [J]. Front Neurol, 2019, 10: 813.
 - [23] Gerards MHG, McCrum C, Mansfield A, et al. Perturbation-based balance training for falls reduction among older adults: Current evidence and implications for clinical practice[J]. Geriatr Gerontol Int, 2017, 17(12): 2294—2303.
 - [24] Geerse DJ, Roerdink M, Marinus J, et al. Walking adaptability for targeted fall-risk assessments[J]. Gait Posture, 2019, 70: 203—210.
 - [25] Pieruccini-Faria F, Montero-Odasso M. Obstacle negotiation, gait variability, and risk of falling: results from the "Gait and Brain Study" [J]. J Gerontol A Biol Sci Med Sci, 2019, 74(9): 1422—1428.
 - [26] Schulz BW. Healthy younger and older adults control foot placement to avoid small obstacles during gait primarily by modulating step width[J]. J Neuroeng Rehabil 2012, 9: 69.
 - [27] Hoogkamer W, Potocanac Z, Duysens J. Quick foot placement adjustments during gait: direction matters[J]. Exp Brain Res, 2015, 233(12): 3349—3357.
 - [28] Robinson CA, Shumway-Cook A, Ciol MA, et al. Participation in community walking following stroke: subjective versus objective measures and the impact of personal factors [J]. Phys Ther, 2011, 91(12): 1865—1876.
 - [29] McVea DA, Pearson KG. Object avoidance during locomotion [J]. Adv Exp Med Biol, 2009, 629: 293—315.
 - [30] Mihara M, Miyai I, Hattori N, et al. Cortical control of postural balance in patients with hemiplegic stroke [J]. Neuroreport, 2012, 23(5): 314—319.
 - [31] Fujimoto H, Mihara M, Hattori N, et al. Cortical changes underlying balance recovery in patients with hemiplegic stroke [J]. Neuroimage, 2014, 85 (Pt 1): 547—554.
 - [32] George RJ St, Hinder MR, Puri R, et al. Functional near-infrared spectroscopy reveals the compensatory potential of pre-frontal cortical activity for standing balance in young and older adults[J]. Neuroscience, 2020, 452: 208—218.
 - [33] Karim H, Schmidt B, Dart D, et al. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) of brain function during active balancing using a video game system [J]. Gait Posture, 2012, 35(3): 367—372.
 - [34] Holtzer R, Mahoney JR, Izzetoglu M, et al. Online fronto-cortical control of simple and attention-demanding locomotion in humans [J]. Neuroimage, 2015, 112: 152—159.
 - [35] 徐嘉诚. 基于大脑血红蛋白信息的行走及步态调整意图识别方法研究[D]. 苏州大学, 2019.
 - [36] Maidan I, Shustak S, Sharon T, et al. Prefrontal cortex activation during obstacle negotiation: What's the effect size and timing? [J]. Brain Cogn, 2018, 122: 45—51.
 - [37] Chen M, Pilleme S, England S, et al. Neural correlates of obstacle negotiation in older adults: An fNIRS study [J]. Gait Posture, 2017, 58: 130—135.
 - [38] Orcioli-Silva D, Vitorio R, Beretta VS, et al. Is cortical activation during walking different between Parkinson's disease motor subtypes?[J]. J Gerontol A Biol Sci Med Sci, 2021, 76(4): 561—567.