

虚拟现实技术在脊髓损伤患者神经源性疼痛中应用的范围综述

高昕¹, 李德胜², 汪利萍³, 钱佳微²

摘要:目的 对虚拟现实技术在脊髓损伤神经源性疼痛患者中应用的相关研究进行范围综述,为未来相关研究和应用提供参考。
方法 遵循JBI范围综述写作指南,系统检索中国知网、万方数据知识服务平台、维普网、PubMed、Cochrane Library、Embase、Web of Science,检索时限为建库至2024年6月11日。由2名研究者独立筛选文献、提取数据。**结果** 共纳入13篇文献。在脊髓损伤神经源性疼痛患者中应用的虚拟现实设备包括2D屏幕、3D屏幕和3D头戴式设备;干预方法包括被动观看虚拟行走视频、主动控制交互式虚拟行走系统、虚拟多感官刺激;每次干预时间6~90 min。干预周期为单次干预至持续12周。13项研究均评价了干预后神经源性疼痛水平,其中10项研究显示虚拟现实技术能够有效减轻患者的疼痛程度。**结论** 虚拟现实技术在脊髓损伤神经源性疼痛患者中应用可行且具有一定积极效果。但存在样本量小、干预时间短、未评价长期效果等缺陷,未来研究应进一步优化干预方案并探索长期效果,为疼痛管理提供更为有效和规范的干预方案。

关键词: 脊髓损伤; 神经源性疼痛; 虚拟现实技术; 虚拟行走; 疼痛; 引导想象训练; 范围综述

中图分类号:R473.6;TP399 DOI:10.3870/j.issn.1001-4152.2025.24.028

Virtual reality for spinal cord injury-associated neuropathic pain: a scoping review

Gao Xin, Li Desheng, Wang Liping, Qian Jiawei. Nursing Department, The First Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310006, China

Abstract. Objective To conduct a scoping review on the application of virtual reality (VR) for managing neuropathic pain in individuals with spinal cord injury, aiming to provide a reference for future research and clinical practice. **Methods** Guided by the Joanna Briggs Institutes (JBI) Scoping Review Methodology, articles were searched in CNKI, Wanfang Data, VIP, PubMed, Cochrane Library, Embase, and Web of Science, from inception to June 11, 2024. Two researchers independently screened the literature and extracted data. **Results** A total of 13 articles were included. The VR devices employed were 2D screens, 3D screens, and 3D head-mounted displays. Interventions included virtual walking, VR-augmented training, and virtual multisensory stimulation. Session durations ranged from 6 to 90 minutes, and the total intervention periods varied from a single session to 12 weeks. All 13 studies assessed neuropathic pain post-intervention, with 10 reporting significant reductions in pain intensity following VR therapy.

Conclusion VR technology is a feasible and potentially beneficial intervention for neuropathic pain after SCI. However, the current evidence is limited by small sample sizes, short-term interventions, and a lack of long-term efficacy evaluation. Future studies should focus on optimizing VR protocols and rigorously investigating their long-term effects to establish more effective and standardized pain management strategies.

Keywords: spinal cord injury; neuropathic pain; virtual reality; virtual walking; pain; imagery training; scoping review

神经源性疼痛是脊髓损伤患者最常见且难以治疗的并发症之一^[1-2]。2019年数据显示,全球共有2 060万例脊髓损伤患者,其中38%~70%患者存在神经源性疼痛,且患者数量呈逐年增加的趋势^[3]。脊髓损伤神经源性疼痛的主要表现为自发性弥漫性疼痛、触诱发疼痛、烧灼感或刀割样剧痛,致病机制复杂,涉及小胶质细胞和星形胶质细胞异常活化、炎症级联反应激活、神经递质失调等^[4-5]。不仅显著影响患者睡眠、降低生活质量,还会加重抑郁、焦虑、悲伤等负性情绪,增加社会和医疗系统成本^[6]。目前,

作者单位:浙江大学医学院附属第一医院 1. 护理部 2. 急诊监护室 3. 急诊科(浙江 杭州,310006)

通信作者:钱佳微,jiaweiqian@outlook.com

高昕:女,本科,主管护师,14932475@qq.com

科研项目:浙江省医药卫生科技计划项目(2023KY690)

收稿:2025-07-12;修回:2025-09-21

脊髓损伤神经源性疼痛的治疗以药物为主,但治疗效果不甚理想,有效率仅为7.1%,且常伴有较多不良反应^[7]。近年来研究显示,理疗、神经调控、虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术等非药物干预方法可通过多种机制作用于神经系统以缓解疼痛,减少患者药物依赖性并改善生活质量,逐渐成为脊髓损伤神经源性疼痛治疗的重要补充手段^[8]。VR技术通过沉浸式的虚拟环境和多感官交互为患者提供独特的康复治疗体验,在调控神经系统功能、缓解疼痛感知方面具有显著潜力^[9]。尽管近年来VR相关文献逐渐增多,但各研究设计异质性较高、方法多样,且VR技术在脊髓损伤神经源性疼痛患者中的具体干预方案、干预效果及评价体系等尚缺乏系统的总结和明确的方向。范围综述^[10]是一种系统性文献综述方法,通常用于分析某一特定主题或研究领域的现有研究成果,进而明确该领域的研究现状、研究方

法、研究重点以及未来研究方向,已受到越来越多的认可和应用。本研究拟通过范围综述,系统梳理 VR 技术在脊髓损伤患者神经源性疼痛中的应用现况,探讨其干预内容、主要结果及评价工具等,为未来相关研究与临床实践提供参考。

1 资料与方法

以 JBI 提出的范围综述写作指南^[10]作为方法学框架。

1.1 研究问题 经过文献查阅和小组讨论,确定本研究主要问题:VR 技术在脊髓损伤患者神经源性疼痛中的应用现状、VR 干预内容、主要结果、评价工具等。

1.2 文献检索 检索数据库包括:PubMed、Cochrane Library、Embase、Web of Science、中国知网、万方数据知识服务平台、维普网 7 个数据库,以主题词与自由词结合检索。英文检索词及检索表达式以 PubMed 为例:(spinal cord injury[Mesh terms] OR spinal cord trauma[All fields]) AND (virtual reality[Mesh terms] OR virtual environment[All fields] OR virtual rehabilitation[All fields] OR virtual game[All fields] OR virtual therapy[All fields] OR VR[All fields]) AND (pain[Mesh terms] OR neurological pain[All fields])。中文检索词包括:脊髓创伤,脊髓损伤,SCI;虚拟游戏,虚拟现实,虚拟环境,虚拟现实技术,VR,VR 技术;疼痛,神经疼痛,神经源性疼痛。检索时间设置为自建库起至 2024 年 6 月 11 日。

1.3 文献纳入与排除标准 纳入标准:①研究对象

为脊髓损伤患者;②研究内容为 VR 技术在脊髓损伤患者神经源性疼痛中的应用,并涵盖具体干预内容的描述;③文献类型包括随机对照试验、类实验研究、队列研究、病例对照研究、质性研究和案例报告。排除标准:①VR 技术的开发与设计研究;②非中英文文献;③重复发表或无法获得全文的文献;④综述性论文、动物实验、研究计划书、指南、意见和政策性文件等。

1.4 文献筛选与资料提取 将检索得到的文献导入 Endnote X7 软件进行去重处理。随后,由 2 名研究者根据纳入与排除标准对文献进行初筛。首先阅读文献的标题和摘要,符合条件的文献则下载后进行全文阅读。2 名研究者一致同意的文献直接纳入,若存在分歧,则由课题负责人协助判断。最终,从纳入的文献中提取相关信息,包括第一作者、国家/地区、文献类型、研究对象年龄、样本量、干预方法、干预时间、评价工具、主要结果等。

2 结果

2.1 文献筛选结果 共检索出文献 239 篇,其中 PubMed 54 篇、Cochrane Library 33 篇、Embase 77 篇、Web of Science 68 篇、中国知网 1 篇、万方数据知识服务平台 5 篇和维普网 1 篇。去除 77 篇重复文献后获得 162 篇,通过阅读题目、摘要后,初步剔除 145 篇不符合研究主题的文献,剩余 17 篇,全文下载及阅读后,排除 4 篇(未提供相关干预具体内容 2 篇,文献数据重复发表 1 篇,无全文 1 篇),最终纳入 13 篇文献^[11-23]。

2.2 纳入文献的基本特征 见表 1。

表 1 纳入文献的基本特征

第一作者	国家	研究类型	年龄 (岁)	样本量	VR 交互 界面	干预方法	干预时间	评价工具	主要结果
Moseley ^[11]	英国	类实验 研究	24~45	5	2D 屏幕	观看虚拟行走视频,引导想象,观看动画喜剧电影	3 种干预方法 各 10 min, 1 次/d, 持续 15 d	①②	疼痛改善幅度和疼痛感恢复到干预前所经历时间:虚拟行走>引导想象>观看电影
Villiger 等 ^[12]	瑞士	类实验 研究	28~71	14	2D 屏幕	增强现实技术支持下的交互式下肢治疗系统(包括 4 种游戏),通过腿部动作传感器控制虚拟下肢	45 min/次, 4~5 次/周, 持续 4 周	③④⑤ ⑥⑦⑧ ⑨	下肢行走能力、平衡和肌肉力量均得到提高,疼痛程度和不愉快感受减轻
Katayama 等 ^[13]	日本	个案报告	22	1	2D 屏幕	患者身体站立呈 75° 角观看他人肢体行走/活动投影,配合想象,在虚拟视觉反馈下进行虚拟行走	10 min/次, 3 次/周, 持续 12 周	②	干预后疼痛水平较前降低
Jordan 等 ^[14]	西班牙	类实验 研究	47.5*	15	3D 屏幕	观看虚拟步行视频,想象自己在行走	单次干预 20 min	⑩	干预后疼痛水平大幅下降
Roosink 等 ^[15]	加拿大	类实验 研究	47~72	9	3D 屏幕	患者通过挥动手臂实时控制 4 种运动意向(如与“化身”向前或向后行走),以执行交互式虚拟行走,虚拟步行速度与动作同步	90 min/次, 共 2 次, 间隔 1 周	⑪⑫⑬	干预后运动意向和反应速度明显提高,费力程度显著降低,焦虑抑郁情绪轻微缓解,但未观察到疼痛的变化,无不良反应发生
Pozeg 等 ^[16]	瑞士	随机交 叉试验	44~71	20/20	3D 头戴 式设备	通过虚拟多感官刺激诱导身体归属感,产生虚拟腿部错觉及全身错觉	不同条件下(同步/异步、背部位置等)各刺激持续 1 min, 共干预 6 min, 干预 1 次	②③④ ⑮⑯	腿部归属感有较弱的改善,但对整体身体归属感基本无影响;对疼痛的改善效果不显著

续表 1 纳入文献的基本特征

第一作者	国家	研究类型	年龄 (岁)	样本量	VR 交互 界面	干预方法	干预时间	评价工具	主要结果
Richardson 等 ^[17]	美国	随机对照试验	19~69	30/29	3D 屏幕	观看虚拟行走和虚拟轮椅运动视频	单次 20 min, 干预 1 次	⑦⑩⑪	干预后, 接受虚拟行走干预的患者疼痛严重程度评分显著降低, 虚拟轮椅干预的患者变化不显著; 两组神经性疼痛强度(即对疼痛的总体感受)无明显改善
Austin 等 ^[18]	澳大利亚	随机交叉试验	54.3 [*]	16	3D 头戴式设备、2D 屏幕	交替使用 3D 头戴式设备和 2D 屏幕观看模拟在自然环境中行走的视频	各 15 min, 两种干预之间间隔 60 min, 干预 1 次	⑪⑬⑯	有效降低疼痛强度、提高感知存在水平, 但对焦虑抑郁情绪无明显影响
Azurdia 等 ^[19]	美国	混合方法研究	43.3 [*]	11	3D 头戴式设备	观看虚拟自然场景视频, 利用手臂肌力测力仪执行虚拟行走(运动与 VR 场景非同步)	6 min, 干预 1 次	⑩⑪⑫	可减轻疼痛感与疲劳程度
Putrino 等 ^[20]	美国	类实验研究	44~71	8	3D 头戴式设备	观看虚拟自然风景, 根据躯体指令进行虚拟的上肢和下肢运动	两种干预方法各 10 min, 干预 1 次	⑪⑬⑯	干预后疼痛水平显著降低, 且沉浸感与干预效果呈正比
Tran 等 ^[21]	澳大利亚	随机交叉试验	56.0 [*]	17	3D 头戴式设备、2D 屏幕	在无任务条件下观看自然场景	2D 和 3D 依次进行, 每次 15 min, 两种干预之间间隔 60 min, 干预 1 次	⑪⑯	有效降低疼痛水平, 同时伴随大脑脑电图活动的有益改变
Trost 等 ^[22]	美国	类实验研究	23~70	10/17	3D 头戴式设备、2D 屏幕	交互式(使用空间定位手柄主动控制虚拟步行、探索、捡金币等游戏)与非交互式(观看视频)虚拟行走	每次 30 min, 连续 10 d	⑦⑩⑪⑯	交互组在干预后疼痛水平、疼痛对日常活动的干扰程度显著下降; 同时负性情绪也得到有效缓解; 治疗安全性好, 依从性高
吉海波等 ^[23]	中国	随机对照试验	≥18	31/31	3D 头戴式设备	观看虚拟行走和虚拟轮椅运动视频	每次 30 min, 持续 6 周	⑩⑪⑬⑯	与自身干预前及虚拟轮椅相比, 虚拟行走有效缓解患者的疼痛程度和不良情绪, 有效改善睡眠障碍

注: * 平均年龄。评价工具: ①麦吉尔疼痛问卷(McGill Pain Questionnaire); ②疼痛视觉模拟量表(Visual Analogue Scale); ③10 米步行试验(Ten-Meter Walking Test); ④贝格平衡量表(Berg Balance Scale); ⑤脊髓损伤独立能力评估(Spinal Cord Independence Measure); ⑥脊髓损伤步行指数Ⅱ(Walking Index for Spinal Cord Injury Ⅱ); ⑦神经源性疼痛量表(Neuropathic Pain Scale); ⑧患者总体印象变化(Patients' Global Impression of Change); ⑨3D 运动分析系统(3D Motion Analysis System); ⑩数字疼痛等级量表(Numeric Pain Rating Scale); ⑪ASIA 损伤量表(ASIA Impairment Scale); ⑫医院焦虑和抑郁量表(Hospital Anxiety and Depression Scale); ⑬动觉和视觉意象问卷(Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire); ⑭改良版身体幻觉问卷(Modified Body Perception Questionnaire); ⑮虚拟身体所有权问卷(Virtual Body Ownership Questionnaire); ⑯剑桥去人格化量表(Cambridge Depersonalization Scale); ⑰多维人格问卷沉浸性量表-简表(Absorption Scale of the Multidimensional Personality Questionnaire-Brief Form); ⑱抑郁焦虑压力量表(Depression Anxiety Stress Scale); ⑲iGroup 存在问卷(iGroup Presence Questionnaire); ⑳疼痛自我效能问卷(Pain Self-Efficacy Questionnaire); ㉑疲劳严重程度量表(Fatigue Severity Scale); ㉒疲劳评估量表(Fatigue Assessment Scale); ㉓沉浸倾向问卷(Immersive Tendencies Questionnaire); ㉔网络心理实验室版存在问卷(Cyberpsychology Lab version of the Presence Questionnaire); ㉕与疼痛相关的脑电图(EEG)模式; ㉖积极和消极情绪表(Positive and Negative Affect Schedule); ㉗患者健康问卷(Patient Health Questionnaire-9); ㉘治疗评价量表(Treatment Evaluation Inventory); ㉙神经病理性疼痛症状问卷(Neuro-pathic Pain Symptoms Inventory); ㉚焦虑自评量表(Self-rating Anxiety Scale); ㉛抑郁自评量表(Self-rating Depression scale); ㉜匹兹堡睡眠质量指数量表(Pittsburgh Sleep Quality Index)。

2.3 VR 技术干预的具体内容

2.3.1 VR 技术的设备类型和人机互动方式 本次纳入的研究中, 3 项研究^[11~13] 仅采用 2D 屏幕, 7 项研究^[14~17, 19~20, 23] 仅采用 3D 设备, 3 项研究^[18, 21~22] 采用 3D 和 2D 联合使用的方式, 共 7 项研究^[16, 18~23] 使用头戴式交互界面。人机互动方式, 大多数研究采用患者观看 VR 设备提供的虚拟形象化身或轮椅行走视频, 同时想象自己能行走来完成人机互动; 仅 3 项研究^[12, 15, 22] 使用交互式虚拟行走系统, 即用户通过动作捕捉设备(如手柄、体感传感器、惯性测量单元、摄像头)主动驱动虚拟环境中的行走活动, 如通过挥动手臂、摆动上肢等活动驱使虚拟人物行走。

2.3.2 VR 技术干预时间 11 项研究将单次 VR 干预时间控制在 30 min 内, 1 项研究^[12] 单次干预时间为 45 min, 1 项研究^[15] 干预时间为 90 min。3 项研

究^[11, 22~23] 干预频率为每天 1 次, 持续时间分别为 15 d、10 d 和 6 周; 2 项研究^[12~13] 为 3~5 次/周, 持续时间分别为 4 周、12 周; 1 项研究^[15] 干预 2 次, 间隔 1 周; 其余研究均为单次干预。从周期上看, 干预持续最长的为 Katayama 等^[13] 的研究, 持续 12 周; 其次为吉海波等^[23] 和 Villiger 等^[12] 的研究, 分别为 6 周和 4 周。

2.4 VR 技术应用的效果评价 本次纳入文献对干预效果的评价指标主要涉及疼痛程度、心理状态、感知体验、运动功能 4 个方面。疼痛程度评估是干预效果评价最为重要的结局指标, 13 项研究均评价了干预后神经源性疼痛水平, 相关评估量表包括数字疼痛等级量表、疼痛视觉模拟量表、麦吉尔疼痛问卷等。在疼痛缓解效果方面, 1 项研究^[15] 显示无改变, 2 项研究^[16~17] 认为有效性尚不明确, 其余 10 项研究显示使用 VR 技术能够在一定程度上减轻患者的疼痛

痛感受。共有 4 项研究报告了 VR 技术干预对患者负性情绪的影响,主要采用医院焦虑抑郁量表、焦虑自评量表和抑郁自评量表等,其中 1 项研究^[15]显示 VR 技术干预能轻微改善焦虑抑郁症状,1 项研究^[18]显示无明显改变,2 项研究^[22-23]显示有效改善。此外,分别有 1 项研究显示 VR 技术明显改善患者疲劳^[19]、睡眠^[23],所使用的评估工具分别为疲劳评估量表和匹兹堡睡眠质量指数量表。1 项研究^[12]结果显示,VR 技术对患者运动功能也有改善效果,所用量表有 10 米步行试验、脊髓损伤独立能力评估、脊髓损伤步行指数Ⅱ等。所有研究均无不良事件发生且具有较高接受度,仅 1 项研究^[11]报告 1 例患者在参与过程中因感到痛苦而退出虚拟行走部分,但仍坚持参加了其余干预内容。

3 讨论

3.1 VR 技术通过多种设备与互动方式为脊髓损伤神经源性疼痛患者提供灵活高效的干预方案 随着数字化智能产品的不断发展和应用,VR 技术在疼痛管理领域的应用已经成为当前研究热点。本研究结果显示,VR 技术的设备类型有 2D 屏幕、3D 屏幕和 3D 头戴式设备。研究表明,头戴设备的高沉浸感通过增强患者的视觉、听觉和交互反馈,可更有效地激发大脑的运动想象和中枢神经调节机制^[24]。然而,部分人群可能无法很好地适应头戴式设备,而 2D 屏幕尽管沉浸感较低,但不适反应较少、技术要求较低且便于操作,因此可以灵活组合不同显示形式,在患者适应性和技术性能之间取得一定平衡^[25]。本研究显示,目前 VR 人机互动方式较为丰富多样,涵盖被动观看虚拟化身/场景、交互式虚拟行走系统、多感官刺激系统等多种模式,展现了 VR 技术独有的干预潜力。尤其是交互式虚拟行走系统,可根据患者脊髓损伤平面和程度,通过挥动手臂、摆动上肢或下肢残留运动来主动操控系统,有效诱导患者产生对虚拟身体的所有权和代理错觉,重建瘫痪下肢的运动体验^[26];而基于视觉触觉刺激的多感官整合刺激系统,可通过刺激大脑顶叶、体感皮层、颞上沟等区域链接特有感受,进而增强脊髓损伤患者对虚拟身体的感知能力^[27]。此外,脊髓损伤患者神经源性疼痛 VR 技术干预方案也各不相同,在设备类型、人机互动方式、干预频率和干预周期等多个要素的选取上均体现 VR 技术应用的灵活性和个性化定制特点。后期临床应用时,可根据患者脊髓受损程度、残存运动能力、心理情绪状况等制订更为精准的干预方案,通过技术整合实现协同增效,以获得更为理想的干预效果。

3.2 VR 技术短期内可有效缓解脊髓损伤患者疼痛,但仍需探索远期疼痛改善效果 本次纳入的 10 项研究显示,VR 技术在脊髓损伤患者神经源性疼痛管理方面展现了较为显著的干预效果,其结论通过多个权

威的疼痛评估工具证实。Tong 等^[28] 研究显示,VR 技术能通过沉浸式环境分散患者对疼痛的注意力,改变患者的疼痛感知和认知体验。这可能是由于 VR 训练可以调节岛叶、体感区等疼痛相关脑区活动,进而减少疼痛感知,并帮助患者重新建立对身体的控制感,降低对疼痛的恐惧、焦虑和预期,从而减轻疼痛程度^[29]。然而,个体差异性依然是影响 VR 干预效果的重要因素,如 Moseley^[11] 报告 1 例患者在参与过程中因感到痛苦而退出虚拟行走。同时,当前的研究干预时间普遍较短,大多数研究仅干预 1 次,各个研究之间干预设备、疗程差异较大,其研究结果存在较大异质性,不利于临床推广应用。未来需进一步探索 VR 技术对不同类型脊髓损伤神经源性疼痛患者的分层干预效果,扩大样本量并增加干预方案的可比性,以利于循证证据总结。此外,现有研究主要关注短期干预效果,VR 技术在远期疼痛管理中的作用尚不明确,未来研究应通过长时程跟踪随访,评估其对神经性疼痛的长期应用价值。

3.3 VR 技术在脊髓损伤神经源性疼痛患者中应用的研究方向 沉浸感和参与感是 VR 干预的重要特性,不同类型的沉浸感可以带来不同的应用效果,而更深层次的沉浸感可以为用户提供更为真实的体验^[30]。然而,目前 VR 沉浸感与干预效果的关系探讨相对不足,仅 1 项研究^[20] 报道沉浸感与干预效果呈正比,其作用机制还需进一步明确。研究指出,VR 技术通过沉浸式体验和高互动性设计,为患者提供了脱离现实压力的虚拟环境,有助于缓解心理负担,同时增强患者的自我效能感,帮助其重建对身体功能的信心,进而带来更积极的康复体验^[30]。然而本次纳入的 4 项研究^[15,18,22-23] 显示,VR 干预对脊髓损伤神经源性疼痛患者焦虑抑郁症状效果不一致,这可能与样本量较小、干预次数有限、干预时间过短等因素有关。VR 技术对脊髓损伤神经源性疼痛患者负性情绪的改善效果仍需进一步探讨。此外,尽管已有研究证实 VR 技术在改善脊髓损伤患者运动功能方面具有一定效果^[12],但其运动能力改善与疼痛控制之间的关联性研究相对缺乏,应进一步探索评估运动能力改变对神经源性疼痛的影响。

4 小结

VR 技术可通过高沉浸感和多样化的人机交互方式,在缓解脊髓损伤患者神经源性疼痛方面具有较好的应用前景。多种设备的灵活组合应用,有效提升了患者的沉浸体验,但仍需进一步避免潜在的不适反应,提高用户的使用体验。同时,目前评价指标体系尚不完善,研究多集中于疼痛缓解,对患者心理状态、沉浸感知和运动功能的评估相对不足,且高质量长期随访数据仍较匮乏。未来研究应进一步优化干预方案,构建更全面的评价框架,并探索长期应用效果,为脊髓损伤患者的康复提供更为有效和规范的干预方案。

参考文献:

- [1] Chang F, Zhang Q, Xie H, et al. Effects of a rehabilitation program for individuals with chronic spinal cord injury in Shanghai, China[J]. *BMC Health Serv Res*, 2020, 20:1-10.
- [2] 王春霞,卢晓霞,李静,等.脊髓损伤神经源性肠道功能障碍患者经肛门灌洗的效果[J]. *护理学杂志*, 2024, 39(12):44-46.
- [3] Ding W, Hu S, Wang P, et al. Spinal cord injury: the global incidence, prevalence, and disability from the Global Burden of Disease Study 2019[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2022, 47(21):1532-1540.
- [4] Treede R D, Jensen T S, Campbell J N, et al. Neuropathic pain: redefinition and a grading system for clinical and research purposes[J]. *Neurology*, 2008, 70(18):1630-1635.
- [5] 李泽琴,王茂源,潘韵竹,等.脊髓损伤后神经病理性疼痛的病理生理机制研究进展[J]. *中华创伤杂志*, 2024, 40(10):938-946.
- [6] Reid K F, Storer T W, Pencina K M, et al. A multimodality intervention to improve musculoskeletal health, function, metabolism, and well-being in spinal cord injury: study protocol for the FIT-SCI randomized controlled trial[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2022, 23(1):1-12.
- [7] Maher D P, Wong C H, Siah K W, et al. Estimates of probabilities of successful development of pain medications: an analysis of pharmaceutical clinical development programs from 2000 to 2020[J]. *Anesthesiology*, 2022, 137(2):243-251.
- [8] Eller O C, Willits A B, Young E E, et al. Pharmacological and non-pharmacological therapeutic interventions for the treatment of spinal cord injury-induced pain[J]. *Front Pain Res*, 2022, 3:991736.
- [9] 任雅钰,高春华,卢芳燕,等.虚拟现实技术在癌症患者心理干预中应用的范围综述[J]. *中华护理杂志*, 2025, 60(4):486-492.
- [10] Lockwood C, Dos Santos K B, Pap R. Practical guidance for knowledge synthesis: scoping review methods [J]. *Asian Nurs Res (Korean Soc Nurs Sci)*, 2019, 13(5):287-294.
- [11] Moseley G L. Using visual illusion to reduce at-level neuropathic pain in paraplegia[J]. *Pain*, 2007, 130(3):294-298.
- [12] 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.
- [13] Katayama O, Iki H, Sawa S, et al. The effect of virtual visual feedback on supernumerary phantom limb pain in a patient with high cervical cord injury: a single-case design study[J]. *Neurocase*, 2015, 21(6):786-792.
- [14] Jordan M, Richardson E J. Effects of virtual walking treatment on spinal cord injury-related neuropathic pain: pilot results and trends related to location of pain and at-level neuronal hypersensitivity[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2016, 95(5):390-396.
- [15] Roosink M, Robitaille N, Jackson P L, 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.
- [16] 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.
- [17] Richardson E J, McKinley E C, Rahman A, et al. Effects of virtual walking on spinal cord injury-related neuropathic pain: a randomized, controlled trial[J]. *Rehabil Psychol*, 2019, 64(1):13-24.
- [18] Austin P D, Craig A, Middleton J W, 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.
- [19] Azurdia D, Acuña S M, Narasaki-Jara M, et al. Effects of virtual reality-based aerobic exercise on perceptions of pain and fatigue in individuals with spinal cord injury[J]. *Games Health J*, 2022, 11(4):236-241.
- [20] Putrino D, Tabacof L, Breyman E, et al. Pain reduction after short exposure to virtual reality environments in people with spinal cord injury[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(17):8923.
- [21] Tran Y, Austin P, Lo C, et al. An exploratory EEG analysis on the effects of virtual reality in people with neuropathic pain following spinal cord injury[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022, 22(7):2629.
- [22] Trost Z, Anam M, Seward J, et al. Immersive interactive virtual walking reduces neuropathic pain in spinal cord injury: findings from a preliminary investigation of feasibility and clinical efficacy[J]. *Pain*, 2022, 163(2):350-361.
- [23] 吉海波,李永奎,邢叔星.虚拟行走对脊髓损伤相关神经病理性疼痛的影响[J]. *颈腰痛杂志*, 2022, 43(3):398-400.
- [24] Mor S, Botella C, Campos D, et al. An internet-based treatment for flying phobia using 360° images: a feasibility pilot study[J]. *Internet Interv*, 2022, 28:100510.
- [25] Goyal C, Vardhan V, Naqvi W. Non-immersive virtual reality as an intervention for improving hand function and functional independence in children with unilateral cerebral palsy: a feasibility study[J]. *Cureus*, 2022, 14(6):e26085.
- [26] Domna B, Sameer K, Mel S. Virtually being einstein results in an improvement in cognitive task performance and a decrease in age bias[J]. *Front Psychol*, 2018, 9:917.
- [27] Bensmaia S J, Killebrew J H, Craig J. Influence of visual motion on tactile motion perception[J]. *J Neurophysiol*, 2006, 96(3):1625-1637.
- [28] Tong X, Wang X, Cai Y, et al. "I Dreamed of My Hands and Arms Moving Again": a case series investigating the effect of immersive virtual reality on phantom limb pain alleviation[J]. *Front Neurol*, 2020, 11:876.
- [29] Lee S Y, Cha J Y, Yoo J W, et al. Effect of the application of virtual reality on pain reduction and cerebral blood flow in robot-assisted gait training in burn patients [J]. *J Clin Med*, 2022, 11(13):3762.
- [30] Chuan A, Zhou J J, Hou R M, et al. Virtual reality for acute and chronic pain management in adult patients: a narrative review[J]. *Anaesthesia*, 2021, 76(5):695-704.