

虚拟现实技术应用于感觉-运动功能康复的专家共识*

徐建光^{1,2,3,11} 王 彤⁴ 单春雷³ 敖丽娟⁵ 胡昔权⁶ 郭 帅⁷ 周俊明⁸ 李春波⁹ 张道强¹⁰
华续赞^{1,2,3} 郑谋雄^{1,2,3} 吴佳佳^{1,2,3} 郭 川⁴ 陈莱弦⁵ 艾一楠⁶ 马 洁² 薛 炘²

摘要

目的:制定虚拟现实(virtual reality, VR)技术应用于感觉-运动功能康复的专家共识,为感觉运动功能障碍患者的VR康复提供指导意见。

方法:本共识由科技部国家重点研发计划(2018YFC2001600)项目组牵头组织康复医学、工程学、人工智能等多学科专家,经过多轮专家调研、会议讨论,并在循证医学方法学的指导下,通过系统检索临床研究数据、评价临床证据及判断证据质量,再经讨论后制订。

结果:本共识聚焦于VR技术应用于感觉运动功能的康复评估和康复治疗,内容包括VR感觉运动康复的适应证、禁忌证和不良反应、基于VR技术的感觉运动康复的内容要求、康复流程以及临床应用推荐,为感觉运动功能障碍患者的VR康复提供指导意见。

结论:本共识的制定为VR技术在感觉运动功能康复领域的应用提供了系统化和标准化的指导,有助于促进相关技术的进一步发展和临床实践的推广。

关键词 虚拟现实;感觉运动功能;康复;临床应用;专家共识

中图分类号:R493 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-1242(2024)-04-0461-10

感觉或运动障碍是很多疾病存在的问题。良好的平衡、步行、协调能力依赖于感觉系统,需要视觉、前庭觉和本体感觉的输入。感觉系统提供了头和身体在空间中的定向,以及身体部位的相对位置和运动反馈^[1]。除了肌肉骨骼系统疾病,大多数神经系统疾病如脑卒中和帕金森病患者的上下肢运动能力下降,平衡和协调、步行等方面存在问题,导致日常生活能力降低^[2]。即使神经系统疾病的患者肌肉力量不受影响,如果出现感觉功能受损,也可能出现严重的运动功能障碍^[3]。《国际功能、残疾和健康分类》指出,健康应从身体功能与结构、活动及参与三个方面考虑。感觉或运动障碍的患者身体功能降低,活动和参与减少,增加感觉或运动障碍患者的日常生活活动能力、提高生活质量是康复的目标^[4]。

虚拟现实(virtual reality, VR)采用以计算机为核心的现代高科技手段生成逼真的视觉、听觉、触觉、嗅觉及味觉等多感官一体化的数字化人工环境。在这个基础上,用户借助一些输入与输出设备,采用自然的方式与虚拟世界的对象进行交互,相互影响,从而产生亲临真实环境的感觉和体验。VR作为一种计算机生成的仿真技术,可以创造一个丰富、逼真

的环境,促进特定任务的训练,并通过取代或加强对用户的反馈(例如视觉、听觉、触觉),提供在虚拟世界中存在的感觉^[5]。尤其在感觉和运动功能康复中,VR不仅可以模拟各种日常生活活动,还能够实时反馈患者的表现。虚拟环境和物体为用户提供视觉反馈,可以通过头戴式设备、投影系统或平板屏幕进行呈现。反馈也可以通过感官提供,例如听觉、触觉、运动、平衡和嗅觉^[6],多感官信息整合促进感觉运动功能康复。近年来,随着VR技术的普及和成本的降低,VR技术在康复医学领域崭露头角,成为感觉和运动功能康复的有力工具^[7]。尽管相关研究领域快速发展,但目前学界尚无VR康复的规范化专家共识。基于此,本共识聚焦于VR技术应用于感觉运动功能的康复评估和康复治疗,由科技部国家重点研发计划(2018YFC2001600)项目组牵头组织康复医学、工程学、人工智能等多学科专家,经过多轮专家调研、会议讨论,并在循证医学方法学的指导下,通过系统检索临床研究数据、评价临床证据及判断证据质量,再经讨论后制订,期为感觉运动功能障碍患者的VR康复提供指导意见。

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2024.04.002

*基金项目:国家科技部重点研发计划项目(2018YFC2001600)

1 中医智能康复教育部工程研究中心,上海市,201203; 2 上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院康复医学中心; 3 上海中医药大学康复医学院; 4 江苏省人民医院康复医学中心; 5 昆明医科大学康复医学院; 6 中山大学附属第三医院康复医学科; 7 上海大学;

8 复旦大学附属华山医院; 9 上海市精神卫生中心; 10 南京航空航天大学; 11 通讯作者

第一作者简介:徐建光,男,教授,主任医师; 收稿日期:2024-01-16

1 证据来源

本共识通过检索PubMed、Embase、Web of Science英文数据库以及中国知网、万方数据库、维普数据库等中文数据库,纳入基于VR技术的感觉运动功能康复评估和康复治疗的研究文献,参考牛津循证医学中心(Oxford Centre for Evidence-Based Medicine, OCEBM)证据等级评价系统对证据质量进行评价。采用2009年更新制定的版本,并依据临床证据分级标准和推荐强度系统将循证等级划分为5级(1—5级),推荐强度采用A—D(从强到弱)。

2 VR感觉运动康复的临床应用

2.1 适应证

VR在感觉运动康复中的应用展示了其在医疗领域的多样性和深远影响。VR感觉运动康复主要集中在提供模拟环境和活动来帮助患者恢复或提高他们的运动和感觉功能。这一技术的应用范围广泛,适用于多种疾病引起的感觉运动功能障碍的评估和治疗,包括但不限于上肢、下肢、躯干控制等。相关疾病包括:①神经系统疾病,如脑卒中、脑外伤、脊髓损伤、帕金森病、多发性硬化等^[8-11],在脑损伤后的不同康复阶段均有适用^[12-15];②老年人康复训练,保持运动功能,减少跌倒的风险^[16-18];③慢性疼痛管理^[19-20];④儿童发育性障碍,如脑性瘫痪、自闭症等^[21-23];⑤运动损伤^[24];⑥骨关节疾病,如膝骨关节炎、前交叉韧带重建术后、膝关节置换术后、肌腱损伤修复术后、断指再植术后、髋关节置换术等^[25-31];⑦截肢患者的幻肢痛治疗及运动康复^[32];⑧肿瘤康复^[33];⑨精神疾病患者的身体康复^[34];⑩内脏功能康复,如慢性阻塞性肺疾病、心脏病、血液透析患者的功能康复^[35-37]。

康复训练场所包括医院康复科、社区康复中心、养老机构、家庭康复等。通过VR技术可提供更加方便的远程康复服务。

2.2 禁忌证与不良反应

不良反应包括VR本身的不良反应,如眩晕、头痛、恶心、眼睛疲劳等,这些可能因长时间使用VR设备或对虚拟环境的不适应而产生,建议提供个性化的适应训练,逐渐增加VR的使用时间。对于易患癫痫或有癫痫倾向的人,VR中的快速闪烁可能诱发癫痫发作,这是VR使用的一个严重但不广泛的副作用^[38-39]。建议控制屏幕闪烁频率,避免使用过于剧烈的视觉效果,对有癫痫风险的患者进行筛查,避免高风险患者使用,尤其在儿童康复中。也包括与感觉运动康复相关的不良反应,如在进行特定的感觉运动训练时,可能出现肌肉疼痛、关节压力增加等,尤其是在初期不适应训练强度时。对于感觉功能障碍康复的患者,VR程序中的感觉刺激可能过于强烈,导致感觉过载^[40]。同时,高度沉浸的虚拟环境可能使某些患者产生迷失感。建议根据患者的个体情况

调整刺激,并提供有定向辅助的、易于耐受的环境。对于运动功能障碍康复的患者,虚拟环境中的运动控制可能比真实环境更加困难,导致挫败感进而训练效果不佳。建议根据患者实际能力调整训练难度,给予适当的运动辅助,并提供易操作的交互界面。另外还会产生心理反应,某些患者可能会因VR环境产生焦虑或恐惧感,尤其是在面对模拟的高风险或挑战性场景时。在康复治疗过程中,应综合考虑VR技术的特性和感觉运动康复的需求,对潜在不良反应进行监测和管理,以确保安全有效的康复过程。

禁忌证:①存在明确的康复治疗禁忌证(如不稳定心绞痛、急性心肌梗死、严重高血压、心肝肾功能严重不全及严重感染、各种出血倾向、生命体征不稳定、癫痫发作期、严重器质性疾病等);②神志不清、精神障碍、严重听理解或认知障碍等不配合治疗;③视力、听力有严重障碍不能使用VR设备。

3 基于VR技术的感觉运动康复的内容要求

3.1 基于VR技术的感觉运动功能评估

3.1.1 辅助设备:根据评估内容的需要,配合使用力反馈设备、感应器、机器人辅助设备等,能增加真实性和精确度。例如,力反馈设备可以提供真实的物理交互,帮助评估患者的力量和运动协调能力^[41-42]。

3.1.2 多感觉系统综合评估:VR技术在评估中应涉及多种感觉功能,如视觉、触觉、前庭觉和本体感觉等。通过VR提供丰富的感官刺激,模拟真实生活情景,可评估患者在多种感觉输入下的反应和适应能力,提高评估的准确性和客观性^[43]。

3.1.3 感觉功能与日常生活技能的关联:通过VR技术,可以评估患者感觉功能对其日常生活技能的影响。例如,可以专门设计VR环境中的任务来评估触觉感知和辨别能力在手部精细与协调功能中的作用^[44]。

3.1.4 运动功能细节分析:使用高精度的力反馈设备和动作追踪传感器,可以精确评估上肢运动功能和下肢步态及平衡,提供关于患者运动模式和功能状态的详细信息^[45-46]。

3.1.5 运动策略和规划能力评估:VR技术可以模拟复杂的运动任务和情境,有助于评估患者的运动协调性、决策能力和运动规划能力^[47-48]。同时,观察心理因素如动机、焦虑对运动功能的影响^[49]。

3.1.6 感觉与运动功能的交互影响:在VR评估中,特别关注多感官信息输入和认知需求对运动功能的综合影响,以及心理状态如何影响患者的运动能力^[44,50]。

3.1.7 持续研究与优化:鉴于VR技术在康复评估中仍面临挑战,未来的研究应致力于提高感觉刺激的真实性和患者对虚拟环境的沉浸度。此外,应将VR技术与计算机视觉、机器学习等技术融合,以提高评估的灵敏度和客观性。

3.2 基于VR技术的感觉运动功能康复干预

3.2.1 多感觉系统的刺激与集成:VR训练通过集成多种感觉系统(视觉、触觉、前庭觉和本体感觉)模拟真实生活情境。这种集成增强训练的逼真度和有效性,为患者提供丰富多样的感觉体验,有助于改善感觉处理能力和感觉运动协调^[51]。如模拟公园行走的VR环境,结合视觉、听觉和本体感觉,以帮助平衡和步态训练^[52]。

3.2.2 日常技能训练的重点:VR训练专注于提升日常生活技能,如手部协调和抓握物体。模拟日常活动场景,帮助患者在安全环境中练习并提高实际生活自理能力^[53-54]。如VR中的烹饪或打字任务,需要精细的手眼协调能力^[55]。

3.2.3 运动策略和规划能力的提升:通过模拟复杂的运动任务,VR训练增强患者的运动协调性、决策和规划能力^[56]。要求策略规划和执行的VR游戏,如穿越迷宫或解谜^[57]。

3.2.4 感觉与运动功能的交互作用训练:VR训练重点在于评估和训练感觉输入与运动输出之间的交互作用,特别是在需要多种感觉输入协调的情况下^[58]。

3.2.5 精细运动功能训练:首先,应该融入模仿日常生活中需要精细运动技能的任务,如写字、扣纽扣或操作工具等^[57]。这些任务可以通过游戏化的方法来增加患者的参与度和兴趣。其次,任务应该要求精准度和协调性,并随着患者能力的提升逐渐增加难度,如设计一个涉及穿针引线或组装小型精密模型的VR游戏。此外,提供实时视觉反馈对于帮助患者纠正异常动作模式非常重要,例如在VR绘画活动中,系统可以突出显示缺乏稳定性或精确性的关节活动区域^[59]。最后,整合触觉反馈,如使用VR手套或手持控制器提供抓取或操纵虚拟物体时的触觉反馈,模拟质地和重量,有助于训练精细运动功能^[60]。

3.2.6 基于特定神经环路重塑机制的VR康复任务制定:脑功能康复的核心是特定神经环路的重塑,而目前虚拟现实康复训练技术较多关注视听场景带来的趣味性和沉浸度,导致其临床疗效遇到瓶颈。VR在感觉运动康复中的应用需要超越单纯的视听刺激,更深入地结合特定神经环路的重塑机制和理论。VR训练内容应基于神经科学的研究,针对特定的神经环路和大脑区域进行设计。例如在完全沉浸式的虚拟环境中进行单侧和双侧上肢训练,对于虚拟场景中上肢动作的观察可以激活大脑中的镜像神经元,比常规康复治疗更能显著提高脑卒中患者的上肢功能,并且大脑初级运动皮质激活显著增加^[61]。此外,重复性是重塑大脑的关键因素,可创建基于神经可塑性的重复性特定任务练习。例如,重复练习抓取物体的VR游戏,有助于重建这些动作所涉及的神经环路^[62]。

4 VR感觉运动康复流程

4.1 治疗前评估

包括了解患者的病史、当前的感觉和运动功能状态及任

何可能影响VR治疗的心理健康问题。特别关注于个体的感觉敏感性、感觉失调等问题。对于运动障碍患者,详细评估其肌肉力量、协调性和关节活动范围等。

4.2 治疗前准备

需要对患者进行详细的VR技术培训和介绍。确保他们理解VR设备的使用方法、治疗过程中可能遇到的不适感,以及如何有效地与虚拟环境互动。对于运动障碍患者,提供特定的运动辅助支持和适当的安全措施。

4.3 治疗过程

根据患者的具体需求设定康复计划,实时监测患者的反应和进展,确保任务难度与患者的康复水平相匹配。

4.4 治疗后报告

对患者的进展进行详细地评估和记录,包括患者在处理感觉输入和执行运动任务方面的反应,以便于后续调整治疗策略。

4.5 定期评估

定期对患者进行全面评估,以确保VR康复疗效的持续。重点评估患者在感觉整合和运动技能方面的进步,以及这些进步如何转化为日常生活活动能力的改善。

4.6 向现实世界应用的过渡

逐步帮助患者将VR训练中获得技能转化为现实生活中的实际应用,特别注意感觉反馈和运动执行能力在日常生活中的应用。

4.7 最终评估和后续跟进

在治疗结束时,对患者的整体康复效果进行最终评估。评估感觉和运动功能康复的长期改善,并根据需要制定后续跟进计划,以维持和提升康复疗效。

5 基于VR技术的感觉运动康复临床应用推荐

5.1 VR应用于感觉功能康复评估

5.1.1 触觉感知与辨别能力评估:通过交互的VR系统评估患者的触觉感知能力,特别适用于需要精细手部协调和物体感知的场景^[44]。

5.1.2 手部运动感知评估:利用头戴式VR设备内置的手部跟踪功能,分析视觉与本体感觉对手部精细运动的贡献,为精细化手部协调能力评估提供新视角^[63]。

5.1.3 平衡与视觉感知评估:采用VR技术进行平衡测试,精确量化视觉、本体感觉和前庭系统对姿势控制的影响,有助于制定个性化平衡干预策略^[64]。

5.1.4 特定临床人群的感觉评估:多项研究证明了VR在脑卒中、帕金森病、脑震荡和自闭症谱系障碍等特定人群中感觉功能评估的应用潜力,体现了较好的信度和效度^[50,65-67]。

5.2 VR应用于运动功能康复评估

5.2.1 上肢运动功能评估:通过模拟抓取、搬运、敲击等任

务,综合评估上肢的灵活性、协调性和肌力情况^[41,47]。结合力触觉反馈,进一步提升评估的精准度和实用性^[68]。

5.2.2 下肢运动功能评估:利用VR模拟步行、跑步、躲避障碍等任务,全面评估下肢的运动能力、步态模式和平衡能力。特别是对于步态和平衡的评估,VR技术能够提供安全的评估环境,并通过模拟不同的行走路面和环境因素,评估患者的适应性和反应能力,如帕金森病的冻结步态^[69]。

5.2.3 运动策略和规划评估:VR技术能够模拟复杂的运动任务和运动环境,评估患者的运动策略、协调性和决策能力,如在模拟的运动游戏中观察患者的动作规划、反应时间和决策过程。

5.3 VR应用于感觉功能康复治疗

脑卒中:VR技术在脑卒中患者的感觉功能康复方面显示出良好的效果,推荐将VR康复作为综合康复方案的一部分用于提高脑卒中患者的本体感觉(推荐强度A/1b)、浅感觉(推荐强度B/2b)和平衡觉(推荐强度A/1b)^[70]。其中在浅感觉的康复中,VR康复较常规镜像治疗有更显著的改善^[51]。

创伤性脑损伤:VR技术应用于创伤性脑损伤的感觉康复主要专注于平衡觉、前庭功能的康复,康复疗效并不优于常规康复^[71](推荐强度A/1b)。VR康复可以作为康复计划的一部分,但建议在实施前对患者进行详细评估,以确保安全性和最佳疗效。

多发性硬化:VR技术在多发性硬化患者的感觉功能康复中展示了良好的临床疗效,主要是在平衡觉方面,推荐在康复训练中融入VR技术^[52](推荐强度A/1b)。

前庭功能障碍:VR干预在增强平衡和减轻前庭功能障碍症状(如眩晕残疾指数和眩晕视觉类比量表)方面有一定的疗效,但需要进一步研究其长期获益和疗效。传统的前庭康复仍是有效的治疗方法,推荐与VR康复相结合以可能获得更好的疗效^[72](推荐强度B/2b)。

儿童脑发育障碍:VR康复在儿童的感觉统合能力康复中有显著效果,优于常规感统治疗,推荐在儿童感觉功能康复中融入VR技术^[73](推荐强度A/1b)。

脊髓损伤:脊髓损伤患者,特别是有神经病理性疼痛的患者,VR康复在改善疼痛程度、心理质量和睡眠障碍方面疗效显著,推荐在脊髓损伤的感觉功能康复治疗中融入VR技术^[74](推荐强度A/1b)。

慢性疼痛:常规康复基础上加上VR康复可以在疼痛、运动恐惧、疲劳、体力活动水平和生活质量的精神心理方面带来更显著的改善^[75]。推荐将VR技术作为慢性疼痛患者康复的一部分,特别是当传统康复方法不能完全缓解患者症状时^[76](推荐强度A/1b)。

5.4 VR应用于运动功能康复治疗

脑卒中:VR运动康复在改善脑卒中患者的运动功能和

日常生活能力方面具有潜力,在上肢运动功能、步态、平衡、躯干控制、下肢肌力和整体运动功能均有显著康复疗效。基于VR技术的运动康复是基于较高质量的研究证据,推荐作为脑卒中患者康复治疗的补充手段。多项meta分析结果提示基于VR技术的运动康复可以显著改善脑卒中患者的上肢功能^[8,77-78]、下肢功能^[79]、平衡功能^[80]、步行能力^[81](推荐强度A/1a)。研究中脑卒中的病程覆盖了急性期^[82]、亚急性期^[9,83]、恢复期^[84]、慢性期^[85-86]的全程康复。但与常规康复治疗相比,VR康复在亚急性期和慢性期的卒中上肢运动功能康复中无显著差异^[9,77],而与常规康复治疗联合可体现更显著的运动康复疗效^[60]。1项meta分析研究结果显示与传统康复治疗相比,半沉浸式VR联合触觉反馈手套康复可在短期内显著改善脑卒中患者的上肢功能,但在患手握力上无显著差异^[60,87](推荐强度A/1a)。长期随访后没有发现显著改善,但在常规康复治疗基础上进行康复手套联合VR康复可有长期的疗效。1项网络meta分析比较机器人辅助训练、VR、机器人辅助康复联合VR在改善脑卒中患者平衡、步态和日常功能方面的疗效,结果提示与机器人辅助训练和常规康复治疗相比,机器人辅助训练联合VR是平衡功能康复的最佳干预措施,VR康复最有助于提高日常生活能力^[80](推荐强度A/1a)。另有meta分析总结了非侵入性脑刺激(non-invasive brain stimulation, NIBS)和VR环境中的任务训练结合促进脑卒中上肢运动功能康复的疗效,结果显示NIBS联合VR康复对亚急性卒中的上肢功能康复有益(推荐强度A/1a),而在慢性卒中上肢运动功能康复中,VR联合真NIBS并不优于VR联合假NIBS干预^[88]。研究中包括使用沉浸式VR^[89-90]、非沉浸式VR^[91]和半沉浸式VR^[60]。1项网络meta分析结果提示沉浸式VR比非沉浸式VR康复在脑卒中后上肢运动功能康复中有更显著的疗效^[92]。有meta研究的亚组分析结果显示,无论干预时间是 ≤ 4 周还是 ≥ 5 周,VR组对于脑卒中后上肢功能的提升都优于常规康复组,但在步态改善方面,需要至少5周的VR康复才能有显著疗效(推荐强度A/1a)^[79]。建议在病程较长的脑卒中患者中,增加VR运动康复的频率^[93]。

帕金森病:VR运动康复可以显著改善帕金森病患者的步态、平衡和日常生活能力,推荐作为平衡和步态康复的补充干预手段^[94-95]。1项纳入1031名被试的meta分析结果显示VR运动康复比主动康复干预更显著改善步幅,比被动康复干预更显著改善平衡功能,单个RCT的结果提示VR康复在改善步速方面较被动康复干预更显著,推荐在帕金森病康复治疗中常规使用VR运动康复^[94](推荐强度A/1a)。研究中大多使用了非沉浸式VR技术,包括Nintendo Wii、Tymo系统和Kinect传感器等^[96-97],这些技术通过提供虚拟环境和交互式游戏来提高帕金森病患者的运动功能和平衡。近期的研究开始关注到沉浸式VR^[98-99]和半沉浸式VR^[100],但对于帕

金森病患者的康复疗效仍需深入研究。

创伤性脑损伤:VR技术在创伤性脑损伤患者的感觉运动功能康复治疗中展示了改善平衡、步态和姿势控制的潜力。VR结合常规训练与单独的常规康复相比,在改善患者静态和动态平衡方面疗效一致^[101](推荐强度A/1b)。在创伤性脑损伤慢性康复期,采用VR技术结合步行平板训练可显著改善平衡功能和转移能力,但并不优于单独平板训练^[102](推荐强度A/1b)。1个病例报告发现基于VR的实时反馈步态训练,能显著提高步长、步幅和单腿支撑时间,从而改善下肢运动功能和整体步态表现^[103](推荐强度C/4)。

脊髓损伤:VR技术在脊髓损伤(包括完全和不完全脊髓损伤)患者的康复治疗中,可改善患者的上肢运动功能^[104](推荐强度A/1a)、平衡和步行功能^[105](推荐强度B/2a),但疗效并不优于常规康复治疗,推荐作为常规康复治疗的补充。研究中大多采用非沉浸式VR^[105]和半沉浸式VR^[106],也有少部分沉浸式VR技术^[107],都显示出在改善脊髓损伤患者运动功能方面的潜力。另外在1项RCT中,在常规康复治疗基础上进行VR康复训练,与常规康复治疗相比,上肢粗大运动功能和日常生活活动能力有显著改善,但手功能改善无显著差异,提示VR技术的康复疗效在不同的关节有所差异^[105]。

多发性硬化:VR技术在多发性硬化的康复中表现出对平衡、步态、上肢运动及姿势控制等方面的显著改善。两项RCT结果显示VR康复结合常规康复治疗的多发性硬化患者日常生活活动能力、平衡、步态的康复疗效显著优于常规运动康复治疗^[108-109](推荐强度A/1b)。6项RCT结果显示基于VR技术的多发性硬化症患者日常生活能力、平衡、步态运动功能康复疗效显著优于常规运动康复治疗^[110-115](推荐强度A/1b)。一项纳入了19项RCT的meta分析结果显示基于VR技术的康复可有效改善多发性硬化患者的功能性平衡、动态平衡、姿势控制,减少对跌倒的恐惧(推荐强度A/1a),但对步行速度无显著疗效。另外,该研究报告了VR康复对于功能性平衡的最佳剂量为至少40次干预,每周5次,每次40—45min;对于动态平衡则建议在8—19周,每周2次,每次20—30min。

老年人:基于VR技术的康复治疗相较于传统康复治疗在改善老年人的平衡、步态和下肢力量方面更有效,特别是在提高步行速度和日常活动能力方面显示出良好的效果^[118,116-118]。同时,VR训练还可以减少跌倒次数和提高生活质量^[116,118]。3项RCT结果显示基于VR技术的平衡、步态、下肢肌肉力量、握力康复疗效显著优于常规康复治疗^[116-117,119](推荐强度A/1b)。5项meta分析研究结果显示基于VR技术的老年人平衡、步态、步行速度、预防跌倒功能康复疗效显著优于常规运动康复治疗^[16-18,118,120](推荐强度A/1a)。1项总结非沉浸式VR康复对于老年人平衡和步行功能改善的meta

分析中,按照传感器类型进行亚组分析的结果显示,基于压力传感器的VR平衡训练与基于动力学传感器的训练同样有效,根据反馈类型进行亚组分析的结果显示,实时反馈(knowledge of performance, KP)在提高平衡能力方面比单独结果反馈(knowledge of results, KR)更有效,有虚拟运动参考提供姿势和运动反馈也可以更有效改善平衡^[18]。建议VR康复时间超过1100min,推荐剂量为每次1h,每周3次,持续6周^[18]。

脑瘫儿童:VR技术在提高脑瘫患儿的粗大运动功能、精细运动能力和平衡功能方面表现出积极效果。其应用包括运动技能学习、日常生活活动改善,以及上下肢运动能力和姿势控制^[121-122]。随着每日治疗剂量的增加,VR的疗效呈现出累积效应^[53]。4项RCT结果显示基于VR技术结合常规康复的上肢运动和粗大运动功能康复疗效显著优于常规康复治疗^[121-124](推荐强度A/1b)。1项纳入44个RCT的meta分析结果显示,基于VR技术的康复训练在改善总体粗大功能、行走及站立维度方面更有效,在改善上肢运动功能的4个分量表(准确性、灵活性、运动范围和流畅性)方面更有效,在改善其他功能评估方面与常规物理治疗疗效相比无显著差异^[23](推荐强度A/1a)。推荐将VR康复与常规康复治疗相结合,如神经发育疗法、感统训练等,以提高康复疗效^[23,121-122,124]。

6 总结与展望

在感觉运动功能康复领域,VR技术作为一种创新工具,展现出了巨大的潜力和多样化应用。它在提供安全、可控环境的同时,能够通过模拟各种场景来精确评估患者的感觉和运动功能,极大地提高了评估的准确性和效率,并为患者带来更丰富、可互动的康复治疗体验。尽管VR技术在感觉运动功能康复领域具有巨大潜力,但设备与产品参差不齐,未来需要更多的专业设备和深入研究。需要持续进行创新和研究,以不断提高VR在脑功能康复领域的有效性和适应性,并探索新的康复方法。随着技术的发展,VR有望在临床上为更多感觉和运动功能障碍患者带来福音。

参考文献

- [1] Mackinnon CD. Sensorimotor anatomy of gait, balance, and falls [J]. *Handb Clin Neurol*, 2018, 159: 3—26.
- [2] Sevchenko K, Lindgren I. The effects of virtual reality training in stroke and Parkinson's disease rehabilitation: a systematic review and a perspective on usability [J]. *Eur Rev Aging Phys Act*, 2022, 19(1): 4.
- [3] Bolognini N, Russo C, Edwards DJ. The sensory side of post-stroke motor rehabilitation [J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2016, 34(4): 571—586.

- [4] Constand MK, Macdermmid JC. Applications of the international classification of functioning, disability and health in goal-setting practices in healthcare [J]. Disabil Rehabil, 2014, 36(15): 1305—1314.
- [5] Laver KE, Lange B, George S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation [J]. Cochrane Database Syst Rev, 2017, 11(11): CD008349.
- [6] Katz N, Ring H, Naveh Y, et al. Interactive virtual environment training for safe street crossing of right hemisphere stroke patients with unilateral spatial neglect [J]. Disabil Rehabil, 2005, 27(20): 1235—1243.
- [7] Tieri G, Morone G, Paolucci S, et al. Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies [J]. Expert Rev Med Devices, 2018, 15(2): 107—117.
- [8] Chen J, Or CK, Chen T. Effectiveness of using virtual reality-supported exercise therapy for upper extremity motor rehabilitation in patients with stroke: Systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. J Med Internet Res, 2022, 24(6): e24111.
- [9] Peng QC, Yin L, Cao Y. Effectiveness of virtual reality in the rehabilitation of motor function of patients with subacute stroke: A meta-analysis [J]. Front Neurol, 2021, 12: 639535.
- [10] 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.
- [11] Chen Y, Gao Q, He CQ, et al. Effect of virtual reality on balance in individuals with parkinson disease: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Phys Ther, 2020, 100(6): 933—945.
- [12] Kim JH, Jang SH, Kim CS, et al. Use of virtual reality to enhance balance and ambulation in chronic stroke: A double-blind, randomized controlled study [J]. Am J Phys Med Rehabil, 2009, 88(9): 693—701.
- [13] Kong KH, Loh YJ, Thia E, et al. Efficacy of a virtual reality commercial gaming device in upper limb recovery after stroke: A randomized, controlled study [J]. Top Stroke Rehabil, 2016, 23(5): 333—340.
- [14] de Rooij IJM, van de Port IGL, Punt M, et al. Effect of virtual reality gait training on participation in survivors of subacute stroke: A randomized controlled trial [J]. Phys Ther, 2021, 101(5): pzab051.
- [15] Ikbali Afsar S, Mirzayev I, Umit Yemisci O, et al. Virtual reality in upper extremity rehabilitation of stroke patients: A randomized controlled trial [J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2018, 27(12): 3473—3478.
- [16] Lee YH, Lin CH, Wu WR, et al. Virtual reality exercise programs ameliorate frailty and fall risks in older adults: A meta-analysis [J]. J Am Geriatr Soc, 2023, 71(9): 2946—2955.
- [17] Liu M, Zhou K, Chen Y, et al. Is Virtual reality training more effective than traditional physical training on balance and functional mobility in healthy older adults? A systematic review and meta-analysis [J]. Front Hum Neurosci, 2022, 16: 843481.
- [18] Park JH, Jeon HS, Kim JH, et al. Effectiveness of nonimmersive virtual reality exercises for balance and gait improvement in older adults: A meta-analysis [J]. Technol Health Care, 2023, 1—16.
- [19] Sano Y, Wake N, Ichinose A, et al. Tactile feedback for relief of deafferentation pain using virtual reality system: a pilot study [J]. J Neuroeng Rehabil, 2016, 13(1): 61.
- [20] Solcà M, Krishna V, Young N, et al. Enhancing analgesic spinal cord stimulation for chronic pain with personalized immersive virtual reality [J]. Pain, 2021, 162(6): 1641—1649.
- [21] Han Y, Park S. Effectiveness of virtual reality on activities of daily living in children with cerebral palsy: A systematic review and meta-analysis [J]. PeerJ, 2023, 11: e15964.
- [22] Montoro-Cárseas D, Cortés-Pérez I, Ibancos-Losada M D R, et al. Nintendo® Wii therapy improves upper extremity motor function in children with cerebral palsy: A systematic review with meta-analysis [J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(19): 12343.
- [23] Tobaiqi MA, Albadawi EA, Fadlalmola HA, et al. Application of virtual reality-assisted exergaming on the rehabilitation of children with cerebral palsy: A systematic review and meta-analysis [J]. J Clin Med, 2023, 12(22): 7091.
- [24] Gokeler A, Bisschop M, Myer GD, et al. Immersive virtual reality improves movement patterns in patients after ACL reconstruction: Implications for enhanced criteria-based return-to-sport rehabilitation [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2016, 24(7): 2280—2286.
- [25] Hadamus A, Blazkiewicz M, Wydra KT, et al. Effectiveness of early rehabilitation with exergaming in virtual reality on gait in patients after total knee replacement [J]. J Clin Med, 2022, 11(17): 4950.
- [26] Pournajaf S, Goffredo M, Pellicciari L, et al. Effect of balance training using virtual reality-based serious games in individuals with total knee replacement: A randomized controlled trial [J]. Ann Phys Rehabil Med, 2022, 65(6): 101609.
- [27] Zavala-González J, Martínez D, Gutiérrez-Espinoza H. Effectiveness of adding virtual reality to physiotherapeutic treatment in patients with total hip arthroplasty. A randomized controlled trial [J]. Clin Rehabil, 2022, 36(5): 660—668.
- [28] 李瑾, 宋佳凝, 鄢淑燕. 虚拟情景游戏训练改善膝关节炎患

- 者全膝关节置换术后平衡功能及焦虑抑郁的效果[J]. 中国临床医学, 2022, 29(1): 74—78.
- [29] 金天福, 李彦林. 虚拟现实平衡训练联合运动训练对前交叉韧带重建术后的影响[J]. 实用骨科杂志, 2022, 28(7): 659—663.
- [30] 黎勤华, 严程芬, 曾慧宜. 基于虚拟现实技术的作业康复锻炼在断指再植术后患者中的应用[J]. 齐鲁护理杂志, 2017, 23(24): 71—73.
- [31] 傅青. 虚拟情景反馈训练联合常规康复护理在手指屈肌腱损伤术后患者中的应用效果[J]. 中国民康医学, 2022, 34(7): 100—102+106.
- [32] Darter BJ, Wilken JM. Gait training with virtual reality-based real-time feedback: improving gait performance following transfemoral amputation [J]. *Phys Ther*, 2011, 91(9): 1385—1394.
- [33] Bu X, Ng PH, Xu W, et al. The effectiveness of virtual reality-based interventions in rehabilitation management of breast cancer survivors: Systematic review and meta-analysis [J]. *JMIR Serious Games*, 2022, 10(1): e31395.
- [34] Pavlidou A, Walther S. Using virtual reality as a tool in the rehabilitation of movement abnormalities in schizophrenia [J]. *Front Psychol*, 2020, 11: 607312.
- [35] Yangöz ŞT, Turan Kavradım S, Özer Z. The effects of virtual reality-based exercise in adults receiving haemodialysis treatment: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled studies [J]. *Appl Psychol Health Well Being*, 2023, 15(3): 1182—1217.
- [36] 柳萍, 刘青, 韩伟, 等. 虚拟现实技术结合综合肺康复对稳定期慢性阻塞性肺疾病患者疗效评估[J]. 国际老年医学杂志, 2017, 38(2): 59—62.
- [37] Chen Y, Cao L, Xu Y, et al. Effectiveness of virtual reality in cardiac rehabilitation: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Int J Nurs Stud*, 2022, 133: 104323.
- [38] Fisher RS, Acharya JN, Baumer FM, et al. Visually sensitive seizures: An updated review by the epilepsy foundation [J]. *Epilepsia*, 2022, 63(4): 739—768.
- [39] Tychsen L, Thio LL. Concern of photosensitive seizures evoked by 3D video displays or virtual reality headsets in children: Current Pperspective [J]. *Eye Brain*, 2020, 12: 45—48.
- [40] Keshner EA, Lamontagne A. The untapped potential of virtual reality in rehabilitation of balance and gait in neurological disorders. [J]. *Front Virtual Real*, 2021, 2: 641650.
- [41] Tobler-Amman BC, de Bruin ED, Fluet MC, et al. Concurrent validity and test-retest reliability of the Virtual Peg Insertion Test to quantify upper limb function in patients with chronic stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2016, 13(1): 8.
- [42] Broeren J, Björkdahl A, Pascher R, et al. Virtual reality and haptics as an assessment device in the postacute phase after stroke [J]. *Cyberpsychol Behav*, 2002, 5(3): 207—211.
- [43] Marucci M, Di Flumeri G, Borghini G, et al. The impact of multisensory integration and perceptual load in virtual reality settings on performance, workload and presence [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 4831.
- [44] Isenstein EL, Waz T, LoPrete A, et al. Rapid assessment of hand reaching using virtual reality and application in cerebellar stroke [J]. *PLoS One*, 2022, 17(9): e0275220.
- [45] 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: 904985.
- [46] 董英, 刘笑宇, 唐敏, 等. 应用虚拟盒块测试系统评估脑卒中患者上肢运动功能的可行性研究[J]. 医用生物力学, 2023, 38(4): 763—769.
- [47] Arias P, Robies-García V, Sanmartín G, et al. Virtual reality as a tool for evaluation of repetitive rhythmic movements in the elderly and Parkinson's disease patients [J]. *PLoS One*, 2012, 7(1): e30021.
- [48] Beani E, Filogna S, Martini G, et al. Application of virtual reality rehabilitation system for the assessment of postural control while standing in typical children and peers with neurodevelopmental disorders [J]. *Gait Posture*, 2022, 92: 364—370.
- [49] Rohrbach N, Chicklis E, Levac DE. What is the impact of user affect on motor learning in virtual environments after stroke? A scoping review [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1): 79.
- [50] Canning CG, Allen NE, Nackaerts E, et al. Virtual reality in research and rehabilitation of gait and balance in Parkinson disease [J]. *Nat Rev Neurol*, 2020, 16(8): 409—425.
- [51] Sip P, Kozłowska M, Czysz D, et al. Perspectives of motor functional upper extremity recovery with the use of immersive virtual reality in stroke patients. [J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23(2): 712.
- [52] Ortiz-Gutiérrez R, Cano-de-la-Cuerda R, Galán-del-Río F, et al. A telerehabilitation program improves postural control in multiple sclerosis patients: A Spanish preliminary study [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2013, 10(11): 5697—59710.
- [53] 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]. *Phys Ther*, 2018, 98(1): 63—77.
- [54] Levac DE, Huber ME, Sternad D. Learning and transfer of complex motor skills in virtual reality: A perspective re-

- view [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1): 121.
- [55] Ögün MN, Kurul R, Yaşar MF, et al. Effect of leap motion-based 3D immersive virtual reality usage on upper extremity function in ischemic stroke patients [J]. *Arq Neuropsiquiatr*, 2019, 77(10): 681—688.
- [56] Yookyungjin, Kim, Jeongki. Effect of physical rehabilitation program using motion recognition based immersive virtual reality contents on upper extremity and hand function and activities of daily living of stroke patients [J]. *J Occupational Ther Aged Dementia*, 2021, 15(2): 35—44.
- [57] Sheehy L, Taillon-Hobson A, Sveistrup H, et al. Home-based virtual reality training after discharge from hospital-based stroke rehabilitation: A parallel randomized feasibility trial [J]. *Trials*, 2019, 20(1): 333.
- [58] Zheng J, Ma Q, He W, et al. Cognitive and motor cortex activation during robot-assisted multi-sensory interactive motor rehabilitation training: An fNIRS based pilot study [J]. *Front Hum Neurosci*. 2023, 17: 1089276.
- [59] Campo-Prieto P, Cancela-Carral JM, Rodríguez-Fuentes G. Feasibility and effects of an immersive virtual reality exergame program on physical functions in institutionalized older adults: A randomized clinical trial [J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(18): 6742.
- [60] Fernández- Vázquez D, Cano- de- la- Cuerda R, Navarro-López V. Haptic glove systems in combination with semi-Immersive virtual reality for upper extremity motor rehabilitation after stroke: A systematic review and meta-analysis [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19 (16) : 10378.
- [61] Mekbib DB, Debeli DK, Zhang L, et al. A novel fully immersive virtual reality environment for upper extremity rehabilitation in patients with stroke [J]. *Ann N Y Acad Sci*, 1493(1): 75—89.
- [62] Vourvopoulos A, Bermúdez I Badia S. Motor priming in virtual reality can augment motor-imagery training efficacy in restorative brain-computer interaction: A within-subject analysis [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2016, 13(1): 69.
- [63] Sip P, Kozłowska M, Czys D, et al. Perspectives of motor functional upper extremity recovery with the use of immersive virtual reality in stroke patients [J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23(2): 712.
- [64] 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.
- [65] Koirala A, Yu Z, Schiltz H, et al. A preliminary exploration of virtual reality-based visual and touch sensory processing assessment for adolescents with autism spectrum disorder [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2021, 29: 619—628.
- [66] Tannus J, Naves ELM, Morere Y. Post-stroke functional assessments based on rehabilitation games and their correlation with clinical scales: A scoping review [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2024, 62(1):47—60.
- [67] Lemarshall SJ, Stevens LM, Ragg NP, et al. Virtual reality-based interventions for the rehabilitation of vestibular and balance impairments post-concussion: A scoping review [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 10(1): 31.
- [68] Liu X, Zhu Y, Huo H, et al. Design of virtual guiding tasks with haptic feedback for assessing the wrist motor function of patients with upper motor neuron lesions [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2019, 27(5): 984—994.
- [69] Yamagami M, Imsdahl S, Lindgren K, et al. Effects of virtual reality environments on overground walking in people with Parkinson disease and freezing of gait [J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2023, 18(3): 266—273.
- [70] 周欢霞,黄尚军,刘倩雯,等. 上肢虚拟现实机器人改善脑卒中患者预后功能的临床研究[J]. *中医药导报*, 2018, 24(21): 48—50.
- [71] Gil-Gómez JA, Lloréns R, Alcañiz M, et al. Effectiveness of a Wii balance board-based system (eBaViR) for balance rehabilitation: A pilot randomized clinical trial in patients with acquired brain injury [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2011, 8: 30.
- [72] Micarelli A, Viziano A, Augimeri I, et al. Three-dimensional head-mounted gaming task procedure maximizes effects of vestibular rehabilitation in unilateral vestibular hypofunction: A randomized controlled pilot trial [J]. *Int J Rehabil Res*, 2017, 40(4): 325—332.
- [73] Wuang YP, Chiang CS, Su CY, et al. Effectiveness of virtual reality using Wii gaming technology in children with Down syndrome [J]. *Res Dev Disabil*, 2011, 32(1): 312—321.
- [74] 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.
- [75] Gulsen C, Soke F, Eldemir K, et al. Effect of fully immersive virtual reality treatment combined with exercise in fibromyalgia patients: A randomized controlled trial [J]. *Assist Technol*, 2022, 34(3):256—263.
- [76] Mehesz E, Karoui H, Strutton PH, et al. Exposure to an immersive virtual reality environment can modulate perceptual correlates of endogenous analgesia and central sensitization in healthy volunteers [J]. *J Pain*, 2021, 22(6): 707—714.
- [77] Al-Whaibi RM, Al-Jadid MS, ElSerougy HR, et al. Effectiveness of virtual reality-based rehabilitation versus conventional therapy on upper limb motor function of chronic stroke patients: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Physiother Theory Pract*,

- 2022, 38(13): 2402—2516.
- [78] Mekbib DB, Han J, Zhang L, et al. Virtual reality therapy for upper limb rehabilitation in patients with stroke: A meta-analysis of randomized clinical trials [J]. *Brain Inj*, 2020, 34(4): 456—465.
- [79] Zhang B, Li D, Liu Y, et al. Virtual reality for limb motor function, balance, gait, cognition and daily function of stroke patients: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Adv Nurs*, 2021, 77(8): 3255—3273.
- [80] Zhang B, Wong KP, Kang R, et al. Efficacy of robot-assisted and virtual reality interventions on balance, gait, and daily function in patients with stroke: A systematic review and network meta-analysis [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2023, 104(10): 1711—1719.
- [81] Ghai S, Ghai I, Lamontagne A. Virtual reality training enhances gait poststroke: A systematic review and meta-analysis [J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2020, 1478(1): 18—42.
- [82] 樊振梅,王春怀,谢婷,等.肢体协调辅助装置结合VR训练对急性脑梗死颅内血管介入治疗患者步态平衡和表面肌电图的影响[J]. *中国卒中杂志*, 2023, 18(2): 194—200.
- [83] Bian M, Shen Y, Huang Y, et al. A non-immersive virtual reality-based intervention to enhance lower-extremity motor function and gait in patients with subacute cerebral infarction: A pilot randomized controlled trial with 1-year follow-up [J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 987500.
- [84] Saposnik G, Cohen LG, Mamdani M, et al. Efficacy and safety of non-immersive virtual reality exercising in stroke rehabilitation (EVREST): A randomised, multicentre, single-blind, controlled trial [J]. *Lancet*, 2016, 15(10): 1019—1027.
- [85] Teixeira-Salmela LF, Nascimento LR, Rodrigues-Baroni JMI, et al. Multidisciplinary clinical rehabilitation gait-directed training associated with virtual reality-based therapy increases gait speed of individuals with chronic stroke: A systematic review with meta-analysis [J]. *Int J Stroke*, 2014, 9: 241—242.
- [86] Lee HS, Lim JH, Jeon BH, et al. Non-immersive virtual reality rehabilitation applied to a task-oriented approach for stroke patients: A randomized controlled trial [J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2020, 38(2): 165—172.
- [87] Meng J, Yan Z, Gu F, et al. Transcranial direct current stimulation with virtual reality versus virtual reality alone for upper extremity rehabilitation in stroke: A meta-analysis [J]. *Heliyon*, 2023, 9(1): e12695.
- [88] Subramanian SK, Prasanna SS. Virtual reality and noninvasive brain stimulation in stroke: how effective is their combination for upper limb motor improvement?—A meta-analysis [J]. *PM R*, 2018, 10(11): 1261—1270.
- [89] Huang Q, Jiang X, Jin Y, et al. Effectiveness of immersive VR-based rehabilitation on upper extremity recovery in subacute stroke: A randomized controlled trial [J]. *Trials*, 2019, 20(1): 104.
- [90] Lee SH. Upper extremity rehabilitation for stroke patients using fully immersive virtual reality game: A preliminary study [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2019, 100(10): e138—e139.
- [91] Martínez-Olmos FJ, Gómez-Conesa AA, García-Testal A, et al. An intradialytic non-immersive virtual reality exercise programme: a crossover randomized controlled trial [J]. *Nephrol Dial Transplant*, 2022, 37(7): 1366—1374.
- [92] Hao J, He Z, Yu X, et al. Comparison of immersive and non-immersive virtual reality for upper extremity functional recovery in patients with stroke: A systematic review and network meta-analysis [J]. *Neurol Sci*, 2023, 44(8): 2679—2697.
- [93] Hernandez A, Buby L, Archambault P S, et al. Virtual reality-based rehabilitation as a feasible and engaging tool for the management of chronic poststroke upper-extremity function recovery: Randomized controlled trial [J]. *JMIR Serious Games*, 2022, 10(3): e37506.
- [94] Triegaardt J, Han TS, Sada C, et al. The role of virtual reality on outcomes in rehabilitation of Parkinson's disease: meta-analysis and systematic review in 1031 participants [J]. *Neurol Sci*, 2020, 41(3): 529—536.
- [95] Yu J, Ww J, Lu J, et al. Efficacy of virtual reality training on motor performance, activity of daily living, and quality of life in patients with Parkinson's disease: An umbrella review comprising meta-analyses of randomized controlled trials [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 20(1): 133.
- [96] Maranesi E, Casoni E, Baldoni R, et al. The effect of non-immersive virtual reality exergames versus traditional physiotherapy in Parkinson's disease older patients: Preliminary results from a randomized-controlled trial [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(22): 14818.
- [97] Shin MC, Wang RY, Cheng SJ, et al. Effects of a balance-based exergaming intervention using the Kinect sensor on posture stability in individuals with Parkinson's disease: a single-blinded randomized controlled trial [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2016, 13(1): 78.
- [98] Yun SJ, Hyun SE, Oh BM, et al. Fully immersive virtual reality exergames with dual-task components for patients with Parkinson's disease: A feasibility study [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 20(1): 92.
- [99] Prieto PC, Carral JMC, Fuentes GR. Immersive virtual reality exergame for patients with Parkinson's disease: Feasibility and potential benefits [J]. *J Parkinsons Dis*, 2023, 13: 137.
- [100] Pullia M, Ciatto L, Andronaco G, et al. Treadmill training plus semi-immersive virtual reality in Parkinson's disease: Results from a pilot study [J]. *Brain Sci*, 2023, 13

- (9): 1312.
- [101] Cuthbert JP, Staniszewski K, Hays K, et al. Virtual reality-based therapy for the treatment of balance deficits in patients receiving inpatient rehabilitation for traumatic brain injury [J]. *Brain Inj*, 2014, 28(2): 181—188.
 - [102] Teferyiller C, Ketchum JM, Bartelt P, et al. Feasibility of virtual reality and treadmill training in traumatic brain injury: A randomized controlled pilot trial [J]. *Brain Inj*, 2022, 36(7): 898—908.
 - [103] Kim KH, Kim DH. Improved balance, gait, and lower limb motor function in a 58-year-old man with right hemiplegic traumatic brain injury following virtual reality-based real-time feedback physical therapy [J]. *Am J Case Rep*, 2023, 24: e938803.
 - [104] 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.
 - [105] 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.
 - [106] 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.
 - [107] 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.
 - [108] Lozano-Quilis JA, Gil-Gómez H, Gil-Gómez JA, et al. Virtual rehabilitation for multiple sclerosis using a kinect-based system: Randomized controlled trial [J]. *JMIR Serious Games*, 2014, 2(2): e12.
 - [109] Russo M, Dattola V, De Cola MC, et al. The role of robotic gait training coupled with virtual reality in boosting the rehabilitative outcomes in patients with multiple sclerosis [J]. *Int J Rehabil Res*, 2018, 41(2): 166—172.
 - [110] 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.
 - [111] Galperin I, Mirelman A, Schmitz-Hübsch T, et al. Treadmill training with virtual reality to enhance gait and cognitive function among people with multiple sclerosis: A randomized controlled trial [J]. *J Neurol*, 2023, 270(3): 1388—1401.
 - [112] Goffredo M, Pagliari C, Turolla A, et al. Non-immersive virtual reality telerehabilitation system improves postural balance in people with chronic neurological diseases [J]. *J Clin Med*, 2023, 12(9): 3178.
 - [113] Khalil H, Al-Sharman A, El-Salem K, et al. The development and pilot evaluation of virtual reality balance scenarios in people with multiple sclerosis (MS): A feasibility study [J]. *NeuroRehabilitation*, 2019, 43(4): 473—482.
 - [114] Pau M, Porta M, Bertoni R, et al. Effect of immersive virtual reality training on hand-to-mouth task performance in people with Multiple Sclerosis: A quantitative kinematic study [J]. *Mult Scler Relat Disord*, 2023, 69: 104455.
 - [115] Peruzzi A, Zarbo IR, Cereatti A, et al. An innovative training program based on virtual reality and treadmill: Effects on gait of persons with multiple sclerosis [J]. *Disabil Rehabil*, 2017, 39(15): 1557—1563.
 - [116] Kim J, Son J, Ko N, et al. Unsupervised virtual reality-based exercise program improves hip muscle strength and balance control in older adults: A pilot study [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2013, 94(5): 937—943.
 - [117] Lee K. Virtual reality gait training to promote balance and gait among older people: A randomized clinical trial [J]. *Geriatrics (Basel)*, 2020, 6(1): 1.
 - [118] Percy D, Phillips T, Torres F, et al. Effectiveness of virtual reality-based balance and gait in older adults with fear of movement: A systematic review and meta-analysis [J]. *Physiother Res Int*, 2023: e2037.
 - [119] Maillot P, Perrot A, Hartley A, et al. The braking force in walking: Age-related differences and improvement in older adults with exergame training [J]. *J Aging Phys Act*, 2014, 22(4): 518—526.
 - [120] de Amorim JSC, Leite RC, Brizola R, et al. Virtual reality therapy for rehabilitation of balance in the elderly: A systematic review and meta-analysis [J]. *Adv Rheumatol*, 2018, 58(1): 18.
 - [121] Chiu HC, Ada L, Lee HM. Upper limb training using Wii sports resort for children with hemiplegic cerebral palsy: A randomized, single-blind trial [J]. *Clin Rehabil*, 2014, 28(10): 1015—1024.
 - [122] Metin Ökmen B, Doğan Aslan M, Nakipoğlu Yüzer GF, et al. Effect of virtual reality therapy on functional development in children with cerebral palsy: A single-blind, prospective, randomized-controlled study [J]. *Turk J Phys Med Rehabil*, 2019, 65(4): 371—378.
 - [123] 章培培. 虚拟现实技术在痉挛型脑瘫患儿康复中的应用效果 [J]. *医院管理论坛*, 2023, 40(7): 49—53.
 - [124] Choi JY, Yi SH, Ao L, et al. Virtual reality rehabilitation in children with brain injury: A randomized controlled trial [J]. *Dev Med Child Neurol*, 2021, 63(4): 480—487.