

虚拟现实技术在疼痛治疗领域的研究进展

吴辰¹, 张丽¹, 马超^{2,3}, 刘红菊⁴, 刘栩铭¹, 张珂浦¹, 王腾梯¹

¹首都医科大学附属北京友谊医院麻醉科, 北京 100050

²中国医学科学院基础医学研究所 北京协和医学院基础学院人体解剖与组织胚胎学系, 北京 100005

³北京协和医学院麻醉-疼痛联合实验室, 北京 100730

⁴中国医学科学院北京协和医院麻醉科, 北京 100730

通信作者: 张丽, E-mail: zhangli8828@163.com

【摘要】疼痛问题不仅影响个人的身心健康, 更对社会造成巨大负担。传统的疼痛治疗措施种类繁多, 但各具有其局限性。目前, 数字疗法正蓬勃发展, 其中虚拟现实技术得到了广泛应用, 尤其在疼痛治疗领域展现出较大潜力。虚拟现实技术借助头戴式设备等辅助工具, 为使用者构建一个视觉、听觉、嗅觉等多感官参与的三维虚拟世界, 从而让使用者产生一种身临其境的感觉。本文围绕虚拟现实技术在疼痛治疗领域的应用及其作用机制进行阐述, 以期提高临床医护人员认识, 为疼痛治疗提供新选择。

【关键词】疼痛; 慢性疼痛; 虚拟现实技术; 数字疗法

【中图分类号】 R614; R441.1 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1674-9081(2024)02-0272-07

DOI: 10.12290/xhyxzz.2023-0519

Advances of Virtual Reality in the Field of Pain Treatment

WU Chen¹, ZHANG Li¹, MA Chao^{2,3}, LIU Hongju⁴, LIU Xuming¹, ZHANG Kepu¹, WANG Tengti¹

¹Department of Anesthesiology, Beijing Friendship Hospital, Capital Medical University, Beijing 100050, China

²Institute of Basic Medicine, Chinese Academy of Medical Sciences, Department of Human Anatomy, School of Basic Medicine, Peking Union Medical College, Beijing 100005, China

³Histology and Embryology Anesthesia-Pain Joint Laboratory of Peking Union Medical College, Beijing 100730, China

⁴Department of Anesthesiology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100730, China

Corresponding author: ZHANG Li, E-mail: zhangli8828@163.com

【Abstract】 Pain not only affects the physical and mental health of individuals, but also imposes a huge burden on society as a whole. Traditional pain management measures are diverse, but each has its limitations. Therefore, there is an urgent need for new tools. Digital therapies are booming, and virtual reality (VR) has been widely used, especially in the field of pain management. VR uses assistive tools, such as headsets, to build a three-dimensional virtual world with the participation of multiple senses, including vision, hearing, and smell, so that it can make user feel being there. This review aims to summarize the application and mechanism of VR in the field of pain management, with the hope of making VR a new choice for pain management.

【Key words】 pain; chronic pain; virtual reality; digital therapeutics

Med J PUMCH, 2024, 15(2):272-278

疼痛问题不仅影响个人的身心健康,更对整个社会造成巨大的经济负担。传统的疼痛治疗措施种类繁多,但各具有其局限性。因此,亟待新兴的治疗手段从新的角度完善疼痛的综合管理。如今数字疗法(digital therapeutics, DTx)正蓬勃发展,其中虚拟现实(virtual reality, VR)技术得以广泛应用,尤其在疼痛治疗领域展现出较大的发展潜力。VR借助头戴式设备等辅助工具,为使用者构建一个视觉、听觉、嗅觉等多感官参与的三维虚拟世界,从而使其产生一种身临其境的感觉。本文围绕VR在疼痛治疗领域的应用及其作用机制进行阐述,以期提高临床医护人员对VR的认识,为疼痛治疗提供新的选择。

1 疼痛治疗现状

据统计,全球约20%的人正在经历慢性疼痛的困扰。在中国,慢性疼痛的患病率高达30%^[1-2]。在患者众多就医原因中,位居前10位的骨关节炎、背部疼痛和头痛均与疼痛相关^[3];在致残原因中,其中3项(背部疼痛、骨骼肌肉疾病和颈部疼痛)与疼痛相关。由于我国幅员辽阔、人口众多,不同地区的经济发展水平、地理环境因素、居民生活方式、医疗发展水平等参差不齐。因此,我国慢性疼痛的管理仍存在与经济发展水平相关、地区差异较大的问题^[2]。

一项针对我国慢性疼痛的调查研究显示,在31个省份的9298名参与者中,慢性疼痛的患病率高达31.54%,但近1/4的患者从未因慢性疼痛而就诊,其中36.78%的患者甚至从未接受过针对性治疗^[4]。该调查反映出我国对于慢性疼痛的认识水平仍存在欠缺,治疗手段也相对匮乏。在接受治疗的人群中,大多数患者选择传统的治疗手段如按摩、拔罐、药物治疗或外科手术^[4],这些治疗方法往往采用包括阿片类在内的药物和医疗器械进行干预。但对于慢性疼痛,这些措施的治疗效果不稳定且不理想,无法彻底缓解症状。因此,亟需探究新的治疗措施,DTx和VR应运而生。

2 DTx与VR

2.1 DTx发展现状

随着科学技术的快速发展,以人工智能为代表的新技术革命正引领全球进入新一轮的创新浪潮。因此,人们开始思考如何将科学技术融入医疗领域,从

而达到改善目前医疗环境的目的。在此环境下,DTx概念诞生。

DTx是近年来医疗与科技领域的新兴概念,国际数字疗法联盟(Digital Therapeutics Alliance, DTA)将DTx定义为:“由高质量软件程序驱动,直接向患者提供以证据为基础的医疗干预措施,用以预防、管理或治疗疾病”^[5]。目前全球主要国家和地区,如美国、德国、英国、日本、澳大利亚、中国和法国,均未在政府官方层面对其进行明确定义,仅将其视为常规医疗器械。韩国食品药品安全部将DTx定义为:“一种为患者提供循证治疗干预措施,用以预防、控制或治疗某种紊乱或疾病的医疗设备软件”^[6]。DTx的运转模式为:移动技术、远程通信技术、智能设备、可穿戴设备、健康信息分析技术和个性化医疗等,不仅可帮助患者及时了解自身健康状况,也使得医生能够更加准确地了解患者的病情并施以精准干预^[7]。DTx不仅可降低治疗成本,还可促进治疗方式的转变,是传统治疗方法的补充甚至替代。截至2021年9月,全球共4502例基于DTx的临床研究,涵盖精神心理领域、中枢神经系统疾病、皮肤疾病、脑部疾病等^[8]。目前,DTx在疼痛领域得以应用,多家医疗公司推出了相应产品,具体实例详见表1。

通过运用各种数字技术,DTx在很大程度上提高了医疗服务的可及性。DTx通过收集使用者的数据,在适当时候提示医生进行干预,并通过提高单次医疗服务效率或增强服务能力的方式,进一步提升医疗机构的效率。此外,DTx还可提升患者的依从性,为其提供基于数据驱动的个性化诊疗,并基于医学原理和数据分析模型辅助医生诊断,从而提高医疗机构的诊疗效率。以临床为导向的医学创新转化和医工融合是未来医学发展趋势,将促进DTx的广泛应用。作为疼痛领域冉冉升起的新星,DTx将逐渐大放异彩。

2.2 VR研究进展及应用

2.2.1 VR研究进展

由于技术的成熟及设备成本的下降,在众多DTx模式中,VR逐渐被大规模引入,在日常娱乐生活中的应用日趋成熟,其营造的虚拟环境多以游戏形式出现,与DTx的应用目的相契合。VR的技术支持也比较成熟,包括索尼、微软、PICO等生产厂商,可提供完备的服务。

VR是一种通过头戴式显示器和视觉、听觉刺激的头部跟踪演示器以创造沉浸式人工体验的技术^[9],

表 1 数字疗法在疼痛领域的应用实例

Tab. 1 Examples of digital therapeutics in the field of pain

产品名称	企业名称	美国 FDA 批准年份	应用实例
EaseVRx	AppliedVR	2021	基于认知行为疗法的 VR 设备, 通过深度放松、注意力转移、内感受意识、换位思考、分心、沉浸式享受等方法, 利用“呼吸放大器”进行深呼吸练习, 帮助慢性腰痛患者 (≥ 18 岁) 减轻疼痛
Nervio, FGD000075-4.7	Theranica	2021	通过智能手机控制电脉冲的释放, 抑制神经信号传递, 从而缓解疼痛, 为成人和青少年偏头痛的急性和预防性治疗提供选择
Nervio Migra		2019	
SPRINT	SPR Therapeutics	2018	作为可穿戴疼痛管理设备, 应用外周神经刺激系统缓解急性和慢性疼痛
Intellis	Medtronic	2017	植入式可充电脊髓电刺激系统, 通过刺激脊髓神经以治疗慢性疼痛
Quell	Neurometrix	2016	作为一款经皮神经刺激仪, 采用安全、精确的电脉冲刺激感觉神经, 以触发自然的疼痛缓解反应

FDA (Food and Drug Administration): 食品药品监督管理局; VR (virtual reality): 虚拟现实

多用于疾病的康复治疗。如 VR 可提高心脏病患者的康复效果, 通过改善患者的焦虑和抑郁症状达到目的^[10]。作为一项新技术, VR 还可对呼吸运动进行监测, 帮助患者进行功能锻炼, 为肺部疾病患者提供新的康复机会^[11-12]。在卒中患者康复过程中, VR 具有改善康复治疗效果的作用^[13]。试验研究表明, 采用主观评分量表 (Fugl-Meyer 评估表、Berg 平衡量表等) 和 MRI, 可观察到 VR 组患者的治疗效果优于对照组 (接受传统治疗)^[13]。VR 治疗使得患者脑部与学习、计划和运动执行相关的区域发生变化, 增加了神经的可塑性。

2.2.2 VR 在疼痛领域的应用

VR 首次应用于疼痛领域, 可追溯至霍夫曼 (Hoffman) 及其同事创造的“雪世界” (SnowWorld), 一款向虚拟人物投掷雪球的 VR 游戏^[14]。“雪世界”构建了一个三维虚拟峡谷, 峡谷中有河流和瀑布, 患者在穿过峡谷时专注于向峡谷内的物体投掷雪球以分散其注意力, 用目光瞄准并按下键盘上的空格键, 即可向雪人发射雪球。雪人一击结冰, 两击粉碎。患者通过沉浸式体验游戏过程, 从而分散注意力, 达到有效缓解疼痛的目的。在烧伤患者的伤口护理过程中, VR 可作为阿片类药物镇痛的辅助手段, 有效减轻患者的痛觉, 且不会因反复应用 VR 而效果下降^[15-16]。应用 VR 程序“雪世界”, 可使接受物理治疗的小儿烧伤患者疼痛较对照组减轻 27%~44%^[17]。

目前, VR 可用于烧伤后疼痛^[18]、牙痛^[19]、缺血性疼痛^[20]、癌症痛^[21]、慢性头痛^[22]等的治疗, 既可发挥减轻患者疼痛感觉的作用, 又可改善患者的心理健康状况。相关研究证实, VR 可缓解多种类型的疼痛, 如手术操作等引起的急性疼痛, 以及颈部疼

痛等引起的慢性疼痛^[23-28], VR 在疼痛领域的应用研究详见表 2。VR 镇痛不仅适用于成人, 且在儿科镇痛领域发挥重要作用。Wong 等^[29]针对行静脉穿刺的患儿开展了一项临床随机对照试验, 共招募 149 例患儿, 结果显示 VR 能够明显改善患儿的疼痛和焦虑。在该试验的虚拟场景中, 程序构建了一个卡通人物 DD, 可使接受静脉穿刺的患儿分散注意力, 降低其疼痛刺激。VR 疗法为患者提供了一种身临其境的感觉, 通过多种感官体验, 使其参与到虚拟世界场景中。患者在虚拟世界与现实环境之间进行交互, 通过沉浸式体验有效减轻疼痛感觉^[30]。

一般采用疼痛评分量表, 如视觉模拟量表等主观评分系统衡量 VR 的镇痛效果。MRI 也可用于评价 VR 的镇痛效果。Hoffman 等^[31]采用 MRI 分析接受 VR 治疗与不接受 VR 治疗的受试者在接受热刺激诱发疼痛时的大脑活动情况, 并分析 VR 减轻疼痛的神经生物学机制。研究发现, VR 不仅可大幅降低患者的主观疼痛感觉, 还可减少与痛觉相关的 5 个区域 (前扣带回皮层、初级和次级躯体感觉皮层、岛叶和丘脑) 的大脑活动。另一项研究将血清中的压力激素作为客观指标衡量 VR 对于疼痛的影响水平, 该研究将受试者分为三组, 分别比较 VR、等速运动和躯干核心肌肉的常规训练对于慢性腰痛患者的影响^[32]。在疼痛评价方面, 不仅采用了 VAS 评分, 更采用了血清学检测方法, 通过比较血糖、胰岛素、生长激素、催乳素、促肾上腺皮质激素水平和胰岛素抵抗水平, 以判断 VR 在疼痛缓解方面发挥的作用。该研究结果表明, VR 可显著改善患者的激素水平, 也证实了 VR 缓解疼痛的机制之一, 即 VR 训练可能减少了疼痛应激激素的释放。

表 2 VR 在疼痛领域的应用研究

Tab. 2 Study on application effect of virtual reality in the field of pain

文献	设计原则	样本量 (n)	试验设计	结论
Tejera ^[23]	单盲、随机试验	44	将受试者分为两组, 一组通过“Fulldive VR”(通过颈部的倾斜来改变取景器中的图像)和“VR Ocean Aquarium 3D”(增加了颈部屈伸和旋转动作, 使沉浸在虚拟海洋环境中的患者观察不同的海洋动物)两款应用进行颈部锻炼; 另一组接受固定的物理功能锻炼	VR 可减少慢性非特异性颈部疼痛患者的疼痛相关运动恐惧
Garcia ^[24]	双盲、单队列研究	179	将受试者分为两组, 一组使用 EaseVRx (沉浸式疼痛缓解 VR 程序); 另一组使用头戴式显示器, 提供 2D 自然内容的 VR 程序	VR 在疼痛治疗方面发挥出色的治疗效果
Deo ^[25]	前瞻性、随机对照试验	40	将受试者分为两组, 一组接受虚拟现实干预 (引导式放松体验为观看一段名为“宁静之林”的 8 min 的视频, 该程序模拟了 1 个宁静的雨林和 1 个湖泊环境, 湖泊里有栩栩如生的野生动物, 可使用头戴式追踪器进行探索); 另一组接受标准护理	VR 可有效减少门诊宫腔镜检查过程中患者的疼痛和焦虑
Weynants ^[26]	前瞻性、随机对照试验	166	将受试者分为两组, 一组接受 VR 镇痛; 另一组不接受 VR 镇痛治疗	VR 在体外冲击波碎石中可发挥出色的镇痛作用
Merlot ^[27]	双盲、随机试验	102	将受试者分为两组, 一组为 Endocare (该程序共 20 min, 结合了三维 VR 环境中的听觉和视觉刺激治疗, 包括双耳节拍、口头催眠指令、模拟自然声音、注意力分散等) 干预组, 接受 VR 治疗; 另一组为对照组, 使用相同 VR 设备但无 Endocare 刺激	对于患有中重度盆腔疼痛的子宫内异位症患者, VR 是一种有效且安全的方法。此外, 还有助于减少患者对止痛药物的依赖程度
Gold ^[28]	随机对照试验	107	将受试者分为两组, 一组为 VR 干预组 (一款虚拟游戏, 患者在其中沿着预设的路径穿过一个充满动画景观、建筑和云朵的三维环境, 利用视线控制大炮的发射方向, 以击倒泰迪熊); 另一组为标准护理组	相较于对照组, VR 干预组患者的焦虑和疼痛程度显著降低

VR: 同表 1

3 VR 镇痛机制

3.1 注意力分散机制

关于 VR 如何缓解疼痛和调节疼痛感知, 研究人员尚未达成共识, 但多数学者将其归结于两种机制: 注意力分散机制和基于正念的情绪调节机制^[33]。痛觉感觉受心理因素的强烈影响, 这一现象先后获得“门控理论”和“神经基质理论”的支持^[34-36]。前者认为痛觉信号由位于脊髓背角的门控系统调节, 其进入大脑之前受到被称为“神经疼痛闸门”机制的控制。根据疼痛闸门的打开/关闭, 流向大脑的疼痛信号被促进或抑制, 由此获得不同的疼痛感知程度。后者则认为疼痛并非简单的感觉反应, 而是涉及多个维度的复杂体验, 由大脑中广泛分布的神经网络输出产生, 包括感觉、情感和认知成分。这些维度由不同的大脑区域协同作用, 并受到多种输入的影响, 这些输入作用于神经基质并对疼痛的产生和体验产生影响。近年来, VR 在分散注意力方面的重要性愈发凸

显。VR 设备通过构建虚拟环境, 并应用多种感官刺激将患者的注意力从疼痛感觉中转移出来^[37]。

另一方面, 患者可通过 VR 将自身所处环境从“饱受痛苦的医疗环境”中剥离出来, 从而达到一种逃避现实的作用^[38]。此外, 患者将注意力集中在愉快的体验而非痛苦的感受上, 可有效缓解其焦虑情绪, 进一步提高 VR 的镇痛效果^[38]。在 VR 诞生之前, 注意力分散机制在疼痛缓解领域即被广泛接受, 而 VR 更像是传统手段的“升级版”, 全面承担了分散注意力的职责。Bantick 等^[39]采用 MRI 阐述分散注意力缓解疼痛的机制, 该试验通过名为“Stroop”的任务引起注意力分散现象, 使受试者因有害热刺激引起的疼痛主观感受明显降低, 且 MRI 显示疼痛矩阵 (丘脑、岛叶、前扣带回皮层的认知分区) 的激活总体下降, 而大脑前扣带回皮层和眶额区的活动则有所增加。该研究也进一步证实了 VR 可通过注意力分散机制达到镇痛目的。另一项关于 VR 镇痛的研究同样证实了此观点^[40]。Hoffman 等^[40]采用主观疼痛评分和客观 MRI 探讨 VR 与阿片类镇痛药物对疼痛相

关脑活动的影响,证实了单独 VR 对于“热刺激”所引起的疼痛是行之有效的。与此同时,与疼痛相关的脑部活动支持了“分心”机制在 VR 镇痛中的支撑作用。

3.2 基于正念的情绪调节机制

VR 缓解疼痛的另一种机制则是通过情绪调节提高机体对疼痛的耐受能力^[4],进而减轻疼痛感受。正如前文所述,VR 镇痛主要由分散注意力机制发挥作用;同时,VR 对情绪和神经生理可发挥一定的调节作用。近期一项试验研究证实了这一观点,该试验分为 3 个部分:第一部分,通过沉浸式 VR 与非沉浸式二维视频及无视听输入的对照组进行比较,采用主观评分评价不同治疗方式对患者疼痛感知的影响;第二部分,通过沉浸式 VR 与非沉浸式二维视频及无视听输入的对照组进行比较,借助电生理学(脑电图)评价患者的疼痛感知;第三部分,比较分散注意力式 VR(场景探索)与正念式 VR(正念冥想)两种不同场景镇痛的神经机制^[33]。研究结果显示,场景探索式 VR 所带来的沉浸感与 γ 振荡功率的增加相关,而正念式 VR 与 α 振荡功率的增加相关。上述研究表明,正念式 VR 具有另一种镇痛机制,有别于专注于分散注意力的场景探索式 VR。Loreto-Quijada 等^[41]的研究也证实,在提高自我效能和调节情绪方面,VR 发挥巨大潜力,其可通过增强正念练习,改善慢性疼痛患者的自我管理^[42]。

此外,研究表明 VR 通过分散注意力和引起神经生理变化两种机制缓解疼痛的作用并不相同^[43]。前者主要在治疗急性疼痛中发挥作用,后者主要在缓解慢性疼痛的过程中发挥作用。分散注意力作为一种非药物干预措施,经常被用于治疗儿童和青少年急性手术疼痛,包括烧伤伤口疼痛护理等^[44]。

4 挑战与展望

尽管 DTx 与 VR 正处于蓬勃发展的黄金时期,但仍面临诸多问题。首先,我国仍需加强对 DTx 和 VR 的监管,完善相应政策和制度建设。此外,尽管与传统治疗手段相比,VR 在依从性方面占据一定的优势,但仍难以做到尽善尽美。对于患者而言,VR 打破了其对于传统医疗诊治的认识;同时,许多医务工作者也对 VR 的认识存在不足,由此导致 VR 的应用受限,无疑对 DTx 的推广产生了一定阻碍。因此,未来医务人员需在鼓励患者接受和适应 VR 方面投入更多精力。

与传统治疗方法相比,VR 可提供更加安全、经济、有效、舒适的选择。尤其在疼痛治疗领域,当前的治疗措施难以满足广大患者需求,而 VR 的蓬勃发展则进一步拓宽了疼痛的治疗选择。随着人工智能应用的日益广泛,VR 与人工智能的联系也越来越紧密。人工智能可有效帮助患者与设定的程序进行良性交互,将自身情况及时进行反馈,帮助临床医生作出更完善、个体化的决策,达到个体化诊疗目的。值得期待的是,随着数字技术日新月异的发展,VR 设备的更新迭代也将增快,同时价格也会逐渐下降,意味着患者在选择治疗方法时具有更多选择空间。

5 小结

在科技飞速发展的今天,DTx 在现代医学诊治中的地位日益突显。传统的治疗手段已难以满足疼痛患者的治疗需求,而 VR 无疑是最佳的潜在选择之一。在不久的将来,可以预见越来越多的新技术将应用于 VR 镇痛领域,人工智能与 VR 的联系也将越来越紧密。VR 在疼痛领域的应用方兴未艾,尽管现阶段对其认识尚不成熟,但未来应用前景一片光明。

作者贡献: 吴辰负责查阅文献、撰写论文;刘栩铭、张珂浦、王腾梯负责整理资料;张丽、马超、刘红菊负责提供指导、修订论文。

利益冲突: 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Treede R D, Rief W, Barke A, et al. A classification of chronic pain for ICD-11 [J]. *Pain*, 2015, 156 (6): 1003-1007.
- [2] Jiang Y Y, Xu T L, Mao F, et al. The prevalence and management of chronic pain in the Chinese population: findings from the China Pain Health Index (2020) [J]. *Popul Health Metr*, 2022, 20 (1): 20.
- [3] St Sauver J L, Warner D O, Yawn B P, et al. Why patients visit their doctors: assessing the most prevalent conditions in a defined American population [J]. *Mayo Clin Proc*, 2013, 88 (1): 56-67.
- [4] Zheng Y J, Zhang T J, Yang X Q, et al. A survey of chronic pain in China [J]. *Libyan J Med*, 2020, 15 (1): 1730550.
- [5] Digital Therapeutics Alliance. Digital therapeutics: definition

- and core principles [EB/OL]. [2023-09-20]. https://dtx-alliance.org/wp-content/uploads/2021/01/DTA_DTx-Definition-and-Core-Principles.pdf.
- [6] Wang C, Lee C, Shin H. Digital therapeutics from bench to bedside [J]. *NPJ Digit Med*, 2023, 6 (1): 38.
- [7] 杨吉江, 雷毅, 武文杰, 等. 数字疗法发展与应用综述研究 [J]. *中国卫生信息管理杂志*, 2022, 19 (2): 211-216.
- Yang J J, Lei Y, Wu W J, et al. A review on the development and application of digital therapy [J]. *Chin J Health Inform Manag*, 2022, 19 (2): 211-216.
- [8] 姚恒美. 全球数字疗法发展态势研究 [J]. *竞争情报*, 2022, 18 (2): 57-63.
- Yao H M. Research on the global development trend of digital therapeutics [J]. *Competitive Intell*, 2022, 18 (2): 57-63.
- [9] Morris N A, Wang Y, Felix R B, et al. Adjunctive virtual reality pain relief after traumatic injury: a proof-of-concept within-person randomized trial [J]. *Pain*, 2023, 164 (9): 2122-2129.
- [10] Szczepańska-Gieracha J, Józwick S, Cieślík B, et al. Immersive virtual reality therapy as a support for cardiac rehabilitation: a pilot randomized-controlled trial [J]. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 2021, 24 (8): 543-549.
- [11] Pittara M, Matsangidou M, Pattichis C S. Virtual reality for pulmonary rehabilitation: comprehensive review [J]. *JMIR Rehabil Assist Technol*, 2023, 10: e47114.
- [12] Abushakra A, Faezipour M. Augmenting breath regulation using a mobile driven virtual reality therapy framework [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2014, 18 (3): 746-752.
- [13] Feitosa J A, Casseb R F, Camargo A, et al. Graph analysis of cortical reorganization after virtual reality-based rehabilitation following stroke: a pilot randomized study [J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1241639.
- [14] Ahmadpour N, Randall H, Choksi H, et al. Virtual reality interventions for acute and chronic pain management [J]. *Int J Biochem Cell Biol*, 2019, 114: 105568.
- [15] Hoffman H G, Patterson D R, Carrougher G J, et al. Effectiveness of virtual reality-based pain control with multiple treatments [J]. *Clin J Pain*, 2001, 17 (3): 229-235.
- [16] Hoffman H G, Patterson D R, Carrougher G J. Use of virtual reality for adjunctive treatment of adult burn pain during physical therapy: a controlled study [J]. *Clin J Pain*, 2000, 16 (3): 244-250.
- [17] Schmitt Y S, Hoffman H G, Blough D K, et al. A randomized, controlled trial of immersive virtual reality analgesia, during physical therapy for pediatric burns [J]. *Burns*, 2011, 37 (1): 61-68.
- [18] Carrougher G J, Hoffman H G, Nakamura D, et al. The effect of virtual reality on pain and range of motion in adults with burn injuries [J]. *J Burn Care Res*, 2009, 30 (5): 785-791.
- [19] Furman E, Jasinevicius T R, Bissada N F, et al. Virtual reality distraction for pain control during periodontal scaling and root planing procedures [J]. *J Am Dent Assoc*, 2009, 140 (12): 1508-1516.
- [20] Magora F, Cohen S, Shochina M, et al. Virtual reality immersion method of distraction to control experimental ischemic pain [J]. *Isr Med Assoc J*, 2006, 8 (4): 261-265.
- [21] Chirico A, Lucidi F, De Laurentiis M, et al. Virtual reality in health system: beyond entertainment. a mini-review on the efficacy of VR during cancer treatment [J]. *J Cell Physiol*, 2016, 231 (2): 275-287.
- [22] Shiri S, Feintuch U, Weiss N, et al. A virtual reality system combined with biofeedback for treating pediatric chronic headache--a pilot study [J]. *Pain Med*, 2013, 14 (5): 621-627.
- [23] Tejera D M, Beltran-Alacreu H, Cano-De-La-Cuerda R, et al. Effects of virtual reality versus exercise on pain, functional, somatosensory and psychosocial outcomes in patients with non-specific chronic neck pain: a randomized clinical trial [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17 (16): 5950.
- [24] Garcia L M, Bircckhead B J, Krishnamurthy P, et al. An 8-week self-administered at-home behavioral skills-based virtual reality program for chronic low back pain: double-blind, randomized, placebo-controlled trial conducted during COVID-19 [J]. *J Med Internet Res*, 2021, 23 (2): e26292.
- [25] Deo N, Khan K S, Mak J, et al. Virtual reality for acute pain in outpatient hysteroscopy: a randomised controlled trial [J]. *BJOG*, 2021, 128 (1): 87-95.
- [26] Weynants L, Chys B, D'hulst P, et al. Virtual reality for pain control during shock wave lithotripsy: a randomized controlled study [J]. *World J Urol*, 2023, 41 (2): 589-594.
- [27] Merlot B, Elie V, Périgord A, et al. Pain reduction with an immersive digital therapeutic in women living with endometriosis-related pelvic pain: at-home self-administered randomized controlled trial [J]. *J Med Internet Res*, 2023, 25: e47869.
- [28] Gold J I, SooHoo M, Laikin A M, et al. Effect of an immersive virtual reality intervention on pain and anxiety associated with peripheral intravenous catheter placement in the pediatric setting: a randomized clinical trial [J]. *JAMA Netw Open*, 2021, 4 (8): e2122569.

- [29] Wong C L, Choi K C. Effects of an immersive virtual reality intervention on pain and anxiety among pediatric patients undergoing venipuncture: a randomized clinical trial [J]. *JAMA Netw Open*, 2023, 6 (2): e230001.
- [30] Pourmand A, Davis S, Marchak A, et al. Virtual reality as a clinical tool for pain management [J]. *Curr Pain Headache Rep*, 2018, 22 (8): 53.
- [31] Hoffman H G, Richards T L, Coda B, et al. Modulation of thermal pain-related brain activity with virtual reality: evidence from fMRI [J]. *Neuroreport*, 2004, 15 (8): 1245-1248.
- [32] Nambi G, Abdelbasset W K, Alrawaili S M, et al. Virtual reality or isokinetic training; its effect on pain, kinesophobia and serum stress hormones in chronic low back pain; a randomized controlled trial [J]. *Technol Health Care*, 2021, 29 (1): 155-166.
- [33] Li J W, Yang H Y, Xiao Y A, et al. The analgesic effects and neural oscillatory mechanisms of virtual reality scenes based on distraction and mindfulness strategies in human volunteers [J]. *Br J Anaesth*, 2023, 131 (6): 1082-1092.
- [34] Indovina P, Barone D, Gallo L, et al. Virtual reality as a distraction intervention to relieve pain and distress during medical procedures: a comprehensive literature review [J]. *Clin J Pain*, 2018, 34 (9): 858-877.
- [35] Melzack R, Wall P D. Pain mechanisms: a new theory [J]. *Science*, 1965, 150 (3699): 971-979.
- [36] Melzack R. Pain and the neuromatrix in the brain [J]. *J Dent Educ*, 2001, 65 (12): 1378-1382.
- [37] Sharar S R, Alamdari A, Hoffer C, et al. Circumplex model of affect: a measure of pleasure and arousal during virtual reality distraction analgesia [J]. *Games Health J*, 2016, 5 (3): 197-202.
- [38] Triberti S, Repetto C, Riva G. Psychological factors influencing the effectiveness of virtual reality-based analgesia: a systematic review [J]. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 2014, 17 (6): 335-345.
- [39] Bantick S J, Wise R G, Ploghaus A, et al. Imaging how attention modulates pain in humans using functional MRI [J]. *Brain*, 2002, 125 (Pt 2): 310-319.
- [40] Hoffman H G, Richards T L, 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.
- [41] Loreto-Quijada D, Gutiérrez-Maldonado J, Nieto R, et al. Differential effects of two virtual reality interventions: distraction versus pain control [J]. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 2014, 17 (6): 353-358.
- [42] O'Connor S, Mayne A, Hood B. Virtual reality-based mindfulness for chronic pain management: a scoping review [J]. *Pain Manag Nurs*, 2022, 23 (3): 359-369.
- [43] Gupta A, Scott K, Dukewich M. Innovative technology using virtual reality in the treatment of pain: does it reduce pain via distraction, or is there more to it? [J]. *Pain Med*, 2018, 19 (1): 151-159.
- [44] Jeffs D, Dorman D, Brown S, et al. Effect of virtual reality on adolescent pain during burn wound care [J]. *J Burn Care Res*, 2014, 35 (5): 395-408.

(收稿: 2023-11-03 录用: 2023-12-18 在线: 2024-02-20)

(本文编辑: 李玉乐)