

·综述·

## 虚拟现实技术在脊髓损伤患者治疗中的应用进展

张贝贝<sup>1,2</sup>, 任亚锋<sup>1</sup>

(1. 河南中医药大学第一附属医院, 河南 郑州 450000; 2. 河南中医药大学康复医学院, 河南 郑州 450046)

**摘要:** 脊髓损伤(SCI)是一种常见的神经系统疾病,通常导致运动、感觉、认知、平衡、步行等功能障碍,甚至会引起疼痛,严重影响患者的身心健康和生活质量。常规治疗方法单一枯燥、缺乏趣味性,导致患者的依从性差,治疗积极性和配合度不高,且主要在医院进行;而虚拟现实(VR)技术可作为一种有效的辅助治疗手段,通过模拟的虚拟环境让患者沉浸其中,进行特定环境和任务的功能训练,获得真实体验感,以达到评估、治疗的效果。VR技术具有趣味性和交互性,显著提高了患者治疗的兴趣和积极性,并为居家康复治疗提供了新的可能性,也为患者提供了新的治疗选择。本综述系统介绍了VR技术在SCI患者治疗中的应用,重点阐述了其在评估患者功能障碍、改善运动功能、提高平衡和步行功能、缓解疼痛、促进认知和精神障碍恢复方面的作用,以及对其他功能障碍的影响和与其他技术的联合应用。同时,本文深入探讨了VR技术目前的优势和不足,旨在深化医生和治疗师对VR技术的认识、推动其在临床中的广泛应用,促进康复医学的发展,并为后续研究提供理论依据和方向,为临床实践提供新的思路和参考。

**关键词:** 脊髓损伤;虚拟现实;评估;治疗;应用

中图分类号:R493

文献标志码:A

文章编号:1672-3554(2025)03-0391-10

DOI:10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci).2025.0304

## Application Progress of Virtual Reality Technology for the Treatment of Spinal Cord Injury

ZHANG Beibei<sup>1,2</sup>, REN Yafeng<sup>1</sup>

(1. The First Affiliated Hospital of Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Rehabilitation Medicine, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China)

Correspondence to: REN Yafeng; E-mail: 253453490@qq.com

**Abstract:** Spinal cord injury (SCI) is a prevalent neurological disorder that often results in motor, sensory, cognitive, balance, and walking impairments, and can even lead to pain, significantly affecting the physical and mental health and quality of life of patients. Conventional treatment methods, primarily conducted in hospital settings, tend to be monotonous and lack engagement, leading to low patients' compliance, motivation and cooperation. In contrast, virtual reality (VR) technology can serve as an effective adjunctive therapeutic approach, immersing patients in simulated virtual environments for functional training in specific contexts and tasks, thereby providing a sense of real experience to achieve assessment and therapeutic outcomes. The interactive and engaging nature of VR technology markedly enhances patients' interest and motivation in treatment, offering new possibilities for home-based rehabilitation and presenting patients with alternative treatment options. This review systematically introduces the application of VR technology in the treatment of patients with SCI, focusing on its roles in assessing functional impairments, improving motor function, enhancing balance and walking abilities, alleviating pain, and promoting recovery from cognitive and psychological disorders, as well as its

收稿日期:2024-12-24

录用日期:2025-04-10

基金项目:河南省“双一流”创建学科中医学科学研究专项(HSRP-DFCTCM-2023-1-25)

作者简介:张贝贝,第一作者,研究方向:脊髓损伤后的康复治疗,E-mail:yy0901299@163.com;任亚锋,通信作者,主任医师,硕士生导师,研究方向:脊髓损伤后的康复治疗,E-mail:253453490@qq.com

impact on other functional impairments and its combined use with other technologies. Furthermore, this article delves into the current advantages and limitations of VR technology, aiming to deepen the understanding of VR among physicians and therapists, promote its widespread clinical application, advance the field of rehabilitation medicine, provide theoretical foundations and directions for future research, and offer new insights and references for clinical practice.

**Key words:** spinal cord injury; virtual reality; assessment; treatment; application

[J SUN Yat-sen Univ(Med Sci), 2025, 46(3): 391-400]

脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)主要与交通事故、坠落、跌倒等暴力因素有关,可分为完全性损伤和不完全性损伤,常导致损伤平面以下运动、感觉和自主神经功能障碍,以及疼痛等症状,给患者造成严重的身体和心理伤害,也对家庭及社会造成巨大的经济负担<sup>[1-2]</sup>。从1990年至2019年,全球SCI的发病率显著上升,患病率增加了81.5%,发病率增加了52.7%,2019年,全球SCI患者人数达到20.6万,新发病例为0.9万,且发病率随年龄增长而增加<sup>[3]</sup>;而近5年,我国创伤性SCI患者的平均年龄为32.09~53.92岁,且高龄患者所占比重最大,男性患者多于女性,男女比例约为(1.86~4.73):1,这表明中年男性是创伤性SCI患者的主要人群<sup>[4]</sup>。目前常用的临床康复治疗方法有物理因子疗法、运动疗法、作业疗法、中医疗法等。近年来,虚拟现实(virtual reality, VR)技术作为一种新兴的替代疗法,可应用于神经系统疾病的康复治疗,它是一种基于计算机的新型技术,可模拟真实环境,使患者在虚拟环境中获得沉浸感、真实感<sup>[5]</sup>。因此,VR技术在SCI治疗中的应用日益广泛,不仅在运动、认知、情绪、治疗态度等方面对患者进行调节,还提高了患者治疗的配合度,为患者提供连续的真实体验,这同时促进了神经的再生和可塑性<sup>[6]</sup>。

## 1 虚拟现实技术的定义

VR技术是以计算机为基础的交互技术,最初主要是为游戏者提供多样化的虚拟环境体验。然而,随着VR技术的发展,逐渐为疾病治疗提供安全、有效的训练环境。这在一定程度上减轻了医务工作者的负担,也为患者的治疗效果提供了新的可能性。VR技术通过控制器、手套和外骨骼等设备为患者提供多种感官刺激和反馈,并模拟虚拟的交互环境,提供身临其境的体验<sup>[7]</sup>。根据沉浸程度,

VR可分为沉浸式、半沉浸式和非沉浸式<sup>[8]</sup>,其中沉浸式VR借助头戴式显示器(head-mounted display, HMD)阻挡外界环境的视线,使患者获得高度沉浸感;半沉浸式VR可显示真实图像以提供更多信息;而非沉浸式VR可在屏幕或墙壁上显示虚拟图像<sup>[9]</sup>。VR干预不仅能提高当前训练任务所涉及的能力,还可完成与现实生活相关的任务,因此VR技术被视为有效、激励性的干预工具,可将治疗期间获得的技能和能力转移到现实世界中并发挥作用<sup>[10]</sup>。与传统治疗方法相比,VR技术通过创造激励性、趣味性的模拟环境,为患者提供真实体验,并通过与环境的交互掌握一系列技能和任务导向的方法技巧,从而提高患者的兴趣、发挥积极主动性<sup>[11]</sup>。此外,VR技术不仅能强化认知功能和促进大脑健康,还能为患者提供一个安全可控的环境,用于日常活动训练,使患者重新学习技能并逐渐获得功能独立性<sup>[12]</sup>。常规治疗通常在医院进行,但SCI患者出院后仍需继续训练以确保治疗效果,而VR技术突破了场地限制,居家训练也能达到有效的治疗效果。例如,基于家庭的VR健身训练为患者提供了便捷的康复治疗方法,患者可在医生的远程监测和指导下居家锻炼,制定适合自己的训练计划,并根据实际情况调整任务量,以促进恢复、增强体质,满足必要的身体活动需求<sup>[13]</sup>。

## 2 虚拟现实技术的作用机制

VR技术创建了高度交互性的虚拟环境,患者在执行虚拟任务时会强烈激活视觉、前庭觉和本体感觉系统<sup>[14]</sup>,其交互特性能让患者主动参与训练过程。神经可塑性是指大脑为响应学习、经验和适应而形成新的结构和功能的能力,VR技术可能通过控制大脑接收的感觉输入,诱导神经变化并产生适应性反应,其沉浸式特性允许进行交互式训练和模

拟,以此激活大脑相关区域的神经、促进突触可塑性,从而提高患者参与度并改善治疗效果<sup>[12]</sup>。研究者探究了基于VR技术的手部锻炼对初级和次级运动区域诱导神经激活的影响,发现患者在复杂的VR环境中体验虚拟任务时,可激活与相关体验有关的大脑区域,如感觉运动区域(背侧运动前区、辅助运动区、前扣带回皮层、前顶叶内皮层以及颞上回)<sup>[15]</sup>。此外,沉浸式VR通过多感官输入能有效分散患者的注意力,并直接阻断现实环境的感觉输入,从而减少了感知疼痛的注意力,导致疼痛感减弱,但其镇痛作用机制尚不清楚,可能与将注意力从诱发痛觉的有害刺激上转移开有关<sup>[16]</sup>。另一项试验研究了虚拟行走改善SCI后神经性疼痛的机制,发现虚拟行走实现的正常步态行走体验对皮质丘脑回路产生积极影响,其可能以适应性的方式激活感觉运动皮层以及与感觉运动执行和控制相关的皮层区域,从而调节与疼痛有关的神经递质失调,进而减轻SCI患者疼痛感<sup>[17]</sup>。大脑、脊髓或者神经受损会影响患者的身体所有权,即对整个身体和各部位的归属感,且这种归属感区别于外界事物,VR技术可以改变患者对身体所有权的感知,学者认为这种感知的改变可能降低了SCI患者的疼痛水平<sup>[18]</sup>。

### 3 虚拟现实技术在评定脊髓损伤患者功能障碍中的应用

康复评定是康复治疗过程中的必要环节,也是制定康复治疗的前提与依据<sup>[19]</sup>,同时也可预测治疗后的效果和恢复程度。目前评定SCI患者功能障碍主要采用临床评定量表,对感觉和运动功能、认知、平衡、步行、日常生活活动能力等方面进行检查。但临床评定量表存在一定的局限性,对微小功能变化的评估效率和准确性较低,且易产生主观倾向<sup>[20]</sup>。随着科学的不断发展,VR技术逐渐应用于SCI患者的诊断评估,现已有用于评定功能障碍的VR系统,以监测患者的治疗进展、记录患者执行任务期间标准化的运动学数据,旨在为临床医生提供更加客观、准确、量化的结果<sup>[21]</sup>,在一定程度上减少了主观偏移。如借助VR系统Toyra记录上肢关节运动时在每个自由度上的运动学变量,以此评

估患者的功能障碍,并使用数学软件工具MATLAB分析肩关节、肘关节和手腕的活动范围,并与功能检查的临床评估量表同时使用,结果发现,临床量表和运动学变量之间存在不同程度的相关性,临床医生可根据这些信息补充评分量表,并制定治疗方案,还可以预测患者治疗后的临床量表评分<sup>[21]</sup>。此外,与标准化认知测试相比,VR技术在评估认知功能障碍方面有巨大潜力,准确度更高,灵敏度和特异性超过85%,可作为推荐的筛查方法<sup>[22]</sup>。头戴式VR技术为患者提供了经济高效的动态姿势评估系统,研发的VR综合平衡评估和训练系统(VR-ComBAT)创建了安全、实用的VR环境,用于评估与姿势控制有关的感觉系统,未来可与认知评估相结合,以评估双重任务对姿势控制权重的影响<sup>[23]</sup>。

## 4 虚拟现实技术在恢复脊髓损伤患者功能障碍中的应用

### 4.1 改善运动功能

SCI患者通常表现为不同程度的运动功能障碍,包括肌力下降、肌张力异常、肌肉萎缩、反射异常等。与下肢相比,上肢许多关节的运动可以执行精细的活动,这要归因于复杂的神经肌肉控制<sup>[24]</sup>。在日常生活中,上肢的活动减少或功能障碍会影响肩部的使用<sup>[25]</sup>,最终出现肩无力、肌肉萎缩、活动困难等症状。我国创伤性SCI患者的损伤部位主要是颈椎和胸椎,其中颈椎损伤率为55%,胸椎损伤率为21%<sup>[4]</sup>。颈段和胸段SCI患者可能会丧失手臂和手部的功能,导致生活自理能力下降<sup>[26]</sup>。在传统的康复治疗中,重要的就是进行早期干预,但长时间的重复性动作会使患者感到无聊、失去动力,导致配合度和积极性不高<sup>[19]</sup>。相比之下,VR技术和机器人辅助训练为患者提供了更加激励性的环境,辅助患者执行重复性动作,以促进上肢运动学习,并在患者能力范围内增加训练量<sup>[27]</sup>。据报道<sup>[28]</sup>,VR训练改善了上肢运动功能、肌肉力量、协调控制能力及活动范围,这证明了VR技术促进了SCI患者运动功能的恢复。在一项临床试验中,一名颈段不完全性SCI患者接受了手部功能和握力的半沉浸式VR训练,用Sollerman测试评估恢复效果,治疗7d后,患者右手得分为52,左手得分为60;治疗

70 d后右手得分提高到73,左手得分提高到75,此结果显示,VR技术增加了关节运动范围、促进了手部功能恢复<sup>[29]</sup>。VR技术与常规康复训练联合干预可以更明显地改善手臂、手部的功能,握力和韩国版脊髓独立性测量评分显著提高;且与单独进行常规康复训练相比,联合干预显著增强了握力、肘伸肌力量、腕伸肌力量、外侧捏力和手掌握力,此外,患者可通过显示的分数得到积极反馈,这不仅激发了患者的兴趣,还触发了运动学习过程<sup>[30]</sup>。

下肢运动范围是步态功能的关键决定因素之一,且下肢肌肉力量可能是运动能力的重要决定因素<sup>[31]</sup>,直接影响患者的平衡和步行能力以及生活质量水平等。试验表明,SCI患者在经过VR增强下肢训练后,与改善运动功能相关的特定大脑结构发生了变化,而中枢神经系统内不同区域的结构变化与慢性SCI患者运动功能的改善密切相关<sup>[32]</sup>。VR技术可增强神经康复,促进SCI患者的功能恢复。VR中的视觉反馈可能会激活自上而下的观察、运动想象和感觉运动网络的执行,从而支持功能恢复,而高强度的运动对大脑运动区域的强刺激可能诱发皮质的可塑性变化,在为期一个月的VR增强训练中,患者进行了超过5 000次的踝关节运动,同时保持了高度的积极性、高水平的享受和高度集中的注意力,训练后步态模式、速度、肌肉力量和平衡能力都有了显著改善<sup>[33]</sup>。VR训练可居家或在无人监督的环境下进行,如一名不完全性SCI患者在4周内使用YouKicker系统进行无人监督式VR增强训练,该系统提供了5个VR场景,以此训练坐姿和站姿的足部和腿部运动,包括踝关节背屈、膝关节伸展、腿部伸展或外展,共训练16~20次,每次持续30~45 min,每条腿的重复性训练动作增加了大脑高级运动区域的内部刺激,这可能诱导了可塑性变化,从而增强了患者的下肢肌肉力量和功能性生活,且整体功能评分有所提高,此外,也改善了64%的参与者的踝关节背屈功能,这些变化也许提高了患者的步行速度、稳定性和移动性<sup>[34]</sup>。

#### 4.2 提高平衡和步行功能

SCI后常表现肌力减弱甚至消失、肌张力异常、腱反射异常等,这些导致患者躯干平衡稳定性变差、协调控制能力降低。立位和坐位保持平衡对维持躯干稳定性和步行能力至关重要,而恢复正常的步行能力是康复治疗的重要目标之一。不同的损

伤部位对SCI患者平衡稳定性的影响程度有所不同,如高位胸椎SCI患者相较于低位胸椎SCI患者的动态坐姿稳定性更差<sup>[35]</sup>。VR技术通过视觉反馈在视觉、躯体感觉和前庭信息之间产生冲突,以此训练不同的感觉系统,除此之外,VR系统的反馈可以升级,不断调整难度和任务量,在感觉运动训练过程中挑战患者的静态和动态姿势控制,从而重新训练姿势控制和平衡,这也使其成为老年人群预防跌倒的有效工具<sup>[36]</sup>。站立平衡不佳是导致步行能力受损的主要因素之一,研究发现,半沉浸式VR训练有助于增强患者的平衡信心,显著提高稳定性极限(limit of stability, LOS)测试和Berg平衡量表评分,有效改善慢性不完全性SCI患者的平衡和直立活动以及姿势控制能力<sup>[37]</sup>。此外, Lee等<sup>[38]</sup>研究表明,VR训练与常规康复疗法结合有助于提高SCI患者的坐姿平衡能力,并可能成为促进SCI患者恢复的重要方法之一。VR干预对静、动态平衡以及踢脚速度有积极影响,与干预前相比,参与虚拟足球游戏的不完全性SCI患者在椅子站立测试、“起立—行走”计时测试、10 m步行测试、踢速测试中的表现更优,有效改善了股四头肌功能,这证明了VR在改善不完全性SCI患者平衡、步态功能和踢速方面的有效性<sup>[39]</sup>。踝关节的稳定性对维持平衡和步行能力至关重要,而走在不光滑地面、上下楼梯或运动时,踝关节扭伤的风险增加,导致稳定性变差。而VR技术的应用能改善患者踝关节静、动态平衡的不稳定性,增强患者的平衡感,若在物理治疗师的监督和指导下进行训练,将更高效地发挥VR技术的治疗效果<sup>[40]</sup>。

#### 4.3 缓解疼痛

SCI患者损伤平面以下不仅有感觉和运动功能的缺失,还会出现疼痛的症状。SCI后疼痛人口统计学调查显示,慢性疼痛在SCI患者中几乎普遍存在,其中神经性疼痛是SCI后的主要疼痛类型,约有86%的疼痛患者患有神经性疼痛<sup>[41]</sup>。临床上对SCI后疼痛的治疗常采用物理因子治疗、行为干预等方法<sup>[1]</sup>。而VR技术在缓解患者疼痛方面也显著有效,其通过感官输入把注意力从疼痛中转移到虚拟环境中,从而降低疼痛感<sup>[42-43]</sup>。患者戴上VR眼镜后产生一种虚拟腿部错觉,即将计算机图像中的虚拟腿叠加在患者的真实腿上,同时反复触摸虚拟腿和患者的腿,使患者将虚拟腿误认为是自己的

腿<sup>[18]</sup>;在另一项实验中,受试者佩戴HMD和耳机,坐在椅子上,观察到虚拟腿与真实腿叠加在一起,与此同时,研究者同时触摸受试者的背部及虚拟腿部分,结果受试者感觉到背部和虚拟腿同时被触摸;另外,给予全身错觉试验,用木棍对背部进行刺激,并结合HMD反馈的视频记录,受试者感觉到后背及虚拟身体同时被触摸,随后用9项问卷和7项问卷分别对虚拟腿部错觉和全身错觉进行评估,发现同步视觉和触觉刺激增强了虚幻所有权、触摸觉和牵涉触摸,且当下背部与虚拟腿同步被刺激时,疼痛显著减轻,这可能激活了代表下肢的皮质区域,表明疼痛和多感觉虚拟腿部错觉的潜在中心共同表征<sup>[44]</sup>。与镜像疗法类似,VR技术主要通过视觉捕捉减轻疼痛,恢复身体运动输出和感觉反馈的部分连贯性,并通过提高参与度调节注意力,以达到长期或短期的镇痛作用,副作用最小,且疗程次数增加可增强疼痛缓解效果,因此,VR技术是一种可行的、非药物、非侵入性的缓解SCI后疼痛的替代方案<sup>[45]</sup>。此外,与2D屏幕设备相比,在相同的虚拟环境下,3D头戴式VR更有效地减轻患者疼痛感<sup>[46]</sup>。

#### 4.4 促进认知和精神障碍恢复

SCI患者会存在认知和精神障碍,表现为记忆力、注意力减退及空间失认等,这些功能障碍导致生活方式发生改变,从而出现焦虑、抑郁、失眠、情绪不振等精神症状。约有29%的SCI患者的认知能力下降,SCI后患有认知障碍的风险几乎是正常人的13倍<sup>[47]</sup>,而认知功能障碍会影响恢复效果<sup>[48]</sup>。传统的认知康复训练耗时长,且患者在短时间内无法达到最佳的治疗效果,同时,计算机认知训练缺乏真实的日常生活场景模拟和交互性,从而导致训练所获的技能无法很好地应用于日常生活,而VR技术能有效处理这些问题<sup>[49]</sup>。传统的运动训练和VR训练都能有效促进老年人认知和身体机能恢复,但不同的是运动训练对额叶、颞叶和顶叶区有积极影响,而VR训练对顶叶区有积极作用<sup>[50]</sup>。Maresca等<sup>[51]</sup>对一名不完全性颈椎SCI患者进行两个阶段的治疗,第一个阶段给予常规治疗,包括心理咨询、认知训练(standard cognitive training, SCT)和物理治疗(physical therapy, PT),分别进行72次SCT和72次PT,结果显示,该患者除姿势控制改善以外,仅轻微改善了定向力和情绪,减少了消极想

法;第二个阶段,分别进行36次SCT、36次PT及36次VR训练,结果显示患者的执行能力、注意力、记忆力和空间认知能力得到了显著改善,焦虑和抑郁症状减轻,且整体运动和平衡功能提高了。同样,VR增强训练后,其中7名患者表示在超过一半的训练后情绪有所提升<sup>[33]</sup>。治疗焦虑症常用的暴露疗法要求患者直面想象中的特定刺激,相比之下,VR技术可创建与患者害怕或恐惧结构有关的环境,这种恐惧环境为患者提供了真实体验的机会,以达到激活或修改结构的目的<sup>[52]</sup>。研究表明,VR辅助设备通过吸引患者注意力以缓解紧张情绪,而情绪的改善可能会延长耐力,从而利于患者的心理健康并鼓励患者继续接受治疗<sup>[53]</sup>。

#### 4.5 增强其他功能

高位SCI患者可能会出现呼吸困难、肺通气量下降、咳嗽咳痰、咯痰等肺功能的问题。而VR技术可作为一种切实可靠的肺康复方法,增强肺功能的康复效果,提高呼吸意识和放松技能,也可与生物反馈结合,为不同患者提供特定的呼吸训练以促进身体健康<sup>[54]</sup>。杜宇鹏等<sup>[55]</sup>探究了VR呼吸训练技术对颈椎SCI患者膈肌功能的影响,所有患者均进行常规呼吸功能训练,而试验组在此基础上进行VR呼吸训练,6周后,患者膈肌增厚率及移动度均得到明显提高,其中试验组膈肌增厚率、移动度升高及膈肌动作电位波幅均高于对照组,这表明与传统呼吸训练相比,VR呼吸训练可明显改善颈椎SCI患者膈肌运动功能。对于具有一定活动能力的SCI患者而言,恢复或获得驾驶能力成为满足生活需要的目标,而驾驶对身体状况有一定要求。VR技术可模拟城市和乡村道路、弯路、高速公路、隧道等驾驶环境,提供高效、安全的驾驶技能培训,让患者获得接近现实的驾驶体验,有益于提高驾驶技能、减少对驾驶的恐惧<sup>[56]</sup>。谢君杰等<sup>[57]</sup>应用情景模拟与现实互动康复系统(SilverFit)研究VR技术对SCI截瘫患者功能独立性的影响,通过可视化虚拟场景对胸腰段SCI患者进行轮椅基础训练,结果发现,实验组比对照组训练的疗效更好,提示VR训练能显著提高患者操纵轮椅的能力及功能独立性。综上所述,VR技术在SCI患者治疗中的应用日益广泛且多元化,为患者提供了多样化的选择(表1)。

表1 虚拟现实技术在脊髓损伤患者治疗中的应用

Table 1 Application of virtual reality technology in the treatment of patients with spinal cord injury

Intervention projects	Intervention results	Conclusions	References
VR system and clinical scale assessed patients' upper limb dysfunction.	There was varying correlation between them.	VR technology can be an objective assessment tool.	[21]
VR training of hand function and grip strength.	It improved hand function, range of motion, and muscle power.	VR training can improve upper limb function.	[29]
Unsupervised VR-augmented training.	It improved lower limb muscle strength, balance, and functional mobility.	VR training improves lower limb motor function.	[34]
CG: routine treatment; EG: VR training.	The EG showed superior performance in balance, gait, and kicking speed.	VR technology improves balance and gait function.	[39]
Participants engaged in 2 VR studies(VLI and FBI).	Both were associated with analgesic effects.	VR technology can relieve pain.	[44]
Routine treatment combined with VR training.	It effectively improved motor, balance, and cognitive function, and reduced anxiety and depression.	Combined training effectively improves motor and cognitive recovery.	[51]
CG: routine respiratory training; EG: routine respiratory training combined with VR respiratory training.	The EG significantly improved diaphragmatic thickening rate, mobility, and EMG amplitude.	VR breathing training can effectively improve diaphragmatic function.	[55]

VR: virtual reality; CG: control group; EG: experimental group; VLI: virtual leg illusion; FBI: full body illusion; EMG: electromyography.

#### 4.6 与其他技术的联合应用

与单独使用VR技术相比,和其他技术联合干预的治疗效果可能会更好。研究发现,相较于单独使用VR技术,联合VR技术与经皮神经电刺激干预表现出更好的镇痛效果,更大程度地降低了诱导的事件相关电位(event-related potential, ERP)反应幅度,同时表明镇痛效果可能与转移更多的注意力或调节情绪有关,例如,通过创造更自然和逼真的环境、提供更身临其境的体验,可以增强镇痛效果<sup>[58]</sup>。目前已有将VR技术与生物反馈相结合的系统,如基于VR技术的生物反馈呼吸康复训练系统,该系统通过VR设备和呼吸数据传感器以生物反馈的形式创建交互式虚拟场景,患者通过完成VR场景中的训练任务改善呼吸功能,结果表明,与传统呼吸训练相比,该系统提供了更好的训练效果和体验,使康复训练更加积极<sup>[59]</sup>;此外,VR生物反馈干

预可作为增强传统2D生物反馈治疗焦虑症效果的有效措施<sup>[60]</sup>。交互式控制的虚拟步行系统能提供与运动相关的实时视觉反馈,有研究利用该系统评估了交互式虚拟反馈对SCI患者虚拟步行期间运动想象疗法的影响,结果表明,与单纯的虚拟场景静态演示相比,运动想象的生动性和速度显著提高,因此,交互式虚拟反馈可能会增强SCI后运动想象疗法干预的效果<sup>[61]</sup>,且在结合VR系统的视觉、听觉、触觉和热反馈进行运动想象训练期间,患者表现出高度的舒适体验感<sup>[62]</sup>。对于下肢活动受限、坐轮椅的SCI患者来说,联合VR技术和脑机接口可加强残余的上肢功能,在一定程度上可增强其自主能力,减少对他人的依赖,从而独立完成日常活动<sup>[63]</sup>。因此,VR作为一种新兴且有效的辅助治疗手段,可单独应用,亦可与其他技术联合干预,医生可根据患者实际情况选择适合的训练方案。

## 5 结语与展望

本文主要论述了VR技术在SCI中的应用,研究表明其对患者的评估和治疗有积极影响,其通过虚拟环境改善患者功能障碍、缓解疼痛,提高患者的自理能力和恢复的自信心,使患者重新获得功能独立性,早日回归家庭和社会。VR技术解放了治疗师的双手,减轻了医疗负担,也为居家康复提供了可能性,且危险性较小。与常规治疗相比,VR环境充满趣味,有助于提高患者的配合度和专注度,保证了治疗的效果和依从性。患者训练时可通过实时反馈纠正错误动作,且与其他疗法联合干预的效果更显著。VR技术整合了运动学习原则,通过提供实时多感官反馈、任务多样化、目标进展及以任务为导向的重复训练,诱导神经结构的重组,促进神经损伤后运动功能的恢复<sup>[64]</sup>。此外,VR技术扩展了任务范围,部分自动化和量化了治疗程序,并通过实时任务评估和奖励机制,激发患者的积极性<sup>[24]</sup>。医生可根据患者具体情况设定个性化的VR训练任务,满足不同患者的需求。

当前,国外在神经康复、疼痛康复、心理康复、呼吸康复等领域广泛应用VR技术,且多与其他技术联合使用,在SCI方面的研究主要集中在改善运动功能、缓解疼痛、促进认知功能恢复的作用机制及临床应用,而对SCI后其他功能障碍的研究较少;与国外相比,国内VR技术在康复领域的应用范围近年来不断扩大,主要涉及脑卒中康复、儿童康复、认知康复及心理康复等,但整体普及度较低,且

在SCI患者康复治疗方面的应用研究相对较少。就目前的VR设备来说,成本高,价格昂贵,且部分患者认为VR设备过于沉重,难以达到舒适的效果,因此,导致其使用人群范围缩小。VR技术在临床应用中受医生经验和知识的影响,缺乏使用经验会引起患者及其家属的不信任<sup>[65]</sup>。此外,VR训练侧重于改善特定功能,提高日常生活能力的训练效果有限,且部分SCI患者质疑其治疗效果<sup>[7]</sup>。同时,VR干预可能会引起头晕头痛、恶心呕吐等不良反应。即使VR技术在改善功能障碍和疼痛管理等方面具有明显优势,但当前研究多聚焦在短期效果上,长期效果尚未得到充分体现,且对整体功能影响的研究较少<sup>[66]</sup>。

VR技术在SCI患者的治疗中具有广阔前景,但目前尚未报道VR技术对SCI后其他功能障碍恢复的影响,如膀胱功能障碍、直肠功能障碍等,这值得深入探索。未来研究还应关注VR技术的最佳使用时间和频率、提高患者及家属的接受度、降低成本、减少不良反应及探究长期疗效等。而与VR技术相比,常规治疗方法注重整体康复,通过多种手段促进患者功能障碍的全面恢复,并预防其进一步加重;同时关注患者的心理状态,缓解心理压力、促进心理健康;此外,常规治疗的成本相对较低,且多采用团队协作的方式为患者提供全面、个性化的治疗。因此,VR技术尚不能取代常规治疗方法,但相信随着科学技术的发展,VR技术将更好地应用于疾病治疗中。

### 参考文献

- [1] 刘忠焯,宋文苑,吕小倩,等.脊髓损伤后神经源性膀胱的康复进展[J].系统医学,2024,9(4):184-190.  
Liu ZX, Song WY, Lv XQ, et al. Progress in rehabilitation of neurogenic bladder after spinal cord injury [J]. Syst Med, 2024, 9(4): 184-190.
- [2] 魏延冕,周玫彤.脊髓损伤的中医现代化治疗研究进展[J].中国当代医药,2024,31(13):175-179.  
Wei YM, Zhou MT. Research progress on modernized treatment of spinal cord injury in traditional chinese medicine [J]. Chin Mod Med, 2024, 31(13): 175-179.
- [3] GBD Spinal Cord Injuries Collaborators. Global, regional, and national burden of spinal cord injury, 1990-2019: a systematic analysis for the global burden of disease study 2019 [J]. Lancet Neurol, 2023, 22(11): 1026-1047.
- [4] 张浩,刘宇,肖世宁,等.中国创伤性脊髓损伤患者流行病学特征的Meta分析[J].中国脊柱脊髓杂志,2023,33(5):397-407.  
Zhang H, Liu Y, Xiao SN, et al. Epidemiological characteristics of traumatic spinal cord injury in China: a meta-analysis [J]. Chin J Spine Spinal Cord, 2023, 33(5): 397-407.
- [5] Chi B, Chau B, Yeo E, et al. Virtual reality for spinal cord

- injury-associated neuropathic pain: systematic review[J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2019, 62(1): 49–57.
- [6] Leemhuis E, Esposito RM, De Gennaro L, et al. Go virtual to get real: virtual reality as a resource for spinal cord treatment [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(4): 1819.
- [7] Wang L, Zhang H, Ai H, et al. Effects of virtual reality rehabilitation after spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1): 191.
- [8] Yeo E, Chau B, Chi B, et al. Virtual reality neurorehabilitation for mobility in spinal cord injury: a structured review[J]. *Innov Clin Neurosci*, 2019, 16(1–2): 13–20.
- [9] Abou L, Malala VD, Yarnot R, et al. Effects of virtual reality therapy on gait and balance among individuals with spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2020, 34(5): 375–388.
- [10] Sveistrup H. Motor rehabilitation using virtual reality [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2004, 1(1): 10.
- [11] Prasad S, Aikat R, Labani S, et al. Efficacy of virtual reality in upper limb rehabilitation in patients with spinal cord injury: a pilot randomized controlled trial[J]. *Asian Spine J*, 2018, 12(5): 927–934.
- [12] Drigas A, Sideraki A. Brain neuroplasticity leveraging virtual reality and brain-computer interface technologies [J]. *Sensors*, 2024, 24(17): 5725.
- [13] Kang D, Eun SD, Park J. Pilot study of home-based virtual reality fitness training in post-discharge rehabilitation for patients with spinal cord injury: a randomized double-blind multicenter trial[J]. *Life (Basel)*, 2024, 14(7): 859.
- [14] Georgiev DD, Georgieva I, Gong ZY, et al. Virtual reality for neurorehabilitation and cognitive enhancement[J]. *Brain Sci*, 2021, 11(2): 221.
- [15] August K, Lewis JA, Chandar G, et al. fMRI analysis of neural mechanisms underlying rehabilitation in virtual reality: activating secondary motor areas[J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2006, 2006: 3692–3695.
- [16] Hoffman HG, Richards TL, Van Oostrom T, et al. The analgesic effects of opioids and immersive virtual reality distraction: evidence from subjective and functional brain imaging assessments [J]. *Anesth Analg*, 2007, 105(6): 1776–1783.
- [17] Gustin SM, Bolding M, Willoughby W, et al. Cortical mechanisms underlying immersive interactive virtual walking treatment for amelioration of neuropathic pain after spinal cord injury: findings from a preliminary investigation of thalamic inhibitory function[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(17): 5743.
- [18] Saadon-Grosman N, Arzy S. Virtual reality may relieve pain in patients with spinal cord injury[J]. *Neurology*, 2017, 89(18): e227–e230.
- [19] 杜芊华. 虚拟现实技术在脊髓损伤下肢功能障碍康复中的应用进展[J]. *按摩与康复医学*, 2022, 13(23): 6–10.
- Du QH. Application progress of virtual reality technology in rehabilitation of spinal cord injury with lower limb dysfunction [J]. *Chin Manip Rehabil Med*, 2022, 13(23): 6–10.
- [20] 鲁银山, 朱珊珊, 马思亮. 虚拟现实技术在脊髓损伤康复中的应用进展[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, 41(10): 788–792.
- Lu YS, Zhu SS, Ma SL. Advancements in the application of virtual reality technology in spinal cord injury rehabilitation [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2019, 41(10): 788–792.
- [21] Trincado-Alonso F, Dimbwadyo-Terrer I, De Los Reyes-Guzmán A, et al. Kinematic metrics based on the virtual reality system Toyra as an assessment of the upper limb rehabilitation in people with spinal cord injury [J]. *Biomed Res Int*, 2014, 2014: 904985.
- [22] Liu Q, Song H, Yan M, et al. Virtual reality technology in the detection of mild cognitive impairment: a systematic review and meta-analysis [J]. *Ageing Res Rev*, 2023, 87: 101889.
- [23] Moon S, Huang CK, Sadeghi M, et al. Proof-of-concept of the virtual reality comprehensive balance assessment and training for sensory organization of dynamic postural control [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021, 9: 678006.
- [24] Dimbwadyo-Terrer I, Trincado-Alonso F, De Los Reyes-Guzman A, et al. Upper limb rehabilitation after spinal cord injury: a treatment based on a data glove and an immersive virtual reality environment [J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2016, 11(6): 462–467.
- [25] De Miguel-Rubio A, Muñoz-Pérez L, Alba-Rueda A, et al. A therapeutic approach using the combined application of virtual reality with robotics for the treatment of patients with spinal cord injury: a systematic review[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(14): 8772.
- [26] De Miguel-Rubio A, Rubio MD, Alba-Rueda A, et al. Virtual reality systems for upper limb motor function recovery in patients with spinal cord injury: systematic review and meta-analysis [J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2020, 8(12): e22537.
- [27] Gutiérrez Á, Sepúlveda-Muñoz D, Gil-Agudo Á, et al. Serious game platform with haptic feedback and EMG monitoring for upper limb rehabilitation and smoothness quantification on spinal cord injury patients [J]. *Appl Sci*, 2020, 10(3): 963.

- [28] Kowalczewski J, Chong SL, Galea M, et al. In-home tele-rehabilitation improves tetraplegic hand function [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2011, 25(5): 412-422.
- [29] Al Nattah MMA, Tiberti S, Segaletti L. Semi-immersive virtual reality exercise therapy for upper limb rehabilitation in patients with spinal cord injury using the leap motion controller[J]. *Cureus*, 2024, 16(1): e52261.
- [30] Lim DY, Hwang DM, Cho KH, et al. A fully immersive virtual reality method for upper limb rehabilitation in spinal cord injury[J]. *Ann Rehabil Med*, 2020, 44(4): 311-319.
- [31] Barbeau H, Nadeau S, Garneau C. Physical determinants, emerging concepts, and training approaches in gait of individuals with spinal cord injury[J]. *J neurotrauma*, 2006, 23(3-4): 571-585.
- [32] Villiger M, Grabher P, Hepp-Reymond MC, et al. Relationship between structural brainstem and brain plasticity and lower-limb training in spinal cord injury: a longitudinal pilot study[J]. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 254.
- [33] Villiger M, Bohli D, Kiper D, et al. Virtual reality-augmented neurorehabilitation improves motor function and reduces neuropathic pain in patients with incomplete spinal cord injury[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2013, 27(8): 675-683.
- [34] Villiger M, Liviero J, Awai L, et al. Home-based virtual reality-augmented training improves lower limb muscle strength, balance, and functional mobility following chronic incomplete spinal cord injury [J]. *Front Neurol*, 2017, 8: 635.
- [35] Chen CL, Yeung KT, Bih LI, et al. The relationship between sitting stability and functional performance in patients with paraplegia[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2003, 84(9): 1276-1281.
- [36] Adamovich SV, Fluet GG, Tunik E, et al. Sensorimotor training in virtual reality: a review[J]. *NeuroRehabilitation*, 2009, 25(1): 29-44.
- [37] An CM, Park YH. The effects of semi-immersive virtual reality therapy on standing balance and upright mobility function in individuals with chronic incomplete spinal cord injury: a preliminary study[J]. *J Spinal Cord Med*, 2018, 41(2): 223-229.
- [38] Lee MJ, Lee SM. The effect of virtual reality exercise program on sitting balance ability of spinal cord injury patients [J]. *Healthcare (Basel)*, 2021, 9(2): 183.
- [39] An Y, Park C. The effects of virtual soccer game on balance, gait function, and kick speed in chronic incomplete spinal cord injury: a randomized controlled trial [J]. *Spinal cord*, 2022, 60(6): 504-509.
- [40] Kim KJ, Heo M. Effects of virtual reality programs on balance in functional ankle instability[J]. *J Phys Ther Sci*, 2015, 27(10): 3097-3101.
- [41] Bresnahan JJ, Scoblionko BR, Zorn D, et al. The demographics of pain after spinal cord injury: a survey of our model system[J]. *Spinal Cord Ser Cases*, 2022, 8(1): 14.
- [42] Austin PD, Siddall PJ. Virtual reality for the treatment of neuropathic pain in people with spinal cord injuries: a scoping review[J]. *J Spinal Cord Med*, 2021, 44(1): 8-18.
- [43] 李春海. 虚拟现实技术在脊柱外科的应用[J]. *中山大学学报(医学科学版)*, 2022, 43(1): 35-42.
- Li CH. Application of virtual reality technology in spinal surgery [J]. *J Sun Yat-Sen Univ (Med Sci)*, 2022, 43(1): 35-42.
- [44] Pozeg P, Palluel E, Ronchi R, et al. Virtual reality improves embodiment and neuropathic pain caused by spinal cord injury [J]. *Neurology*, 2017, 89(18): 1894-1903.
- [45] Leemhuis E, Giuffrida V, Giannini AM, et al. A therapeutic matrix: virtual reality as a clinical tool for spinal cord injury-induced neuropathic pain[J]. *Brain Sci*, 2021, 11(9): 1201.
- [46] Austin PD, Craig A, Middleton JW, et al. The short-term effects of head-mounted virtual-reality on neuropathic pain intensity in people with spinal cord injury pain: a randomised cross-over pilot study [J]. *Spinal cord*, 2021, 59(7): 738-746.
- [47] Craig A, Guest R, Tran Y, et al. Cognitive impairment and mood states after spinal cord injury[J]. *J neurotrauma*, 2017, 34(6): 1156-1163.
- [48] Houldsworth C, Nair KPS, Hariharan RP. Cognition and quality of life of people with spinal cord injury [J]. *Prog Rehabil Med*, 2023, 8: 20230001.
- [49] 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.
- Huang H, Jia YB, Shen SY. Research progress of virtual reality technology in cognitive rehabilitation [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2020, 35(2): 244-247.
- [50] Yang JG, Thapa N, Park HJ, et al. Virtual reality and exercise training enhance brain, cognitive, and physical health in older adults with mild cognitive impairment[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(20): 13300.
- [51] Maresca G, Maggio MG, Buda A, et al. A novel use of virtual reality in the treatment of cognitive and motor deficit in spinal cord injury: a case report [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97(50): e13559.
- [52] Maples-Keller JL, Bunnell BE, Kim SJ, et al. The use of virtual reality technology in the treatment of anxiety and other psychiatric disorders [J]. *Harv Rev Psychiatry*, 2017, 25

- (3): 103-113.
- [53] Chen CH, Jeng MC, Fung CP, et al. Psychological benefits of virtual reality for patients in rehabilitation therapy [J]. *J Sport Rehabil*, 2009, 18(2): 258-268.
- [54] Pittara M, Matsangidou M, Pattichis CS. Virtual reality for pulmonary rehabilitation: comprehensive review [J]. *JMIR Rehabil Assist Technol*, 2023, 10: e47114.
- [55] 杜宇鹏, 魏丽, 李晓东, 等. 虚拟现实呼吸训练对颈髓损伤患者膈肌功能影响研究[J]. *中国康复*, 2021, 36(12): 721-724.
- Du YP, Wei L, Li XD, et al. Effect of virtual reality breathing training on diaphragm function in patients with cervical spinal cord injury [J]. *Chin J Rehabil*, 2021, 36(12): 721-724.
- [56] De Miguel-Rubio A, Rascón-Maíz J, Alba-Rueda A, et al. Driving improvement in spinal cord injury patients using virtual reality. systematic review [J]. *Rev Neurol*, 2022, 75(2): 31-40.
- [57] 谢君杰, 杜宇鹏, 庞锦阔, 等. 虚拟现实技术在胸腰段脊髓损伤患者轮椅基础训练中的应用[J]. *浙江中西医结合杂志*, 2017, 27(2): 141-143.
- Xie JJ, Du YP, Pang JK, et al. The application of virtual reality technology in a wheelchair in the basic training in the thoracolumbar spinal cord injury.[J] *Zhejiang J Integr Tradit Chin West Med*, 2017, 27(2): 141-143.
- [58] Bi YZ, Liu X, Zhao XY, et al. Enhancing pain modulation: the efficacy of synchronous combination of virtual reality and transcutaneous electrical nerve stimulation [J]. *Gen Psychiatr*, 2023, 36(6): e101164.
- [59] Shi LJ, Liu F, Liu Y, et al. Biofeedback respiratory rehabilitation training system based on virtual reality technology [J]. *Sensors*, 2023, 23(22): 9025.
- [60] Kothgassner OD, Goreis A, Bauda I, et al. Virtual reality biofeedback interventions for treating anxiety: a systematic review, meta-analysis and future perspective [J]. *Wien Klin Wochenschr*, 2022, 134(Suppl 1): 49-59.
- [61] Roosink M, Robitaille N, Jackson PL, et al. Interactive virtual feedback improves gait motor imagery after spinal cord injury: an exploratory study [J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2016, 34(2): 227-235.
- [62] Pais-Vieira C, Gaspar P, Matos D, et al. Embodiment comfort levels during motor imagery training combined with immersive virtual reality in a spinal cord injury patient [J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 909112.
- [63] De Miguel-Rubio A, Gallego-Aguayo I, De Miguel-Rubio MD, et al. Effectiveness of the combined use of a brain-machine interface system and virtual reality as a therapeutic approach in patients with spinal cord injury: a systematic review [J]. *Healthcare*, 2023, 11(24): 3189.
- [64] Porras DC, Siemonsma P, Inzelberg R, et al. Advantages of virtual reality in the rehabilitation of balance and gait: systematic review [J]. *Neurology*, 2018, 90(22): 1017-1025.
- [65] Cushnan J, Mccafferty P, Best P. Clinicians' perspectives of immersive tools in clinical mental health settings: a systematic scoping review [J]. *BMC Health Serv Res*, 2024, 24(1): 1091.
- [66] Vinciguerra C, Federico A. Virtual rehabilitation in spinal cord injury patients: realities and future perspectives. a systematic review [J]. *Curr Phys Med Rehabil Rep*, 2024, 12(4): 425-434.

(编辑 黄子芸)