

虚拟现实技术在颅脑损伤患者认知障碍康复中的应用进展*

梁 飘¹ 赵晓科^{1,2}

颅脑损伤(trumatic brain injury, TBI)是一种严重致残性疾病,通常由严重交通事故、暴力事件、自然灾害等造成。TBI可导致运动、认知、情绪等多种功能障碍,其中认知功能障碍会对患者的生活质量产生重大影响^[1]。全球每年约有548万人遭受TBI^[2],而幸存的中重度TBI的患者中,约44%的患者因认知障碍无法重返工作岗位;约88%的轻度TBI患者也因灰白质受累影响部分认知水平,进而影响生活质量^[3]。据世界卫生组织统计,TBI是导致成人智力残疾的首位病因。TBI造成的认知障碍严重影响患者的心理健康和生活质量,给家庭和社会带来沉重的经济负担。因此促进认知康复具有十分重要的意义。TBI后的认知障碍主要表现为注意缺陷、记忆丧失、执行能力下降等方面^[4]。传统认知康复手段因单调乏味、灵活性差等问题而影响其在TBI患者认知障碍康复中的疗效。虚拟现实技术(virtual reality, VR)是近年迅速发展起来的一种康复技术,已逐渐应用于TBI患者的认知康复中。

1 TBI患者认知障碍的形成原因及康复路径

1.1 TBI患者认知障碍的形成原因

TBI患者认知障碍的形成机制十分复杂,目前认为包括原发性脑组织破坏和继发性神经递质系统异常两个方面。直接暴力对神经组织的冲击、撕拉、剪切和挤压对大脑皮质、海马、丘脑、纹状体等认知相关神经网络结构造成原发性破坏。特定部位的损伤常产生特征性损害表征,如额叶损伤常表现合并抑郁的执行功能障碍,颞叶损伤常表现为语言、记忆功能障碍,顶叶损伤常表现为计算、注意功能障碍^[5]。继发性神经递质系统异常是由于缺血缺氧引起的神经元死亡、水肿及炎症反应等诱发的神经递质、受体在脑内的表达改变^[6]。乙酰胆碱(Ach)N受体的下降,多巴胺(DA)水平降低,5-羟色胺(5-HT)释放增多等均进一步损害认知功能^[7]。

1.2 TBI患者认知障碍的康复路径

同时TBI可诱发机体的自发修复机制,包括新生血管形成、神经营养因子合成增加、神经发生和脑的功能重塑等。

但这些自发修复强度有限且不持久,无法逆转损伤造成的不良后果。康复的目的在于刺激和推动上述修复机制,增强大脑修复和可塑性,从而改善TBI患者的认知预后^[8]。依据这种策略,学者们认为刺激特定的感觉或运动神经元回路将对大脑修复有益^[9]。目前认知康复的方法主要是治疗师指导下的行为训练及计算机辅助的认知矫正治疗。传统康复治疗往往训练周期长,需要投入大量人力、物力及财力,短时间内无法得到明显改善,而计算机辅助的认知矫正无法模拟真实场景,患者缺乏身临其境的体验感,限制了训练技能在日常生活中的应用^[10]。而新兴的VR技术可以提供更高强度、更逼真和更系统化的训练环境,在认知功能康复训练中的应用显示出巨大潜力^[11]。

2 VR技术

2.1 VR技术的定义和特点

VR是利用计算机技术生成的一种模拟真实事物的虚拟环境,用户可通过穿戴特殊的传感设备(如:头戴式显示器、数据手套、力反馈等)与虚拟环境进行自然交互^[12],此过程所产生的视、听、触觉可使用户实现身临其境的体验。VR技术典型的特征可概括为“3I”特征^[13],即沉浸性(immersion)、交互性(interaction)、构想性(imagination)。沉浸性表示用户“投身”于虚拟环境中,可产生身临其境的感觉,是VR技术的核心;交互性表示用户可与虚拟环境中的事物进行实时交互,是人机和谐的关键因素;构想性表示用户沉浸于虚拟环境与虚拟对象交互时,获取新的知识,提高感性和理性认识,是辅助人类产生创造性思维的重要因素^[14]。

2.2 VR技术的模式

VR系统根据用户参与形式的不同可分为4种模式:桌面式、沉浸式、增强式和分布式。桌面式可使用普通显示器或立体显示器作为用户观察VR环境的一个窗口;沉浸式可利用头戴式显示器、位置追踪器和数据手套等使用户产生置身真实环境的感觉;增强式是把真实环境和虚拟环境整合在一起,使用户既可以看到真实世界又可以看到叠加在真实世

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2021.05.020

*基金项目:国家自然科学基金项目(81501946);江苏省妇幼保健协会科研项目(FYX202013);南京市医学科技发展资金项目(YKK18144)

1 南京医科大学附属儿童医院康复医学科,江苏省南京市,210008; 2 通讯作者

第一作者简介:梁飘,女,硕士研究生; 收稿日期:2020-05-09

界的虚拟对象;分布式是将不同地方的用户联结起来,对同一虚拟场景进行观察和操作,共同体验同一虚拟世界^[15]。

早在1993年就有学者提出将VR技术应用于康复治疗是可行的^[16]。VR应用于TBI患者认知康复的报道最早发表于1999年,该研究通过模拟在多种场景下骑自行车的运动对13例TBI患者进行认知康复训练,训练后患者的反应时间和运动时间均有明显改善^[17]。

2.3 VR技术的优势

与传统认知康复治疗手段相比,VR技术的优势可归纳为:①VR系统与游戏结合的运动模式可提高患者的参与积极性从而增加其训练的时间、训练的强度以及训练的频率;②VR可以创建一个类似于现实世界的生态有效的虚拟环境,患者可在其中完成一些特定的任务;③在VR中可根据患者的实际情况调整任务的难易程度^[11];④可以根据患者的表现及任务结果产生实时视觉和听觉反馈^[18];⑤VR训练可通过游戏与任务相结合促使患者独立思考解决问题,从而优化运动学习^[19]。⑥患者在VR环境中还可以进行以任务为导向的重复训练,达到增强学习的效果^[20]。这些优势决定了VR在认知功能康复中的重要地位。

3 VR用于TBI患者认知障碍康复的机制

VR对TBI患者认知障碍康复的可能机制是丰富的感官刺激引起颅内神经元数量及结构的改变。患者在VR训练过程中持续接受视觉、听觉及触觉等多种动态刺激,并且不断调整身体姿势及执行肢体特定动作,这激活了各种感觉信号传导通路,促进了脑区神经元增殖、存活及分化,有助于脑神经网络功能重组;另外,通过重复高强度的VR认知训练有利于提高残存神经细胞兴奋性,能促进受损脑区功能重组并形成新的神经环路,从而改善患者认知功能及ADL能力^[21]。进一步来说,上述机制与中枢神经系统的神经可塑性密切相关,国外学者已在细胞分子水平证实了这一点。Salmin等^[22]在动物模型中发现丰富的VR环境刺激可以影响多种细胞机制进而对海马区神经干、祖细胞神经球形成能力产生积极作用,促进海马神经元发生。Kirschen等^[23]在小鼠实验中提出进行多次VR体验后,大脑不断形成新的活性齿状颗粒细胞,从而增加海马区神经元数量。在VR环境中持续接受训练是强化学习的过程,可导致现有神经元改变突触连接,近来已有研究结合fMRI成像技术证实参与者接受VR训练后海马区和其他脑区之间功能连接明显增加^[24-25]。此外,VR环境能激活大脑的镜像神经系统,有利于促进神经功能恢复^[26-27]。目前国内外关于VR促进认知功能康复机制的报道较少,未来可深入探索VR认知康复的作用机制,加深对VR的理解和认识,以便进一步推广其应用。

4 VR对TBI患者注意障碍的作用

注意是认知的基础并影响记忆和执行功能,常用的训练方法包括对注意组成部分(专注、选择性、交替和分散注意)的针对性训练^[28]和基于计算机辅助注意训练^[28-29]。学者们提出VR营造的沉浸感有潜力提高患者的参与积极性,并容易保持患者的专注度,因而进行了治疗尝试。

Larson等^[30]在试点研究中评估了VR在TBI患者注意障碍康复中的可行性,该研究纳入18例TBI患者在VR和机器人光学操作系统中进行注意训练,结果发现有15例患者能够完成整个治疗方案,表现出对虚拟环境的良好耐受性,表明VR对TBI患者注意功能康复是可行的。虚拟环境中的视、听、触觉可维持患者的注意力,利用这一特点,Vorkin等^[31]对TBI损伤时间在3个月以内的21例患者进行了VR治疗,利用VR技术联合机器人设计了“几乎最小”的交互式视觉-触觉注意训练,研究中连续两天进行测试,要求患者握住机器人的手柄持续来回触摸目标,每天完成6组试验,记录准确触摸目标次数,试验中患者对VR有良好的耐受性,且随着训练的进行,患者准确触摸目标次数逐渐增多,其注意功能显著改善。此外,也有学者研究在Lokomat机器人康复训练的基础上配备VR屏幕对TBI患者注意功能康复的影响,研究纳入56例TBI患者,随机分为试验组和对照组:试验组在进行Lokomat机器人康复训练时配备VR屏幕而对照组不使用VR设备,进行为期8周,每周5次的训练后,结果显示试验组在选择注意方面显著改善,而对照组无明显变化,作者认为这种结果可能与VR的可控性、实时反馈、提高患者参与积极性并且形成“强化学习”的过程有关^[32]。

总的来说,以上报道多利用了VR联合机器人进行认知功能康复治疗,这将感知觉和运动结合在一起,以多种形式激活中枢神经系统,并且机器人产生的推力有利于减少患者在训练过程中出现注意力不集中的情况,大大提高了训练效率。但是,Larson和Vorkin的研究均没有设置对照组,限制了其循证证据级别。当前VR在TBI患者注意功能康复中的作用效果尚未有高质量循证依据,因此未来的研究应致力于大样本、多中心的随机对照研究。

5 VR用于TBI患者记忆障碍的作用

5.1 VR用于TBI患者记忆功能的评估

记忆是对信息编码、巩固、存储和再提取的过程,它可分为知觉表征记忆、语义记忆、工作记忆和情景记忆五大记忆系统,根据时间又可分为前瞻性记忆和回溯性记忆。目前的VR研究侧重于对工作记忆和前瞻性记忆的影响。记忆障碍是认知功能障碍的主要表现之一,因此对TBI患者记忆功能康复训练尤为重要。

VR对TBI患者记忆功能的评估是后续制定康复训练方

案的重要依据。有学者认为VR技术应用于记忆功能的评估可以弥补传统评估方法不能对轻微认知障碍评估的缺点,研究纳入24例脑震荡患者,在虚拟走廊中,患者随着计算机的导航到达任意一个门,并要求患者自行原路返回,根据任务的平均完成时间和错误次数来评估空间记忆,结果发现VR对空间记忆的评估有较高的敏感度和特异度,证实VR可应用于脑震荡患者的记忆功能评估^[33]。

5.2 VR用于TBI患者记忆障碍的康复

Yip等^[34]在一项试点研究中纳入4例获得性脑损伤患者,对其进行VR训练后记忆功能明显改善并且能将习得技能转移到日常生活中,初步证实了VR在脑损伤患者记忆功能恢复中的积极作用。随后Yip等^[35]在另一项更大样本的随机对照研究中进一步证实了VR可促进TBI患者记忆功能的恢复,该研究以便利店为背景针对前瞻性记忆设计训练项目,纳入37例TBI患者,随机分为VR训练组和进行桌游或阅读的非VR训练组,结果显示VR训练组前瞻性记忆显著提高,并且回归现实生活执行与VR训练相似的任务后行为评估也显著改善。由于康复疗程长、成本高,很多TBI患者出院后不能坚持返院继续治疗。Gamito^[36]结合网络平台和VR技术开发出在线康复系统以评估远程康复在TBI患者记忆功能康复中的作用,该研究招募一例TBI患者进行在线VR训练,在训练前、中、后利用定步调听觉连续加法测验对患者进行神经心理评估,结果发现受训者的工作记忆功能明显改善,表明在线康复对改善TBI患者记忆功能康复有积极作用,为家庭远程康复带来了福音。

从当前的研究来看,VR对TBI患者记忆功能康复训练主要针对前瞻性记忆和工作记忆,其它类型的记忆训练未见报道。临床中常由于环境复杂、患者不配合、传统评估方法的自身限制等因素使得部分患者的认知功能无法正确评估,影响后续的治疗方案。目前已初步探索VR在空间记忆中的评估作用,并取得积极的结果。未来应开发出针对多种记忆类型同时整合评估和治疗功能的VR系统,这样有利于记忆功能的整体提高。

6 VR用于TBI患者执行功能障碍的作用

6.1 VR用于TBI患者执行功能的评估

执行功能反映了个体对自身的认知过程进行调节和控制,建立起新的行为方式并对其进行内省和进一步调控的能力,包括选择性注意、计划、解决问题及创造性和抽象性思维等^[37]。

VR对TBI患者进行执行功能评估也是康复治疗前的重要一步。威斯康星卡片分类测验(Wisconsin card sorting test, WCST)是目前公认的执行功能测试^[23],但是WCST形式过于单一枯燥,患者容易放弃。VR技术应用于执行功能评

估时有多项优势,如可以根据需要灵活调整测试内容,易于控制测试的难易程度;还可以提供贴近真实生活的环境,提高被试者的参与积极性和评估的生态效度;特别是虚拟测试环境可以避免在真实地点操作带来的潜在危险^[37]。Robitaille等^[38]开发出虚拟化交互平台,它可以评估轻度TBI患者残余的执行功能,证实于VR在执行功能评估中的积极作用。在多数研究中,VR技术应用于执行功能的评估为探索性研究,尚未验证VR和现实生活之间的关系^[24]。针对这一问题,Renison B等^[39]纳入30例TBI患者和30例健康成年人依次完成虚拟图书馆任务和现实图书馆任务,结果显示TBI患者在虚拟图书馆和现实图书馆中神经心理测试分数呈高度正相关,在这两种环境中的表现相似,并且VR有良好的结构效度和生态效度,支持VR技术在TBI患者执行功能评估中的应用。

6.2 VR用于TBI患者执行功能障碍的康复

部分VR系统既可用于评估,也可用于执行功能训练。Jacoby^[40]在一项小样本随机对照试验中对VR系统训练与传统职业治疗进行了比较,纳入12例TBI患者,随机分为VR训练组和传统职业治疗组,在训练前后利用多任务测试简化版和执行功能性能测试来评估执行功能,结果表明VR训练组受训后多任务测试简化版总分和执行功能性能测试总分均比受训前显著提高,初步证实VR训练可改善TBI患者的执行功能。随后Dahdah等^[41]为了实现VR技术在TBI患者神经功能障碍中的系统化治疗,将Stroop测试与VR环境相结合,对15例TBI患者在虚拟公寓和虚拟教室中进行Stroop测试训练,经过每周2次,共4周的训练后,患者的特定执行功能和信息处理速度明显提高,证实VR化的Stroop测试既可以评估执行功能,也可以改善执行功能。

上述研究表明,VR在TBI患者执行功能的评估和康复治疗中迅速发展,特别是有研究报道了VR系统融合传统的治疗方法,使原来枯燥乏味的训练变得生动有趣,极大提高患者的参与积极性。但由于技术限制,目前的VR场景多为虚拟图书馆、虚拟公寓和虚拟教室等,形式单一容易引起患者厌倦并影响其推广应用。因此未来应开发出更多形式多样的VR场景来保证VR的趣味性和拓展它的适用范围。

7 VR对TBI患者整体认知功能障碍的作用

TBI患者通常造成广泛的功能脑区神经元受损,较少以单一方面的认知障碍出现。但是目前针对整体认知功能康复治疗的VR系统不多。为此,有学者将执行功能、注意过程和视觉空间认知的治疗模块同时整合到一个虚拟场景中,如让患者往不同方向移动虚拟目标、选择特殊的图形、在特定时间内触摸到虚拟对象等。该随机对照研究纳入100例TBI患者,随机分为进行VR训练的试验组和进行传统康复治疗

的对照组,在每周3次,共8周的VR训练后,发现试验组在认知灵活性、转移技能和选择性注意方面有显著提高,表明VR训练是改善TBI患者整体认知功能的有效治疗手段^[42]。目前已有证据表明安全的驾驶需要反应时间、视觉空间技能、注意力、执行功能和计划等过程的持续协调才能完成,在认知功能上极具挑战并且在日常生活中危险性极高。因此,Ettenhofer ML等^[43]利用虚拟驾驶器让TBI患者在安全的环境下进行了认知康复训练,该试点研究纳入11例TBI患者进行难度渐增的驾驶任务,经过4周共6次训练后,患者的工作记忆和选择性注意显著改善,表明虚拟驾驶在TBI患者认知功能康复中有很大潜力。另外,也有关于VR在青少年TBI患者认知康复中应用的个案报道,研究纳入1例15岁的TBI患者进行传统的认知功能康复训练和VR训练,在VR中患者被要求完成Stroop任务及计算、桥上漫步、海上航行、迷宫移球、森林中奔跑和在绳桥上步行共六个虚拟场景,结果显示患者完成VR认知功能康复治疗后感知功能显著改善,特别是在注意功能和执行功能方面明显提高,首次证实了VR应用于青少年TBI认知康复的有效性和安全性^[44]。目前国内关于VR技术在TBI患者认知障碍中应用研究尚处于初始阶段,虽然有一些研究报道了VR对TBI患者认知功能的恢复有积极作用^[45-47],但多数因样本量少、非双盲、单中心而限制了其临床循证医学证据级别。

根据当前的报道,VR应用于TBI患者整体认知功能康复时虚拟场景更复杂,技术的要求也更高。认知功能的整体恢复更有利于患者实现独立生活,及早回归社会的愿望。因此,整合高质量、多样化的虚拟场景是未来VR认知康复研究的一大热点。

8 小结

VR作为一种新技术,具有灵活性好、安全性高、代入感好和沉浸感强等优势,并且便于为患者量身定制治疗方案,实现个体化治疗,因而在TBI认知康复领域有很大的发展潜力。但目前的VR技术仍因刷新频率等限制,使得部分患者治疗中出现晕动症、挫败感、疲劳感、眼睛不适等轻微不良反应^[48],故仍需在技术层面不断完善。同时临床上仍缺乏大样本量、多中心、双盲、随机对照临床试验数据,其认知功能康复疗效仍需进一步研究。当前的VR技术主要应用于成人TBI的评估治疗,在儿童中的应用报道较少,未来在儿童TBI中应用VR康复值得探究。

参考文献

- [1] Latella D, Maggio MG, De Luca R, et al. Changes in sexual functioning following traumatic brain injury: an overview on a neglected issue[J]. J Clin Neurosci, 2018, 58: 1—6.
- [2] Iaccarino C, Carretta A, Nicolosi F, et al. Epidemiology of severe traumatic brain injury[J]. J Neurosurg Sci, 2018, 62(5):535—541.
- [3] Yamamoto S, Levin HS, Prough DS. Mild, moderate and severe: terminology implications for clinical and experimental traumatic brain injury[J]. Curr Opin Neurol, 2018, 31(6):672—680.
- [4] Ichkova A, Rodriguez-Grande B, Bar C, et al. Vascular impairment as a pathological mechanism underlying long-lasting cognitive dysfunction after pediatric traumatic brain injury[J]. Neurochem Int, 2017, 111:93—102.
- [5] 张孙鑫, 何永生. 计算机辅助认知康复训练治疗创伤性脑损伤后认知功能障碍的研究进展[J]. 中华神经医学杂志, 2019(01):98—101.
- [6] Kim WS, Lee K, Kim S, et al. Transcranial direct current stimulation for the treatment of motor impairment following traumatic brain injury[J]. J Neuroeng Rehabil, 2019, 16(1): 14.
- [7] Capizzi A, Woo J, Verduzco-Gutierrez M. Traumatic brain injury: an overview of epidemiology, pathophysiology, and medical management[J]. Med Clin North Am, 2020, 104(2): 213—238.
- [8] Werner JK, Stevens RD. Traumatic brain injury: recent advances in plasticity and regeneration[J]. Curr Opin Neurol, 2015, 28(6):565—573.
- [9] Dang B, Chen W, He W, et al. Rehabilitation treatment and progress of traumatic brain injury dysfunction[J]. Neural Plast, 2017, 2017:1—6.
- [10] 黄慧, 贾艳滨, 沈拾亦. 虚拟现实技术在认知康复中的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(2):244—247.
- [11] Alashram AR, Annino G, Padua E, et al. Cognitive rehabilitation post traumatic brain injury: a systematic review for emerging use of virtual reality technology[J]. J Clin Neurosci, 2019, 66:209—219.
- [12] 余彬, 曾庆, 黄国志. 头戴式虚拟现实系统在运动康复治疗中的应用进展[J]. 中国康复医学杂志, 2018, 33(6):734—737.
- [13] Huang HM, Liaw SS, Lai CM. Exploring learner acceptance of the use of virtual reality in medical education: a case study of desktop and projection-based display systems [J]. Interactive Learning Environments, 2013, 24(1):3—19.
- [14] 孟繁媛, 敖丽娟. 虚拟现实技术用于脑损伤后记忆障碍的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2015, 30(7):731—734.
- [15] 王亨, 王然, 卓子寒, 等. 虚拟现实技术概述及其用于辅助康复治疗的研究进展[J]. 生命科学仪器, 2013, 11(4):3—9.
- [16] Wann JP, Turnbull JD. Motor skill learning in cerebral palsy: movement, action and computer-enhanced therapy[J]. Baillieres Clin Neurol, 1993, 2(1):15—28.
- [17] Ma G, Da J, Sk R. Improving cognitive function after brain injury: the use of exercise and virtual reality[J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 1999, 80(6):661—667.
- [18] Maggio MG, De Luca R, Molonia F, et al. Cognitive rehabilitation in patients with traumatic brain injury: a narrative review on the emerging use of virtual reality[J]. J Clin Neurosci, 2019, 61:1—4.

- [19] Chen Y, Fanchiang HD, Howard A. Effectiveness of virtual reality in children with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Physical Therapy*, 2018, 98(1):63—77.
- [20] Calabrò RS, Naro A, Russo M, et al. The role of virtual reality in improving motor performance as revealed by EEG: a randomized clinical trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(1):53.
- [21] 付亏杰, 孙丽楠, 范飞, 等. 虚拟现实训练对脑梗死恢复期患者认知功能的影响[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, (9):682—684.
- [22] Salmin VV, Komleva YK, Kuvacheva NV, et al. Differential roles of environmental enrichment in Alzheimer's type of neurodegeneration and physiological aging[J]. *Front Aging Neurosci*, 2017, 9:245.
- [23] Kirschen GW, Shen J, Tian M, et al. Active dentate granule cells encode experience to promote the addition of adult-born hippocampal neurons[J]. *J Neurosci*, 2017, 37(18): 4661—4678.
- [24] Gimbel SI, Ettenhofer ML, Cordero E, et al. Brain bases of recovery following cognitive rehabilitation for traumatic brain injury: a preliminary study[J]. *Brain imaging and Behavior*, 2021, 15(1): 410—420.
- [25] Fajnerová I, Greguš D, Hlinka J, et al. Could prolonged usage of GPS navigation implemented in augmented reality smart glasses affect hippocampal functional connectivity?[J]. *BioMed Research International*, 2018, 2018:1—10.
- [26] Buccino G, Solodkin A, Small SL. Functions of the mirror neuron system: implications for neurorehabilitation[J]. *Cogn Behav Neurol*, 2006, 19(1):55—63.
- [27] De Luca R, Russo M, Naro A, et al. Effects of virtual reality-based training with BTs-Nirvana on functional recovery in stroke patients: preliminary considerations[J]. *Int J Neurosci*, 2018, 128(9):791—796.
- [28] Novack TA, Caldwell SG, Duke LW, et al. Focused versus unstructured intervention for attention deficits after traumatic brain injury[J]. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 1996, 11(3):52—60.
- [29] Zickefoose S, Hux K, Brown J, et al. Let the games begin: a preliminary study using attention process training-3 and Lumosity™ brain games to remediate attention deficits following traumatic brain injury[J]. *Brain Injury*, 2013, 27(6):707—716.
- [30] Larson EB, Ramaiya M, Zollman FS, et al. Tolerance of a virtual reality intervention for attention remediation in persons with severe TBI[J]. *Brain Inj*, 2011, 25(3):274—281.
- [31] Dvorkin AY, Ramaiya M, Larson EB, et al. A “virtually minimal” visuo-haptic training of attention in severe traumatic brain injury[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2013, 10(1):92.
- [32] Maggio MG, Torrisi M, Buda A, et al. Effects of robotic neurorehabilitation through lokomat plus virtual reality on cognitive function in patients with traumatic brain injury: a retrospective case-control study[J]. *Int J Neurosci*, 2020, 130(2):117—123.
- [33] Teel E, Gay M, Johnson B, et al. Determining sensitivity/specificity of virtual reality-based neuropsychological tool for detecting residual abnormalities following sport-related concussion[J]. *Neuropsychology*, 2016, 30(4):474—483.
- [34] Yip BC, Man DW. Virtual reality (VR)-based community living skills training for people with acquired brain injury: a pilot study[J]. *Brain Inj*, 2009, 23(13-14): 1017—1026.
- [35] Yip BC, Man DW. Virtual reality-based prospective memory training program for people with acquired brain injury[J]. *NeuroRehabilitation*, 2013, 32(1):103—115.
- [36] Gamito P, Oliveira J, Pacheco J, et al. Traumatic brain injury memory training: a virtual reality online solution[J]. *International Journal on Disability & Human Development*, 2011, 10(4):309—312.
- [37] 李明英, 吴惠宁, 崩曙光, 等. 虚拟现实技术在执行功能评估中的应用[J]. *心理科学进展*, 2017, 25(06):933—942.
- [38] Robitaille N, Jackson PL, Hebert LJ, et al. A virtual reality avatar interaction (VRai) platform to assess residual executive dysfunction in active military personnel with previous mild traumatic brain injury: proof of concept[J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2017, 12(7):758—764.
- [39] Renison B, Ponsford J, Testa R, et al. The ecological and construct validity of a newly developed measure of executive function: the virtual library task[J]. *J Int Neuropsychol Soc*, 2012, 18(3):440—450.
- [40] Jacoby M, Averbuch S, Sachar Y, et al. Effectiveness of executive functions training within a virtual supermarket for adults with traumatic brain injury: a pilot study[J]. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 2013, 21(2):182—190.
- [41] Dahdah MN, Bennett M, Prajapati P, et al. Application of virtual environments in a multi-disciplinary day neurorehabilitation program to improve executive functioning using the Stroop task[J]. *NeuroRehabilitation*, 2017, 41(4):721—734.
- [42] De Luca R, Maggio MG, Maresca G, et al. Improving cognitive function after traumatic brain injury: a clinical trial on the potential use of the semi-immersive virtual reality[J]. *Behav Neurol*, 2019, 2019(8):1—7.
- [43] Ettenhofer ML, Guise B, Brandler B, et al. Neurocognitive driving rehabilitation in virtual environments (NeuroDRIVE): a pilot clinical trial for chronic traumatic brain injury[J]. *NeuroRehabilitation*, 2019, 44(4):531—544.
- [44] De Luca R, Portaro S, Le Cause M, et al. Cognitive rehabilitation using immersive virtual reality at young age: a case report on traumatic brain injury[J]. *Appl Neuropsychol Child*, 2020, 9(3):282—287.
- [45] 刘颖. 早期虚拟现实训练对脑外伤患者功能康复的影响[J]. *医学信息*, 2015(44):365—365.
- [46] 江玥. 虚拟认知康复训练系统对颅脑外伤认知障碍的临床观察[D]. 成都中医药大学, 2012.
- [47] 楼伟伟, 尤春景, 许涛, 等. 脑损伤患者前瞻性记忆的临床评估及训练[J]. *中国康复*, 2007, 22(2): 96—98.
- [48] Aida J, Chau B, Dunn J. Immersive virtual reality in traumatic brain injury rehabilitation: a literature review[J]. *NeuroRehabilitation*, 2018, 42(4):441—448.