

虚拟现实技术在卒中后上肢康复中的应用现状及可能机制

邹鸿雁^a, 白定群^b, 杨力凝^b, 柏若男^a, 肖明朝^c

【关键词】 脑卒中; 虚拟现实; 上肢; 康复

【中图分类号】 R49; R743.3 【DOI】 10.3870/zgkf.2024.02.010

脑卒中是我国成年人致死和致残的首位原因^[1]。研究表明,约85%的早期卒中患者存在上肢功能障碍^[2],超过50%的卒中患者存在上肢功能永久性的损伤,显著影响了患者的日常生活活动^[3],因此改善卒中后上肢功能至关重要。传统的上肢康复治疗通常耗时久且患者依从率低,结果常取决于治疗师的经验和能力,不足以诱导功能障碍肢体基于神经可塑性的运动改善^[4]。虚拟现实(virtual reality, VR)的兴起和应用为卒中后运动康复提供了一种新颖的有前途的方式。与传统康复相比,VR能实现强化、高度重复、以任务为导向的训练^[5],诱导大脑皮层的重组和神经可塑性^[6];同时,具有挑战性的虚拟训练任务及即时的训练反馈为参与的患者带来了更愉快的体验,能充分调动患者的主观能动性^[7]。本文综述了VR在卒中后上肢运动功能恢复中可能的作用机制、VR的特点和VR单独及与其他康复技术联合在脑卒中上肢康复中的应用的现状、有效性及存在的不足,推动VR在上肢康复治疗中的发展。

1 VR的作用机制

目前,VR在卒中后上肢康复中的作用机制尚不明确,其机制可能包括:①改善大脑半球间兴奋抑制的平衡:健康人两侧大脑半球存在交互性半球间抑制,并达到双侧半球兴奋和抑制相对平衡的状态^[8]。在发生脑卒中后,大脑半球间兴奋抑制失衡,使患侧大脑的兴奋性降低,健侧大脑皮质活动增强,同时,健侧对患侧的高抑制使患侧皮质兴奋性受限^[9],这种现象和患者

的上肢功能障碍严重程度之间呈正相关性^[10]。VR通过促进感觉运动皮层激活从对病灶区域或双侧区域向同病灶区域转移,来重新调整半球间相互抑制的作用^[11]。②增强不同功能区域之间的连通性:卒中引起的运动相关区域的损伤可能会破坏同侧初级运动皮层(the primary motor cortex, M1)和其他区域之间的半球内和半球间的连接,导致上肢运动功能障碍^[6]。VR干预能增强同侧M1和其他区域间的连接,诱导大脑皮层重组。Mekbib等^[12]的研究表明经过2周的VR训练,双侧M1的连接得到了增强。③额叶皮质区域的激活增加:Orihuela等^[13]在基于上肢VR康复治疗期间对患者进行功能磁共振成像神经扫描,结果发现前额叶皮层激活,且患者表现出显著的上肢功能改善。④镜像神经元系统的参与:镜像神经元(Mirror neurons, MNs)是指大脑中的一组神经元,当患者想象或观察四肢的动作时,这些神经元可能会被激活^[14]。研究表明激活MNs可以帮助恢复上肢运动功能^[14]。患者在虚拟环境中进行运动观察和模拟时,可以激活大脑区域的MNs,从而促进上肢功能的恢复^[15-16]。

2 VR的特点

作为一种计算机生成的模拟技术,VR可以创建丰富的虚拟环境,让患者执行特定任务的训练,并为患者提供多模态的感官反馈,以增强功能恢复。VR包括沉浸、想象和互动三个特点^[17]。根据沉浸程度VR可分为非沉浸式VR和沉浸式VR:非沉浸式VR是一种基于台式计算机、视频游戏机或平面屏幕的3D图形系统,通过键盘和鼠标等输入设备使用户与计算机进行互动^[18]。与沉浸式VR相比,非沉浸式VR成本更低,复杂性更低,培训更容易适应^[19]。沉浸式VR是患者通过使用大屏幕投影或头戴式显示器创建沉浸感,使用户的视觉完全被包裹^[18]。在沉浸式VR中,患者大多使用控制器、操纵杆或动作捕捉摄像头等输入设备与虚拟环境进行交互^[18]。与非沉浸式VR相

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC2005900);重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2020jscx-cylhX0002)

收稿日期:2023-02-06

作者单位:重庆医科大学附属第一医院 a. 护理部, b. 康复医学科, c. 泌尿外科, 重庆 400016

作者简介:邹鸿雁(1997-),女,硕士研究生,主要从事康复护理及患者安全方面的研究。

通讯作者:肖明朝,201606@hospital.cqmu.edu.cn

比,沉浸式VR提供了更强的沉浸感,其安全、可控的模拟环境更有利于患者进行复杂技能的练习^[20]。

3 VR单独在卒中后上肢运动功能障碍中的应用

VR提供的虚拟现实训练可以改善脑卒中患者的上肢运动功能。李毅等^[21]的meta分析纳入了31篇随机对照研究发现,与时间剂量匹配的常规康复训练相比,VR训练对于脑卒中上肢运动功能的恢复更优,特别是当使用沉浸式虚拟环境或VR与常规康复训练结合应用时。Song等^[22]将沉浸式VR应用于脑卒中的双侧手臂训练中,其研究表明,慢性卒中患者进行持续4周,每周5次的基于VR的沉浸式双侧手臂训练后,上肢运动功能有所改善。VR辅助训练可以提高日常活动的独立性。Chen等^[23]的Meta分析纳入了42项随机对照研究发现由于VR支持的运动疗法可以帮助患者改善上肢运动功能,使患者更积极地参与日常生活活动,因此VR支持的运动疗法可以提高日常活动的独立性;同时也发现,VR支持的运动疗法与传统康复疗法相结合可以提高手部灵活性。Choi等^[24]让亚急性卒中患者接受持续4周,共20次的基于商业游戏的VR运动治疗,使患者的上肢功能和日常生活活动能力得到了改善。VR辅助训练可以缓解上肢疼痛,Anwar等^[25]开展的VR干预研究发现,愉快而多彩的虚拟环境可以转移患者的注意力,让患者沉浸其中,帮助其减少焦虑,促进积极情绪,缓解疼痛。目前,由于大多数研究干预持续时间较短,缺乏干预后的长期随访,因此,VR的长期益处未得到证明,未来还需要开展更多高质量的研究进一步明确VR在脑卒中上肢康复中的长期疗效。

4 VR联合其他康复技术在卒中后上肢运动功能障碍中的应用

4.1 镜像治疗 镜像疗法(mirror therapy, MT)是在健侧手和患侧手之间放一面镜子,通过镜子中健侧手的运动让患者产生运动错觉,认为患侧手在运动的一种治疗方法^[26]。MT增加了大脑同侧M1区域的兴奋性^[27]。但其要求患者产生视错觉才能达到治疗效果,仅通过镜子里的影像无法让患者产生更好的视错觉^[28],因此有研究人员改变传统的MT,将其与VR相结合,从而增强MT的参与感及真实感^[29-30]。Kang等^[29]招募了18名健康的受试者和18名卒中后偏瘫患者进行研究,对所有受试者使用包括放松,MT和基于VR的MT在内的3种不同的任务,随后在非优势或受累上肢的桡屈肌中记录经颅磁刺激的运动诱发电位,结果表明基于VR的MT能够激活镜像神经

元系统和同侧病变运动皮层的视错觉,促进皮质脊髓兴奋性,更有利于促进卒中患者的上肢康复。Choi等^[30]进行了一项随机对照研究,患者通过基于VR的游戏完成手部运动,每天训练15次,持续30min。结果表明基于VR的MT组比常规镜像治疗组和常规作业治疗组在上肢运动功能中显示出更多的改善。随着VR的出现,MT不再依靠传统的平面镜为患者提供视觉反馈,而将简单的动作转化为功能性任务,为患者提供更有意义、更引人入胜的治疗。但目前国内对于此类研究开展并不多,未来的研究应该加大力度探索VR-MT作为常规治疗辅助手段的效果。

4.2 上肢康复机器人 上肢康复机器人能够为患者提供高重复、高精度、适应性和可量化的功能训练^[31]。但单独使用机器人进行重复的训练会让卒中患者感觉单一、无趣,不足以帮助患者长时间集中注意力以获得最大益处。将VR整合到机器人辅助训练中,通过信息反馈、任务导向来促进患者积极参与,从而更好地促进运动学习,提升患者在实际生活中的功能性表现^[32]。Abd等^[32]发现机器人介导的VR游戏训练允许卒中患者在互动环境中重复上肢活动,使患者练习控制他们预期的运动模式,促进抗痉挛肌肉运动神经元的募集,从而更大地减少上肢肌肉痉挛;同时,机器人介导的VR游戏训练能够满足患者运动所需的空间和时间,允许患者向不同方向移动他们的上肢关节,从而增加上肢运动范围。姜荣荣等^[33]将40例脑卒中患者随机分成了上肢康复机器人辅助VR游戏训练组和常规作业治疗组,并通过2周的干预后发现上肢康复机器人辅助VR游戏训练组的Fugl-Meyer评定量表上肢部分(Fugl-Meyer assessment-upper extremities, FMA-UE)、动作活动记录量表(motor activity log, MAL)评分均明显高于对照组,且在随访时训练组的日常生活活动能力(modified barthel index, MBI)评分显著高于对照组。VR与上肢康复机器人相结合,作用互补,既可以提供视听觉、运动及感觉反馈,帮助患者获得即时的反馈信息,机器人的外骨骼式机械手臂也可以给予偏瘫侧上肢适量的支撑,增加其本体感觉输入,纠正异常的运动模式,使患者在丰富的虚拟环境中完成精准的运动训练^[33]。但目前基于VR的上肢康复机器人临床康复有效性的证据缺乏,还需要未来开展更多的研究来证明。

4.3 脑机接口 脑机接口技术(brain-computer interface, BCI)是近年来快速发展的一种康复治疗方法,它在不依赖周围神经或肌肉的情况下将大脑活动产生的信号转换成控制信号,并利用这些信号来控制外部设备,从而在中枢神经与外周神经系统之间形成

“闭环通路”,并保证其完整性^[34-35]。于2016年Vourvopoulos等^[36]首次将其与VR合并。目前VR在脑机接口技术中的应用主要有2个,一是用于系统的视觉反馈,患者通过VR反馈可对自身训练状态进行调整;二是用于游戏娱乐,患者利用脑电控制VR游戏中的目标,在激发患者积极性的同时有效促进神经重塑。徐森威等^[38]设计的新型上肢康复系统包括BCI子系统和VR子系统,拥有2种训练方式和4种训练场景,允许患者在虚拟场景中锻炼手臂屈伸和抓握等功能^[37]。徐森威等^[38]用该系统进行了VR与3D动画效果对比研究,发现利用VR进行视觉反馈更能激发患者的运动想象积极性,不容易产生疲劳,符合长期康复训练的要求。高诺等^[39]设计的基于脑机接口与VR的手部软康复系统利用VR技术开发了四个康复游戏模块,分别是:书房虚拟环境、台球游戏、砍树游戏和探索游戏来帮助患者完成手部康复任务,结果表明在VR环境下进行脑机接口康复训练的患者相对应脑区的活动比单纯进行脑机接口康复训练的患者表现得更为活跃。与简单的BCI系统相比,BCI-VR系统不需要太多的外部设备用于康复环境,VR可以通过创建三维空间的虚拟场景,更加直观的激发患者产生脑电信号^[36]。但BCI系统中的脑电信号很弱,容易受到外部干扰,尤其是当患者在虚拟场景中进行大量运动时,脑电信号会受到外界环境的极大干扰,导致脑电反馈的准确性和稳定性不佳^[40],因此,还需要未来的技术和研究实时提高BCI-VR系统中脑电信号的预处理性能,从而提高脑电信号反馈的精确性和稳定性。

4.4 远程康复 基于VR的远程康复不仅为卒中患者提供以任务为导向的康复训练,增加患者康复训练的动机和愿望^[41],同时保证了治疗时间和地点的灵活性,最大限度地减少了传统住院治疗带来的负担,提高康复效率和满意度^[42]。Qiu等^[43]设计了一款经济实惠的远程康复系统HoVRS,该系统不仅可以与患者与治疗师进行视频通话,还可以接受来自虚拟治疗师的实时反馈和鼓励,通过后台的监测根据受试者的表现动态改变游戏的难度级别,从而限制训练中的挫败感。Holden等^[44]对11名卒中患者开展了基于虚拟环境的远程康复,治疗师通过互联网技术、虚拟环境软件和运动检测系统对患者运动后生成的数据进行分析,并远程调整患者康复训练项目的难度,经过4个月的锻炼后,FMA-UE和Wolf上肢运动功能测试(wolf motor function test, WMFT)得分均有提高。远程康复将VR技术带入到患者熟悉的环境下进行锻炼,增加患者的社会互动和与他人交往的能力,改善患者的情绪,降低抑郁的风险^[44]。但基于VR的远程康复系

统对患者要求高,需要患者掌握系统使用的相关知识,这对于脑卒中老年人来说难度太大。因此,实施远程康复的医疗保健提供者和系统设计者在系统开发前应考虑患者的年龄、对培训的要求及技术偏好,设计卒中老年人个性化的VR远程康复系统,并加强系统使用知识的培训和宣传。

4.5 非侵入性脑刺激 非侵入性脑刺激(non-invasive brain stimulation, NIBS)包括经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)和经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)两种方法,分别通过使用线圈或盐水浸泡电极向头皮施加磁场或低强度电流来调节皮质兴奋性^[45]。当应用于M1时,它可能产生神经可塑性和运动学习效应^[46]。Kim^[47]等的研究发现,tDCS与VR联合具有协同效应,短期皮质脊髓促进作用优于单独应用VR训练或单独应用tDCS。郑灿娟等^[48]将低频重复经颅磁刺激和VR训练相结合用于亚急性脑卒中上肢功能的康复,持续4周,共24d的治疗,发现两者联合可有效改善亚急性脑卒中后偏瘫患者的上肢功能、生活活动和生活质量。VR与NIBS的联合存在协同效应,VR辅助康复有助于卒中患者更好地获得运动技能,促进大脑运动皮层的重组^[47];NIBS辅助康复有助于调节神经可塑性^[49]。但其联合应用并不成熟,如何更好地结合这些技术,没有指南也没有共识;同时,最佳的结合时间及干预次数也存在不一致的看法^[50],因此未来的研究可以从最佳联合时间与干预次数入手,探讨VR与NIBS的最佳结合方法。

5 总结及展望

综上所述,作为一种新颖的有前途的康复方式,VR通过丰富的虚拟环境和实时的运动反馈更好地诱导大脑皮层重组,有效地改善卒中后上肢运动功能、促进功能活动的独立性、缓解上肢疼痛。将VR与其他康复技术联合,可以更好地发挥原康复技术对脑卒中上肢功能产生的作用,应用前景广阔。但VR用于卒中后上肢功能训练仍然存在很多不足。

首先,卒中恢复的神经可塑性是复杂的,潜在机制可能取决于许多临床因素,包括病变类型、位置、严重程度和卒中的分期等^[6]。而目前对VR机制的研究还存在样本量小、研究质量参差不齐等问题,因此未来还需要开展更多大样本、高质量的研究来探讨VR的作用机制。其次,将VR中的学习效果转移到真实环境中存在阻碍^[18],这可能与上肢康复期间VR深度感知的差异有关,虽然沉浸式VR比非沉浸式VR能提供更好的深度感知,但仍需要进一步改进VR的多感官

反馈功能使患者将虚拟环境中的学习效果更好地转移到现实生活中。另外,康复是一项多学科和多模式的努力,而不是“一刀切”的干预措施^[51]。将VR集成到可以增强神经可塑性的其他康复治疗方式中,可以诱导更好的恢复,这值得进一步探索。需要强调的一点是目前探讨VR与其他康复技术结合的研究较少,其联合作用机制及是否能代替常规康复技术目前还不够清楚,未来还需要进一步深入,以期从机制上寻求VR与其他康复技术的最佳组合方式,从而产生显著而持久的康复疗效。

【参考文献】

- [1] 王陇德, 刘建民, 杨弋, 等. 我国脑卒中防治仍面临巨大挑战——《中国脑卒中防治报告 2018》概要[J]. 中国循环杂志, 2019,34(2):105-119.
- [2] Kim G, Lim S, Kim H, et al. Is robot-assisted therapy effective in upper extremity recovery in early stage stroke? -a systematic literature review[J]. J Phys Ther Sci, 2017,29(6):1108-1112.
- [3] Wu C Y, Chen C L, Tsai W C, et al. A randomized controlled trial of modified constraint-induced movement therapy for elderly stroke survivors: changes in motor impairment, daily functioning, and quality of life[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2007,88(3):273-278.
- [4] Al-Wahaibi R M, Al-Jadid M S, ElSerougy H R, et al. Effectiveness of virtual reality-based rehabilitation versus conventional therapy on upper limb motor function of chronic stroke patients: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Physiother Theory Pract, 2022,38(13):2402-2416.
- [5] Laver K, George S, Thomas S, et al. Cochrane review: virtual reality for stroke rehabilitation[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2012,48(3):523-530.
- [6] Hao J, Xie H, Harp K, et al. Effects of Virtual Reality Intervention on Neural Plasticity in Stroke Rehabilitation: A Systematic Review[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2022,103(3):523-541.
- [7] Lewis G N, Rosie J A. Virtual reality games for movement rehabilitation in neurological conditions: how do we meet the needs and expectations of the users? [J]. Disabil Rehabil, 2012,34(22):1880-1886.
- [8] 庄卫生, 钱宝延, 张杰文, 等. 基于大脑半球间相互抑制理论的针刺法对脑梗死患者运动功能的影响[J]. 中国中西医结合杂志, 2018,38(7):805-808.
- [9] Calautti C, Baron JC. Functional neuroimaging studies of motor recovery after stroke in adults: a review[J]. Stroke, 2003,34(6):1553-1566.
- [10] 郭苗, 徐国军, 余秋蓉, 等. 脑卒中后运动功能障碍与连接半球间同位脑区的胼胝体结构损伤相关[J]. 磁共振成像, 2022,13(6):28-35.
- [11] Jang S H, You S H, Hallett M, et al. Cortical reorganization and associated functional motor recovery after virtual reality in patients with chronic stroke: an experimenter-blind preliminary study[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2005,86(11):2218-2223.
- [12] Mekbib D B, Zhao Z, Wang J, et al. Proactive Motor Functional Recovery Following Immersive Virtual Reality-Based Limb Mirroring Therapy in Patients with Subacute Stroke[J]. Neurotherapeutics, 2020,17(4):1919-1930.
- [13] Orihuela-Espina F, Fernández D C I, Palafox L, et al. Neural reorganization accompanying upper limb motor rehabilitation from stroke with virtual reality-based gesture therapy[J]. Top Stroke Rehabil, 2013,20(3):197-209.
- [14] Mekbib D B, Debeli D K, Zhang L, et al. A novel fully immersive virtual reality environment for upper extremity rehabilitation in patients with stroke[J]. Ann N Y Acad Sci, 2021,1493(1):75-89.
- [15] 李宁宁, 勾丽洁, 王凯旋. 镜像神经元系统的基础研究与临床应用现状[J]. 中国康复医学杂志, 2019,34(2):243-247.
- [16] 陈芳婷, 欧建林, 王冉, 等. 基于镜像神经元理论的动作观察疗法在脑卒中康复的应用[J]. 中国康复, 2021,36(9):568-571.
- [17] Holden M K. Virtual environments for motor rehabilitation: review[J]. Cyberpsychol Behav, 2005,8(3):187-211, 212-219.
- [18] Kim W S, Cho S, Ku J, et al. Clinical Application of Virtual Reality for Upper Limb Motor Rehabilitation in Stroke: Review of Technologies and Clinical Evidence[J]. J Clin Med, 2020,9(10):3369.
- [19] Saposnik G, Cohen L G, Mamdani M, et al. Efficacy and safety of non-immersive virtual reality exercising in stroke rehabilitation (EVREST): a randomised, multicentre, single-blind, controlled trial[J]. Lancet Neurol, 2016,15(10):1019-1027.
- [20] Saldana D, Neureither M, Schmiesing A, et al. Applications of Head-Mounted Displays for Virtual Reality in Adult Physical Rehabilitation: A Scoping Review[J]. Am J Occup Ther, 2020,74(5):1184729531p-1184729532p.
- [21] Li Y, Huang J, Li X, et al. Effect of Time-Dose-Matched Virtual Reality Therapy on Upper Limb Dysfunction in Patients Post-stroke: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2022,103(6):1131-1143.
- [22] Song Y H, Lee H M. Effect of Immersive Virtual Reality-Based Bilateral Arm Training in Patients with Chronic Stroke[J]. Brain Sci, 2021,11(8):1032.
- [23] Chen J, Or C K, Chen T. Effectiveness of Using Virtual Reality-Supported Exercise Therapy for Upper Extremity Motor Rehabilitation in Patients With Stroke: Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials[J]. J Med Internet Res, 2022,24(6):e24111.
- [24] Choi J H, Han E Y, Kim B R, et al. Effectiveness of commercial gaming-based virtual reality movement therapy on functional recovery of upper extremity in subacute stroke patients[J]. Ann Rehabil Med, 2014,38(4):485-493.
- [25] Anwar N, Karimi H, Ahmad A, et al. Virtual Reality Training Using Nintendo Wii Games for Patients With Stroke: Randomized Controlled Trial[J]. JMIR Serious Games, 2022,10(2):e29830.
- [26] Michielsen M E, Selles R W, van der Geest J N, et al. Motor recovery and cortical reorganization after mirror therapy in chronic stroke patients: a phase II randomized controlled trial[J]. Neu-

- rorehabil Neural Repair, 2011,25(3):223-233.
- [27] Garry M I, Loftus A, Summers J J. Mirror, mirror on the wall: viewing a mirror reflection of unilateral hand movements facilitates ipsilateral M1 excitability[J]. *Exp Brain Res*, 2005,163(1):118-122.
- [28] 丁力, 贾杰. “镜像疗法”作为一种康复治疗技术的新进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2015,30(5):509-512.
- [29] Kang Y J, Park H K, Kim H J, et al. Upper extremity rehabilitation of stroke: facilitation of corticospinal excitability using virtual mirror paradigm[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2012,9(1):71-90.
- [30] Choi H S, Shin W S, Bang D H. Mirror Therapy Using Gesture Recognition for Upper Limb Function, Neck Discomfort, and Quality of Life After Chronic Stroke: A Single-Blind Randomized Controlled Trial[J]. *Med Sci Monit*, 2019,25(11):3271-3278.
- [31] Duret C, Grosmaire A G, Krebs H I. Robot-Assisted Therapy in Upper Extremity Hemiparesis: Overview of an Evidence-Based Approach[J]. *Front Neurol*, 2019,10(3):412-426.
- [32] Abd E E, Alshehri M A, El-Fiky A A, et al. The Effect of Robot-Mediated Virtual Reality Gaming on Upper Limb Spasticity Poststroke: A Randomized-Controlled Trial[J]. *Games Health J*, 2022,11(2):93-103.
- [33] 姜荣荣, 叶正茂, 陈艳, 等. 上肢康复机器人对偏瘫上肢运动功能和日常活动能力的影响[J]. *中国康复*, 2020,35(10):517-521.
- [34] Daly J J, Huggins J E. Brain-computer interface: current and emerging rehabilitation applications[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2015,96(1):1-7.
- [35] Huggins J E, Guger C, Ziat M, et al. Workshops of the Sixth International Brain-Computer Interface Meeting: brain-computer interfaces past, present, and future[J]. *Brain Comput Interfaces (Abingdon)*, 2017,4(1-2):3-36.
- [36] Khan M A, Das R, Iversen H K, et al. Review on motor imagery based BCI systems for upper limb post-stroke neurorehabilitation: From designing to application[J]. *Comput Biol Med*, 2020,123:103843.
- [37] 姜月, 邹任玲. 基于脑机接口技术的肢体康复研究进展[J]. *生物医学工程研究*, 2018,37(04):536-540.
- [38] 徐森威, 曾虹, 孔万增. 基于 BCI-VR 技术的新型上肢康复系统[J]. *杭州电子科技大学学报(自然科学版)*, 2020,40(6):45-49.
- [39] 高诺, 陈鹏程. 基于脑机接口与虚拟现实技术的手部软康复系统研究[J]. *生物医学工程研究*, 2022,41(1):32-40.
- [40] Wen D, Fan Y, Hsu S H, et al. Combining brain-computer interface and virtual reality for rehabilitation in neurological diseases: A narrative review[J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2021,64(1):101404.
- [41] Moulaei K, Sheikhtaheri A, Nezhad M S, et al. Telerehabilitation for upper limb disabilities: a scoping review on functions, outcomes, and evaluation methods[J]. *Arch Public Health*, 2022,80(1):196-205.
- [42] Ostrowska P M, Śliwiński M, Studnicki R, et al. Telerehabilitation of Post-Stroke Patients as a Therapeutic Solution in the Era of the Covid-19 Pandemic[J]. *Healthcare (Basel)*, 2021,9(6):654-667.
- [43] Qiu Q, Crounce A, Patel J, et al. Development of the Home based Virtual Rehabilitation System (HoVRS) to remotely deliver an intense and customized upper extremity training[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020,17(1):155-170.
- [44] Holden M K, Dyar T A, Dayan-Cimadoro L. Telerehabilitation using a virtual environment improves upper extremity function in patients with stroke[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2007,15(1):36-42.
- [45] 王艺霏, 何佳佳, 田浩. 非侵入性脑刺激在脑卒中康复中的研究进展[J]. *中国康复*, 2021,36(11):684-689.
- [46] Llorens R, Fuentes M A, Borrego A, et al. Effectiveness of a combined transcranial direct current stimulation and virtual reality-based intervention on upper limb function in chronic individuals post-stroke with persistent severe hemiparesis: a randomized controlled trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021,18(1):108-116.
- [47] Kim Y J, Ku J, Cho S, et al. Facilitation of corticospinal excitability by virtual reality exercise following anodal transcranial direct current stimulation in healthy volunteers and subacute stroke subjects[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2014,11(1):124-133.
- [48] Zheng C J, Liao W J, Xia W G. Effect of combined low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation and virtual reality training on upper limb function in subacute stroke: a double-blind randomized controlled trial[J]. *J Huazhong Univ Sci Technol Med Sci*, 2015,35(2):248-254.
- [49] Yao X, Cui L, Wang J, et al. Effects of transcranial direct current stimulation with virtual reality on upper limb function in patients with ischemic stroke: a randomized controlled trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020,17(1):73-81.
- [50] Cassani R, Novak G S, Falk T H, et al. Virtual reality and non-invasive brain stimulation for rehabilitation applications: a systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020,17(1):147-152.
- [51] Clark W E, Sivan M, O'Connor R J. Evaluating the use of robotic and virtual reality rehabilitation technologies to improve function in stroke survivors: A narrative review[J]. *J Rehabil Assist Technol Eng*, 2019,6:1812249851.