

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250047

• 专题报道 •

近 10 年虚拟现实技术在脑卒中领域应用的可视化分析

李颖^{1△}, 黄乐乐^{2△}, 黄枫¹, 朱焕枝³, 黄婧慧^{1*}

1. 海军军医大学(第二军医大学)第一附属医院康复医学科, 上海 200433

2. 北京大学运动医学研究所(北京大学第三医院运动医学科), 北京 100191

3. 中国人民解放军联勤保障部队第九二四医院麻醉科, 桂林 541002

[摘要] **目的** 探索虚拟现实(VR)技术在脑卒中领域应用的研究现状和前沿热点。**方法** 检索 Web of Science 核心合集 2014 年 1 月至 2024 年 8 月 VR 技术应用于脑卒中领域的文献, 借助文献计量学软件对发文作者、机构、关键词等绘制可视化的知识图谱。**结果** 剔除校稿通知、编辑资料、会议论文等, 共纳入文献 785 篇。近 10 年来, 全球该研究领域新增发文量呈上升趋势, 中国是发文量最多的国家(130 篇), 发文量最多的作者是 Lamontagne Anouk(10 篇)和 Calabro Rocco Salvatore(10 篇), 发文量最多的机构和期刊分别是麦吉尔大学(加拿大, 27 篇)和 *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*(60 篇)。关键词分析和最强突发关键词表明研究热点聚焦在上肢、步态训练、运动功能、认知康复、单侧忽视、刺激、运动想象、大脑皮质重组等。**结论** 近 10 年, VR 技术在脑卒中领域应用的广度、深度逐步增加, 给脑卒中康复带来了新的机遇和思考。VR 技术与神经调节、神经成像、脑机接口、人工智能、远程医疗相结合的新形态可能是未来的研究热点和方向。

[关键词] 脑卒中; 虚拟现实; 文献计量学; 运动功能; 认知康复

[引用本文] 李颖, 黄乐乐, 黄枫, 等. 近 10 年虚拟现实技术在脑卒中领域应用的可视化分析[J]. 海军军医大学学报, 2025, 46(4): 458-465. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250047.

Application of virtual reality technology in stroke field over the past decade: a visualization analysis

LI Ying^{1△}, HUANG Lele^{2△}, HUANG Feng¹, ZHU Huanzhi³, HUANG Jinghui^{1*}

1. Department of Rehabilitation Medicine, The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

2. Institute of Sports Medicine of Peking University (Department of Sports Medicine, Peking University Third Hospital), Beijing 100191, China

3. Department of Anesthesiology, No. 924 Hospital of Joint Service Support Force of PLA, Guilin 541002, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China

[Abstract] **Objective** To explore the research status and emerging focus of virtual reality (VR) technology in the field of stroke. **Methods** The global literature of VR technology in the field of stroke from Jan. 2014 to Aug. 2024 was retrieved from the Web of Science Core Collection. Bibliometric software was used to draw a visual knowledge map of authors, institutions, key words, etc. **Results** After excluding proofreading notices, editorial materials, conference papers, etc., a total of 785 articles were included. Over the past decade, the number of new publications has shown an upward trend. China was the country with the largest total number of publications (130 articles). Lamontagne Anouk (10 articles) and Calabro Rocco Salvatore (10 articles) were tied for the authors with the highest number of publications. The institution and journal with the most literature in this field were McGill University (Canada, 27 articles) and *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* (60 articles), respectively. The key word analysis and the results of the strongest burst key words indicated that the research focused on upper limb, gait training, motor function, cognitive rehabilitation, post-stroke unilateral spatial neglect, stimulation, motor imagery, cortical reorganization, etc. **Conclusion** Over the past decade, the application of VR technology has gradually increased in both breadth and depth in the field of stroke, bringing new opportunities and thoughts to stroke rehabilitation. The new forms of VR technology combined with neuromodulation, neuroimaging, brain-computer interfaces, artificial intelligence, and telemedicine may be the future research topics and directions.

[收稿日期] 2025-01-20

[接受日期] 2025-03-06

[作者简介] 李颖, 硕士生, 主管康复治疗师. E-mail: yingli2653@foxmail.com; 黄乐乐, 硕士, 康复治疗师. E-mail: hl119971008@163.com

△共同第一作者(Co-first authors)

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-31162473, E-mail: huangran_1234@163.com

[Key words] stroke; virtual reality; bibliometrics; motor function; cognitive rehabilitation

[Citation] LI Y, HUANG L, HUANG F, et al. Application of virtual reality technology in stroke field over the past decade: a visualization analysis[J]. Acad J Naval Med Univ, 2025, 46(4): 458-465. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250047.

脑卒中作为世界范围内严重的公共卫生问题,具有高发病率、高致死率、高致残率、高疾病负担的特点^[1]。随着脑卒中医疗和管理水平的提高,脑卒中致死率显著降低,但致残率仍居高不下^[1]。康复是降低脑卒中致残率的重要方法,也是脑卒中组织化管理的关键环节^[2]。

虚拟现实(virtual reality, VR)技术是一种允许用户在计算机生成的模拟视听触一体化的仿真环境中进行人机互动的技术,通过结合计算机、头戴式显示器、身体传感器等设备能够为人们提供沉浸式体验,近年来逐步成为脑卒中领域一种新兴的康复手段。VR技术以其提供多样可重复的任务导向性训练、与虚拟环境进行交互、多样的视听反馈、与真实环境高度的相似性、促进习得技能在现实生活的有效转化等优点,在脑卒中患者的功能康复方面展现了巨大的潜力^[3-4]。

近年来,学者们对VR技术在脑卒中领域的运用进行了大量的探索和研究,但研究的内容和方向繁杂,目前尚缺乏对该领域文献的分析和梳理。本研究借助文献计量学软件,以VR技术应用于脑卒中领域的相关文献为计量对象,绘制可视化图谱,对其在国家、机构、作者、关键词等方面的分布进行全面概述,展示该领域的研究结构及进程,呈现该领域的热点话题和新兴趋势。

1 资料和方法

1.1 文献来源 文献数据来源于Web of Science(WOS)核心合集,包含子库SCI-EXPANDED、CCR-EXPANDED、IC。检索策略为:标题(stroke OR apoplexy OR cerebrovascular disease OR cerebrovascular accident) AND 主题(virtual reality OR virtual scene OR virtual environment OR augmented reality),时间限定为2014年1月至2024年8月,语种限定为英语,文献类型选择论著、综述。利用CiteSpace 6.2.R3软件自带的Duplicates Removal功能,剔除校稿通知、编辑资料、会议论文和撤稿通知等,在WOS中共检索到785篇相关文献,由2位评价者独立阅读文献标题

和摘要后进行筛选,剔除无关文献0篇,最终纳入785篇。将数据以纯文本格式导出,以“download_XXX”的形式重新命名保存,并导入CiteSpace 6.2.R3软件。

1.2 研究方法 通过CiteSpace 6.2.R3软件构建知识图谱,分别选取国家、机构、期刊、作者、关键词和最强突发关键词等对研究现状、热点、前沿和趋势进行可视化网络分析。其中节点的大小和连线反映研究对象的频次和联系的紧密程度。参数设置:时间跨度为2014年1月至2024年8月;主题词来源和关键路径为系统默认值。

2 结果

2.1 发文情况 近10年来,各年VR技术应用于脑卒中领域的新增发文量总体呈上升态势(图1),2019—2022年发文量大幅增加。根据折线图的整体增长趋势可以预测未来几年这一研究领域发文量将继续保持平稳增长。

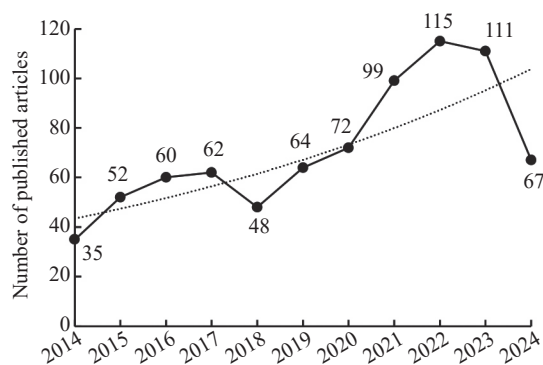


图1 2014—2024年脑卒中领域虚拟现实技术相关文献的发文量

Fig 1 Number of publications related to virtual reality technology in field of stroke from 2014 to 2024

The number of publications in 2024 was based on the data from January to August.

2.2 发文国家、机构、期刊 近10年VR技术在脑卒中领域发文量排前5名的国家依次是中国(130篇)、美国(125篇)、韩国(75篇)、意大利(71篇)、加拿大(63篇)。发文量排名前10位

的机构主要是大学院校,其中排名前3位的机构是麦吉尔大学(加拿大,27篇)、三育大学(韩国,19篇)、香港理工大学(中国,18篇)。发表该领域10篇及10篇以上文章的期刊共有22种,发表15篇及15篇以上的有7种,其中 *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* 是发文量和被引次数都最多的期刊(数量60篇,累计被引2184次),有显著影响力。

2.3 发文作者 运用 CiteSpace 6.2.R3 软件对发文作者进行分析,发文量排名前5位的作者依次是 Lamontagne Anouk (10篇)、Calabro Rocco Salvatore (10篇)、De Luca Rosaria (9篇)、Archambault Philippe S (8篇)、Alcaniz Mariano (8篇)。Lamontagne Anouk 和 Tunik Eugene 是爆发式发文。作者集群内科研合作紧密,Lamontagne Anouk 和 Archambault Philippe S 集中研究 VR 技术对脑卒中后单侧空间忽视(unilateral spatial neglect, USN)的评估、治疗^[5-6]。Calabro Rocco Salvatore 和 De Luca Rosaria 探索了基于 VR 的训

练对卒中后情绪、认知的改善及其机制^[7-9],包括机器人、步态训练系统等的联合^[10-11]。美国东北大学的 Tunik Eugene 团队和中国嘉兴大学的 Fu Jianming 团队,利用经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)、表面肌电、功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、脑电图等探索 VR 技术如何改变神经生理和大脑皮质^[12-13]。Alcaniz Mariano 关注了在新型冠状病毒感染疫情背景下 VR 远程医疗康复的安全性和经济性^[14]。

2.4 关键词和最强突发关键词分析 以关键词为节点进行共现分析并生成关键词共现网络图(图2A)。利用 CiteSpace 6.2.R3 软件和对数似然比算法生成关键词聚类图(图2B),得到了7个聚类,分别是“步态训练”“认知功能”“上肢”“头戴式显示器”“缺血性脑卒中”“卒中相关视觉忽视”“运动任务条件”。聚类分析后,再分别以关键词出现的年份和聚类标签作为 x、y 轴,生成关键词聚类时区图(图2C),从图中可看到聚类发展演变的时间跨度。

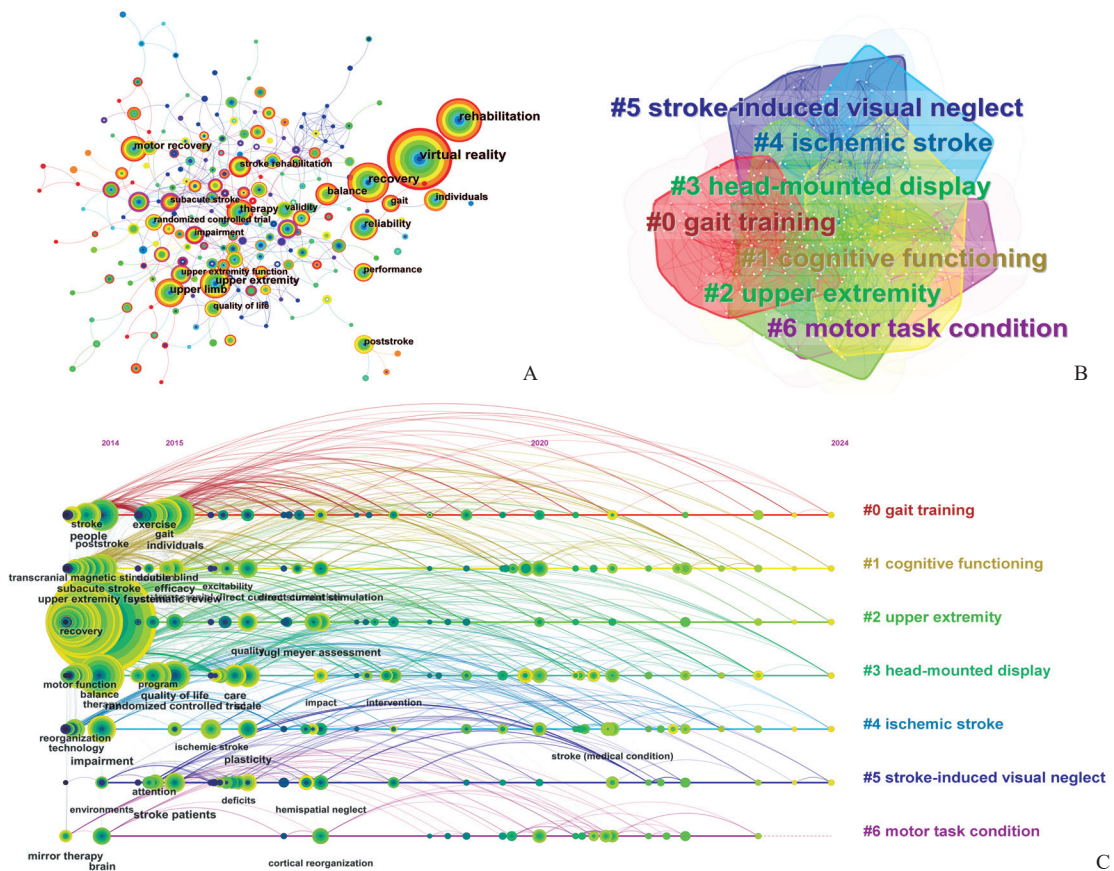


图2 2014—2024年脑卒中领域虚拟现实技术相关文献的关键词分析

Fig 2 Analysis of key words about virtual reality technology-related literature in field of stroke from 2014 to 2024

A: Key word collinear network diagram; B: Key word clustering diagram; C: Key word clustering time zone diagram.

图3突出显示了引文爆发最强的前25个关键词,红线的左终点为引文爆发出现时间,右终点表示出现终点。图3中物理治疗、现实、环境、研究手臂测试、社区步行、职业治疗、大脑皮质重

组、功能性电刺激 (functional electrical stimulation, FES)、认知康复、姿势控制、运动功能、增强现实、神经康复、单侧忽视、运动想象、刺激等是趋势热词。

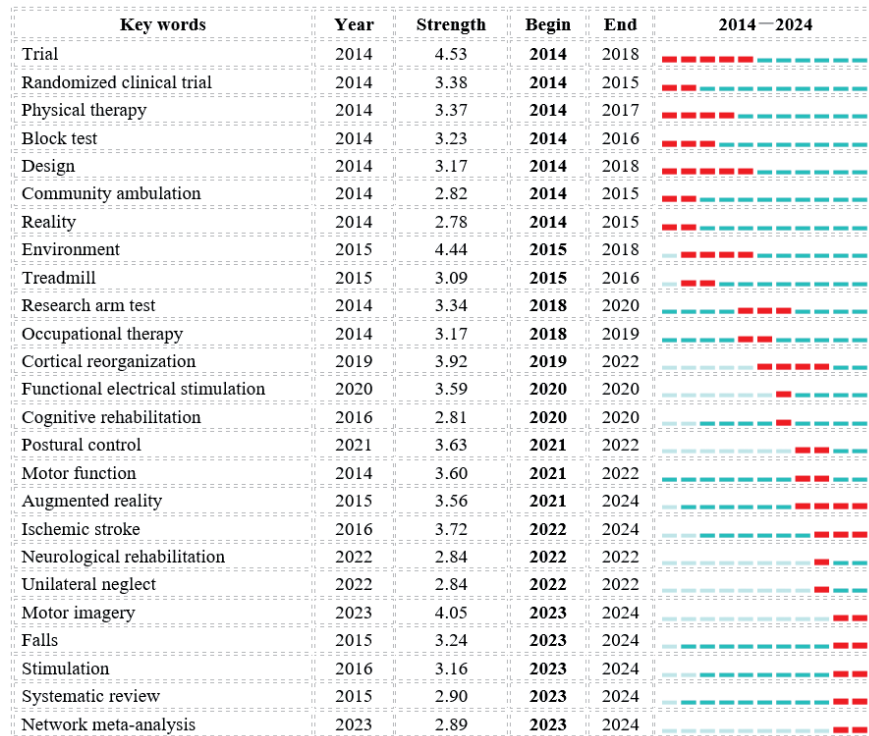


图3 2014—2024年脑卒中领域虚拟现实技术相关文献引文爆发最强的前25个关键词

Fig 3 Top 25 key words with the strongest citation explosion in field of virtual reality technology related to stroke from 2014 to 2024

The red lines indicate the duration of the continuous emergence of key words, while the cyan lines represent the duration of the continuous appearance of key words.

3 讨论

脑卒中后普遍存在致残性,卒中后遗留的运动、认知等功能障碍严重影响日常活动,为患者及社会带来巨大的负担^[1]。VR作为新兴技术在脑卒中领域的应用日益增加,只有满足脑卒中神经康复原则的特定VR训练才能促进功能恢复,且部分VR游戏改善效果不明确^[15]。结合关键词、高频突现词和关键词聚类及其时区分析结果,VR技术在脑卒中领域的研究热点方向有运动功能(上肢、步态)、认知障碍(半侧忽略)、联合刺激[无创脑刺激(non-invasive brain stimulation, NIBS)、FES]、大脑皮质重组(神经影像学)。

3.1 运动功能 运动功能恢复是脑卒中患者最迫切的需求之一^[1]。大脑运动皮质M1区可塑性是运

动学习的先决条件,VR通过提供任务导向、重复、密集、不同强度和多感官反馈的特定训练来诱导大脑皮质重组,改善运动功能^[15]。虚拟场景、虚拟动作能让患者想象运动动作,激活运动想象,兴奋镜像神经网络,从而增加运动皮质活动,改善运动功能^[16]。

研究中VR干预的运动功能主要集中在上肢和步态。VR技术可创建抓水果、搭积木等趣味训练场景,模拟日常活动提高上肢运动实用性转化,提供虚拟上肢动作与虚拟物体互动,增强运动反馈刺激运动想象,并根据患者水平设置个体化和分级训练,这些特定的VR训练对上肢运动功能有所改善且比传统训练更有效^[4,17]。VR的手功能训练系统也发展迅猛,其与微处理器、传感器构成数据手套,接收视、听、触等及时的多感官刺激,增加了

虚拟环境逼真感^[10-11]。VR还可联合康复机器人、脑机接口、远程康复等改善上肢运动功能^[18]。VR-脑机接口交互通过“虚拟手”在虚拟环境中执行任务,识别运动意象,把运动任务与大脑信号结合,重建神经功能^[19-20]。VR-远程康复可实现医疗资源优化,利于持续康复。VR-康复机器人能够精准测量上肢运动数据并实现精准训练和结果反馈,是新技术中改善上肢腕、肩关节运动功能结局的最佳治疗方式之一^[18]。在步态方面,VR通过设置虚拟道路视觉线索有效引导患者迈步;借助传感器实时捕捉步态参数并及时纠正步态,实现精准运动的反馈、控制;联合康复机器人或减重跑台提供安全、多变的虚拟步行场景,在增加训练丰富度、安全性的同时促进运动想象和神经激活^[21-23]。这些干预均显著增强步态参数,对节奏、步速、步频有积极影响^[23]。

3.2 认知障碍 认知障碍也是卒中后遗留的一种常见功能障碍,影响患者的日常生活^[1]。认知功能包含记忆、语言理解能力、空间取向、执行功能和计算能力等多方面。近年来,非药物干预的认知康复得到了广泛研究,其中VR展现了巨大的潜力^[7-8]。VR构建的现实回忆场景、特定虚拟情境(驾驶、购物等)、复杂空间环境、安全趣味游戏能够有效调节患者的焦虑、抑郁等情绪障碍,提高患者的记忆、注意、理解、空间感知等认知功能^[7-8]。VR通过在虚拟的生态环境里设计不同的任务和需求,改善患者任务规划、问题解决、决策制定等多方面的执行功能^[9,21]。

VR在脑卒中领域的研究集中在卒中后USN,是认知康复的研究热点。USN是一种空间认知障碍,表现为无法探索损伤对侧的空间,对该空间里的刺激无感知或对该侧身体的功能紊乱无知觉^[5-6]。VR为USN的评估和治疗提供了创新途径^[5-6]。既往USN评估缺乏金标准,常规评估使用的纸笔测试存在生态效度低、现实生活推广性差及慢性阶段易补偿等问题。针对痛点,研究者基于VR设计了沉浸式虚拟生活场景,并开发了将VR与眼动追踪仪结合的方式,为USN评估提供了有效补充^[5-6,24]。在USN的治疗方面,增加生态模式模拟日常场景(超市购物、厨房烹饪等)或设计特定的VR任务及视觉刺激游戏(寻找隐藏对象、跟踪虚拟路径等)可改善患者的空间认知^[5,21,24-26]。基于VR的棱镜适应

训练可有效改善USN症状^[26]。还可将VR与脑机接口结合,通过视觉诱发电位使大脑的有意感知与空间信息产生直接联系,从而改善患者对空间信息的处理能力,这是其他技术(如眼动追踪等)无法实现的^[27]。

3.3 联合刺激 部分研究将VR与神经调控结合,VR-NIBS^[28-30]的组合中常使用的刺激方式是TMS和经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)。TMS利用变化磁场在皮质感应出短脉冲电流,tDCS则通过放置在头皮上的电极产生电流,两者均可无创地刺激该区域的脑组织,从而调节皮质兴奋性,激发大脑神经元生长,改善脑卒中后不同阶段的上肢运动功能^[31-32]。NIBS多是通过直接对患侧脑区的促进性刺激、间接对健侧半球的抑制性刺激(球间抑制)或2种刺激结合来兴奋患侧脑区,改善神经系统功能^[31-32]。VR-NIBS这种组合协同提供了更创新的训练模式,将中枢刺激和运动学习结合,促进大脑皮质重组,克服了传统治疗的局限性^[28-32]。因为tDCS设备具有可移动性、限制较小,VR-NIBS相关研究常用的组合是VR+tDCS^[31]。VR-NIBS在脑卒中康复中有积极效果,其中VR+tDCS对上肢运动功能改善效果明确,且VR与tDCS同步进行比先后进行更有效^[28-32]。VR+TMS也可改善脑卒中后上肢运动功能,而重复TMS与VR联合在已有研究中使用较少且证据有限^[31]。

VR联合的刺激方式还有FES。在VR-FES相关研究^[33]中,VR提供个性化虚拟任务、活动、环境,FES则利用电刺激精确、密集地激活患侧肌肉以促使患者直接执行通过VR设计的任务,使患者与虚拟环境交互的同时激活主动运动,从而激发患者正确锻炼,刺激感觉、运动通路神经信号的输入,促进脑卒中患者自主运动的恢复。脑机接口与FES结合形成的脑机接口-FES系统可设置VR范式^[34]。脑机接口在运动想象任务期间从大脑收集信号并转换为计算机命令,联合对患肢施加干预,建立“中枢-外围-中枢”闭环康复模型,从而促进运动功能恢复^[19]。脑机接口-FES系统为患者提供VR环境(通过屏幕或耳机)或可视化动作,要求患者想象虚拟环境中的任务并执行,而每个想象都产生特定的脑电信号(通过脑电图捕捉),随即产生指令触发FES,从而刺激受损肌群完成任务动

作^[34]。患者反复接受这种训练,在大脑信号和特定的运动任务之间建立联接,完成“中枢-外围-中枢”闭环康复。

3.4 大脑皮质重组 用神经影像学工具探索VR改善功能的神经生理学机制,以及探索VR如何影响大脑神经元活动产生大脑皮质重组,是新的研究方向。神经影像学工具包括fMRI、脑电图、功能性近红外光谱^[12-13,16,21,26]。fMRI通过检测与血流相关的神经元活动,以高空间分辨率揭示VR干预下大脑激活模式的变化和重组,其缺点是时间分辨率差,在运动状态或磁疗环境下难以评估大脑功能^[35]。便携、安静的脑电图能方便地测量任务活动时在线的脑电信号,通过跟踪自发的脑电活动来了解大脑激活模式,特点是费用低、使用便捷、时间分辨率高^[36-38]。功能性近红外光谱是一种新兴的非侵入性光学成像技术,将fMRI的空间精度与脑电图的便携性、高时间分辨率相结合,可通过测量大脑皮质中血容量和氧饱和度的变化来反映大脑的活动水平^[36-38]。

这些神经影像学手段为基于VR的卒中后康复提供了可视化的监测工具,揭示了卒中后VR干预带来大脑皮质重组所涉及的机制^[35-40]。联合VR的上肢训练可实现比常规康复更高层次的大脑皮质重组,即训练后健康半球偏侧性指数显著降低,患侧半球偏侧性指数显著增高^[35]。双上肢VR训练中,同侧皮质脊髓束和胼胝体运动纤维的各向异性分数更高^[35]。虚拟运动和VR动作观察可兴奋镜像神经网络,促进大脑皮质重组^[36]。虚拟环境、特定VR任务等训练可兴奋患侧大脑运动皮质、小脑皮质和额叶白质区域,从而使运动功能、空间意识和认知功能显著改善^[26,28-29,40]。有研究者探索了一种新的评估方式,即通过脑电图和功能性近红外光谱监测沉浸式VR下大脑的活动改变^[37-38]。这表明VR与神经成像结合动态显示目标脑区对刺激的不同反应可用于预测治疗是否成功,标志着VR程序下同步神经监测的进步。多模态神经成像和VR结合可以提供更全面、准确的大脑信息,并得到大脑激活位置和激活程度的反馈^[13,37-38]。这些反馈反映了个体大脑活动的模式差异性,未来设想中可根据差异性即时调整神经康复计划,实现个体化、精准化治疗。

综上所述,本研究对VR技术应用于脑卒中领

域的研究进行了文献计量学分析,有助于研究者快速了解这一领域的研究热点及趋势,推动VR在脑卒中乃至其他康复领域中的应用进展。近10年,VR技术在脑卒中领域从初步建立认识到扩大应用范围、从对脑卒中患者单纯的运动恢复研究到对其深层次的机制研究、从VR技术下的功能训练到与各种新技术的联合干预,都显示了该领域研究呈现逐层推进、快速发展、多元探索的趋势。VR技术的发展离不开科技水平的提高,人工智能时代的到来也给卒中后康复带来新的机遇。基于上述分析,VR技术在脑卒中领域的应用前景广阔,VR联合神经调控、神经成像、人工智能、脑机接口、远程医疗的新形式可能是未来的研究热点和方向。

[参考文献]

- [1] MARKUS H S, LEUNG T. Stroke in China[J]. *Int J Stroke*, 2023, 18(3): 256-258. DOI: 10.1177/17474930231157479.
- [2] 张通,赵军,李雪萍,等. 中国脑血管病临床管理指南(第2版)(节选)——第8章 脑血管病康复管理[J]. *中国卒中杂志*, 2023, 18(9): 1036-1048. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5765.2023.09.010.
- [3] RAJASHEKAR D, BOYER A, LARKIN-KAISER K A, et al. Technological advances in stroke rehabilitation: robotics and virtual reality[J]. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 2024, 35(2): 383-398. DOI: 10.1016/j.pmr.2023.06.026.
- [4] PRAJJWAL P, CHANDRASEKAR K K, BATTULA P, et al. The efficacy of virtual reality-based rehabilitation in improving motor function in patients with stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *Ann Med Surg (Lond)*, 2024, 86(9): 5425-5438. DOI: 10.1097/MS9.0000000000002403.
- [5] OGOURTSOVA T, SOUZA SILVA W, ARCHAMBAULT P S, et al. Virtual reality treatment and assessments for post-stroke unilateral spatial neglect: a systematic literature review[J]. *Neuropsychol Rehabil*, 2017, 27(3): 409-454. DOI: 10.1080/09602011.2015.1113187.
- [6] OGOURTSOVA T, ARCHAMBAULT P, SANGANI S, et al. Ecological virtual reality evaluation of neglect symptoms (EVENS): effects of virtual scene complexity in the assessment of poststroke unilateral spatial neglect[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2018, 32(1): 46-61. DOI: 10.1177/1545968317751677.
- [7] MAGGIO M G, LATELLA D, MARESCA G, et al. Virtual reality and cognitive rehabilitation in people with stroke: an overview[J]. *J Neurosci Nurs*, 2019, 51(2): 101-105. DOI: 10.1097/JNN.0000000000000423.

- [8] GANGEMI A, DE LUCA R, FABIO R A, et al. Effects of virtual reality cognitive training on neuroplasticity: a quasi-randomized clinical trial in patients with stroke[J]. *Biomedicines*, 2023, 11(12): 3225. DOI: 10.3390/biomedicines11123225.
- [9] DE LUCA R, GANGEMI A, MAGGIO M G, et al. Effects of virtual rehabilitation training on post-stroke executive and praxis skills and depression symptoms: a quasi-randomised clinical trial[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2024, 14(17): 1892. DOI: 10.3390/diagnostics14171892.
- [10] MAGGIO M G, NARO A, MANULI A, et al. Effects of robotic neurorehabilitation on body representation in individuals with stroke: a preliminary study focusing on an EEG-based approach[J]. *Brain Topogr*, 2021, 34(3): 348-362. DOI: 10.1007/s10548-021-00825-5.
- [11] MERIANS A S, FLUET G G, QIU Q, et al. Hand focused upper extremity rehabilitation in the subacute phase post-stroke using interactive virtual environments[J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 573642. DOI: 10.3389/fneur.2020.573642.
- [12] LIN M, HUANG J, FU J, et al. A VR-based motor imagery training system with EMG-based real-time feedback for post-stroke rehabilitation[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2023, 31: 1-10. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3210258.
- [13] SHEN J, GU X, FU J, et al. Virtual reality-induced motor function of the upper extremity and brain activation in stroke: study protocol for a randomized controlled trial[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1094617. DOI: 10.3389/fneur.2023.1094617.
- [14] LLORÉNS R, NOÉ E, COLOMER C, et al. Effectiveness, usability, and cost-benefit of a virtual reality-based telerehabilitation program for balance recovery after stroke: a randomized controlled trial[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2015, 96(3): 418-425.e2. DOI: 10.1016/j.apmr.2014.10.019.
- [15] MAIER M, RUBIO BALLESTER B, DUFF A, et al. Effect of specific over nonspecific VR-based rehabilitation on poststroke motor recovery: a systematic meta-analysis[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2019, 33(2): 112-129. DOI: 10.1177/1545968318820169.
- [16] XIE P, WANG Z, LI Z, et al. Research on rehabilitation training strategies using multimodal virtual scene stimulation[J]. *Front Aging Neurosci*, 2022, 14: 892178. DOI: 10.3389/fnagi.2022.892178.
- [17] SOLEIMANI M, GHAZISAEEDI M, HEYDARI S. The efficacy of virtual reality for upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review and meta-analysis[J]. *BMC Med Inform Decis Mak*, 2024, 24(1): 135. DOI: 10.1186/s12911-024-02534-y.
- [18] ZHU Y, WANG C, LI J, et al. Effect of different modalities of artificial intelligence rehabilitation techniques on patients with upper limb dysfunction after stroke—a network meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1125172. DOI: 10.3389/fneur.2023.1125172.
- [19] JIA J. Exploration on neurobiological mechanisms of the central-peripheral-central closed-loop rehabilitation[J]. *Front Cell Neurosci*, 2022, 16: 982881. DOI: 10.3389/fncel.2022.982881.
- [20] PICHIORRI F, MORONE G, PETTI M, et al. Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery[J]. *Ann Neurol*, 2015, 77(5): 851-865. DOI: 10.1002/ana.24390.
- [21] MARTELLI D, PRADO A, XIA B, et al. Development of a virtual floor maze test—effects of distal visual cues and correlations with executive function in healthy adults[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2019, 27(10): 2229-2236. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2938103.
- [22] MORIZIO C, COMPAGNAT M, BOUJUT A, et al. Immersive virtual reality during robot-assisted gait training: validation of a new device in stroke rehabilitation[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2022, 58(12): 1805. DOI: 10.3390/medicina58121805.
- [23] KIM M, KANEKO F. Virtual reality-based gait rehabilitation intervention for stroke individuals: a scoping review[J]. *J Exerc Rehabil*, 2023, 19(2): 95-104. DOI: 10.12965/jer.2346114.057.
- [24] KAISER A P, VILLADSEN K W, SAMANI A, et al. Virtual reality and eye-tracking assessment, and treatment of unilateral spatial neglect: systematic review and future prospects[J]. *Front Psychol*, 2022, 13: 787382. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.787382.
- [25] YASUDA K, TAKAZAWA S, MUROI D, et al. Unilateral spatial neglect affected by right-sided stimuli in a three-dimensional virtual environment: a preliminary proof-of-concept study[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2023, 2023: 1-4. DOI: 10.1109/EMBC40787.2023.10340296.
- [26] WILF M, CERRA CHERAKA M, JEANNERET M, et al. Combined virtual reality and haptic robotics induce space and movement invariant sensorimotor adaptation[J]. *Neuropsychologia*, 2021, 150: 107692. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2020.107692.
- [27] GOURET A, LE BARS S, PORSSUT T, et al. Advancements in brain-computer interfaces for the rehabilitation of unilateral spatial neglect: a concise review[J]. *Front Neurosci*, 2024, 18: 1373377. DOI: 10.3389/fnins.2024.1373377.
- [28] 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. DOI: 10.1186/s12984-020-00780-5.
- [29] ALASHRAM A R. Combined noninvasive brain stimulation virtual reality for upper limb rehabilitation poststroke: a systematic review of randomized controlled trials[J]. *Neurol Sci*, 2024, 45(6): 2523-2537. DOI: 10.1007/s10072-024-07360-8.
- [30] ZHANG N, WANG H, WANG H, et al. Impact of the combination of virtual reality and noninvasive brain stimulation on the upper limb motor function of stroke patients: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1): 179. DOI: 10.1186/s12984-024-01474-y.
- [31] LI L L, WU J J, LI K P, et al. Comparative efficacy of different noninvasive brain stimulation protocols on upper-extremity motor function and activities of daily living after stroke: a systematic review and network meta-analysis[J]. *Neurol Sci*, 2024, 45(8): 3641-3681. DOI: 10.1007/s10072-024-07437-4.
- [32] BODDINGTON L J, REYNOLDS J N J. Targeting interhemispheric inhibition with neuromodulation to enhance stroke rehabilitation[J]. *Brain Stimul*, 2017, 10(2): 214-222. DOI: 10.1016/j.brs.2017.01.006.
- [33] MINZATANU D, ROMAN N A, MANAILA A I, et al. Virtual reality associated with functional electrical stimulation for upper extremity in post-stroke rehabilitation: a systematic review[J]. *Appl Sci*, 2024, 14(18): 8248. DOI: 10.3390/app14188248.
- [34] LUPU R G, IRIMIA D C, UNGUREANU F, et al. BCI and FES based therapy for stroke rehabilitation using VR facilities[J]. *Wirel Commun Mob Comput*, 2018, 2018(1): 4798359. DOI: 10.1155/2018/4798359.
- [35] FEITOSA J A, FERNANDES C A, CASSEB R F, et al. Effects of virtual reality-based motor rehabilitation: a systematic review of fMRI studies[J]. *J Neural Eng*, 2022, 19(1). DOI: 10.1088/1741-2552/ac456e.
- [36] CHOY C S, CLOHERTY S L, PIROGOVA E, et al. Virtual reality assisted motor imagery for early post-stroke recovery: a review[J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2023, 16: 487-498. DOI: 10.1109/RBME.2022.3165062.
- [37] TEO W P, MUTHALIB M, YAMIN S, et al. Does a combination of virtual reality, neuromodulation and neuroimaging provide a comprehensive platform for neurorehabilitation? A narrative review of the literature[J]. *Front Hum Neurosci*, 2016, 10: 284. DOI: 10.3389/fnhum.2016.00284.
- [38] ANSADO J, CHASEN C, BOUCHARD S, et al. How brain imaging provides predictive biomarkers for therapeutic success in the context of virtual reality cognitive training[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2021, 120: 583-594. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2020.05.018.
- [39] FAN Y T, LIN K C, LIU H L, et al. Changes in structural integrity are correlated with motor and functional recovery after post-stroke rehabilitation[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2015, 33(6): 835-844. DOI: 10.3233/RNN-150523.
- [40] EKMAN U, FORDELL H, ERIKSSON J, et al. Increase of frontal neuronal activity in chronic neglect after training in virtual reality[J]. *Acta Neurol Scand*, 2018, 138(4): 284-292. DOI: 10.1111/ane.12955.

[本文编辑] 杨亚红