虚拟现实训练对脑卒中患者运动功能的影响及机制探讨

刘园园[1],陈 静[1],南松森[2],张俊芳[1],田心保[1],李永菊[1],朱 宁[1*]

1 宁夏医科大学总医院,宁夏 银川 750004;

2 宁夏宝石花医院,宁夏 银川 750001

* 通信作者:朱宁,E-mail:13995310532@163.com

收稿日期:2026-01-20;接受日期:2026-04-28

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BEG02047);宁夏回族自治区自然科学基金项目(2024AAC03691、2026AAC031024)

DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.09004

摘要 **目的** 观察虚拟现实(VR)训练对脑卒中患者运动功能的影响并探讨其作用机制。**方法** 选取2024年1—12月在宁夏医科大学总医院康复医学科住院的脑卒中后运动功能障碍患者86例,采用随机数字表法分为对照组和试验组,每组43例。2组患者均接受常规康复治疗,对照组在常规康复治疗的基础上增加上、下肢运动训练,试验组在常规康复治疗的基础上增加VR训练。2组均连续治疗4周。分别于治疗前后采用Fugl-Meyer评定量表上肢部分(FMA-UE)和Fugl-Meyer评定量表下肢部分(FMA-LE)评估上、下肢运动功能,采用改良Barthel指数(MBI)评估日常生活活动能力,采用酶联免疫吸附测定(ELISA)检测血清中脑源性神经营养因子(BDNF)和血管内皮生长因子(VEGF)的表达水平,采用经颅磁刺激仪检测患侧皮质脊髓兴奋性。记录2组治疗期间出现的不良事件发生情况。**结果** ① FMA-UE、FMA-LE和MBI评分:与治疗前比较,2组治疗后FMA-UE、FMA-LE和MBI评分均明显升高($P<0.05$)。与对照组比较,试验组治疗后FMA-UE、FMA-LE和MBI评分均较高($P<0.05$)。② BDNF和VEGF表达水平:与治疗前比较,2组治疗后BDNF和VEGF表达水平均明显升高($P<0.05$)。与对照组比较,治疗后试验组BDNF表达水平较高($P<0.05$)。③ 皮质脊髓兴奋性:与治疗前比较,2组治疗后中枢运动传导时间(CMCT)明显缩短($P<0.05$),波幅明显增大($P<0.05$)。与对照组比较,试验组治疗后CMCT较短($P<0.05$),波幅较大($P<0.05$)。④ 安全性:试验组部分患者在VR训练过程中出现轻度眩晕和视觉疲劳,通过闭眼休息、调整头戴设备亮度和视野范围后症状均缓解,所有患者均完成既定训练方案。**结论** VR训练能有效改善脑卒中患者上、下肢运动功能和日常生活活动能力,其机制可能与上调BDNF表达、增强皮质脊髓通路兴奋性与传导效率有关。

关键词 脑卒中;运动功能障碍;虚拟现实;脑源性神经营养因子;血管内皮生长因子;皮质脊髓兴奋性

运动功能障碍是脑卒中最常见的后遗症,发生率高达70%~80%[1],以偏瘫、肌张力异常及运动协调与控制障碍为主要表现,严重限制患者的日常生活能力[2]。其发生机制与脑组织损伤所致的神经元兴奋性下降及神经网络传导中断有关[3]。因此,重建有效的神经连接与传导通路是运动功能恢复的关键。研究表明,特定的康复训练可上调脑内神经营养因子表达,增强突触可塑性与神经元存活[4-5],同时改善皮质脊髓兴奋性与神经传导效率[6],从而为功能恢复奠定神经生理学基础。

虚拟现实(virtual reality,VR)技术依托计算机仿真模拟,构建高度沉浸式、交互式的三维虚拟环境,借助头戴显示设备及多感官(视觉、听觉、触觉)反馈,使用户产生身临其境之感,并能与虚拟场景中的对象进行实时互动[7]。相较于传统康复训练,

引用格式:刘园园,陈静,南松森,等.虚拟现实训练对脑卒中患者运动功能的影响及机制探讨[J].康复学报,2026,36(9):639-645.

LIU Y Y,CHEN J,NAN S S,et al. Effects and mechanisms of virtual reality training on motor function in stroke patients [J]. Rehabil Med,2026,36(9):639-645.

DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.09004

©《康复学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND 4.0协议 © *Rehabilitation Medicine*, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

VR技术能够提供高度可控、重复性强、任务导向且富有趣味性的沉浸式训练场景，这对激发神经可塑性、提高患者主动参与度具有重要意义[8]。此外，VR系统支持个性化参数设置，可根据患者的实时功能水平动态调整任务难度，实现精准化康复[9]。尽管已有临床研究报道VR训练对脑卒中患者运动功能的积极影响，但是其作用机制研究尚缺乏系统阐释，且多维度、客观指标的综合评价研究仍较为有限。为此，本研究拟从神经电生理和分子生物学层面，综合评估VR训练对脑卒中患者运动功能恢复的影响及潜在机制，以期为临床制定个体化、精准化的康复方案提供理论依据和实践参考。

1　临床资料

1.1　病例选择标准

1.1.1　诊断标准　符合《中国各类主要脑血管病诊断要点2019》中有关缺血性脑卒中和出血性脑卒中的诊断要点[10]。

1.1.2　纳入标准　① 首次发作的脑卒中，生命体征平稳；② 病灶局限于单侧大脑半球，病程2周～6个月；③ 年龄45～65岁；④ 无其他中枢或周围神经系统疾病；⑤ 视力及听力正常（含矫正后），简易精神状态检查量表（Mini-Mental State Examination，MMSE）评分≥23分[11]；⑥ 患侧上、下肢Brunnstrom分期为Ⅲ～Ⅴ期；⑦ 能够在无支撑条件下独立维持坐位和站立位；⑧ 患者及家属知情同意，并签署知情同意书。

1.1.3　排除标准　① 存在精神行为异常者；② 既往有周围神经病变或骨骼肌肉疾病史者；③ 合并小脑或脑干病变者；④ 合并严重呼吸功能障碍、循环功能障碍或恶性肿瘤者；⑤ 有癫痫病史者；⑥ 因严重语言或认知障碍等其他原因无法理解和配合训练者。

1.1.4　终止和脱落标准　① 干预期间出现严重不良事件，不宜继续参与试验者；② 依从性差，未完成既定康复方案者；③ 主动要求退出试验者。

1.2　一般资料

选取2024年1—12月在宁夏医科大学总医院康复医学科住院的脑卒中后运动功能障碍患者86例，采用随机数字表法分为对照组和试验组，每组43例。2组性别、年龄、病程、卒中类型、偏瘫侧等一般资料比较，差异均无统计学意义（$P>0.05$），具有可比性，见表1。本研究经宁夏医科大学总医院医学科研伦理审查委员会审核通过（审批号：KYLL-2024-0086），并在中国临床试验注册中心完成注册（注册号：ChiCTR2400081775）。

表1　2组一般资料比较

Table 1　Comparison of general data between two groups

组别	例数	性别		年龄/（$\bar{x}\pm s$，岁）	病程/［$M(P_{25},P_{75})$，d］	卒中类型		偏瘫侧	
		男	女			脑出血	脑梗死	左	右
对照组	43	34	9	52.05±9.95	56.00(35.00,70.00)	18	25	21	22
试验组	43	31	12	53.60±8.32	56.00(35.00,77.00)	22	21	20	23

2　方　法

2.1　治疗方法

2.1.1　常规康复治疗　2组患者根据功能障碍程度接受运动疗法（45 min）、作业疗法（45 min）及物理因子治疗（20 min），旨在改善整体运动功能、提升日常生活活动能力及缓解疼痛。上述治疗均1次/d，5 d/周，共持续4周。

2.1.2　对照组　在常规康复治疗的基础上增加上、下肢运动训练。该训练方案设计与VR训练具有相同的运动成分，旨在排除VR游戏中的视觉、听觉及交互反馈等附加因素对干预效果的潜在影响。上肢训练包括肩-肘、腕及手指的控制能力训练和手部抓握训练；下肢包括起坐训练，向前、后及侧方迈步训练，站立及行走过程中的转身训练，以及复杂环境下的行走训练等。30 min/次，1次/d，5 d/周，共持续4周。

2.1.3　试验组　在常规康复治疗的基础上增加VR训练。VR训练系统由宁夏医科大学总医院康复医学科与北京诺亦腾科技有限公司联合研发，针对脑卒中患者运动功能障碍特点，设计有改善上、下肢运动功能的多款训练游戏。训练前，患者穿戴便携式VR头戴设备（型号：AVRPO-Pico）与手部光学追踪动作捕捉设备（型号：NTM-HI5-BE-LG-01），实现虚拟场景中的空间定位与动作交互。30 min/次，1次/d，5 d/周，共持续4周。所有VR训练均在康复治疗师全程监护下进行。治疗师根据患者的平衡

能力提供必要的姿势支持或动态调整训练难度（如从坐位训练逐步过渡至立位训练），以确保训练安全。

2.1.3.1 上肢功能训练 ① 抓水果：虚拟场景中呈现不同种类的水果，患者需用患侧上肢触碰水果并将其放入相应的篮子中，以训练上肢运动能力和手部抓握功能。② 空间绘画：虚拟场景中显示训练任务及文字提示，患者需按照提示的节点在画板上绘制相应图形，以训练肩、肘、腕及手指的控制能力。③ 网球比赛：患者置身于虚拟球场并手持虚拟球拍，机器人发球后，患者需根据网球的位置迅速作出判断，从不同的角度挥动球拍击球，以训练上肢运动能力和运动协调性。

2.1.3.2 下肢功能训练 ① 亚洲村落：患者行走于虚拟乡村道路，根据箭头指引通过左转、右转和掉头调整前进方向，以锻炼步行稳定性与方向控制能力。② 跨越障碍物：患者需向不同方向迈步，以躲避虚拟空间中移动的障碍物，从而提高步行过程中的避障与平衡能力。③ 独木桥：患者需在水流干扰下穿过河流上方的独木桥，并在行走过程中维持身体稳定，以训练复杂环境下的步行控制能力。

2.2 评定方法

2.2.1 运动功能 分别于治疗前后采用Fugl-Meyer评定量表上肢部分（Fugl-Meyer Assessment-Upper Extremities，FMA-UE）和Fugl-Meyer评定量表下肢部分（Fugl-Meyer Assessment-Lower Extremities，FMA-LE）评估患者上、下肢运动功能。FMA-UE主要评估肩、肘、前臂、腕、手的反射、协同运动、分离运动、协调性和速度等方面功能，共包含33个项目，总分0～66分[12]，得分越高表示上肢运动功能越好。FMA-LE主要评估髋、膝、踝关节的反射、协同运动、分离运动、协调性和速度等方面功能，共包含17个项目，总分0～34分[13]，得分越高表示下肢运动功能越好。

2.2.2 日常生活活动能力 分别于治疗前后采用改良Barthel指数（Modified Barthel Index，MBI）评估患者日常生活活动能力。该量表包括进食、洗澡、穿衣、如厕、行动能力等方面，总分为100分，得分越高表示日常生活自理能力越强[14]。

2.2.3 血清脑源性神经营养因子和血管内皮生长因子表达水平 分别于治疗前后采用酶联免疫吸附测定（enzyme-linked immunosorbent assay，ELISA）检测血清中脑源性神经营养因子（brain-derived neurotrophic factor，BDNF）和血管内皮生长因子（vascular endothelial growth factor，VEGF）的表达水平。于清晨空腹状态下采集外周静脉血5 mL，室温静置60 min后，以2 000 r/min离心20 min分离血清，置于-80 ℃冰箱中冷冻保存。待所有样本采集完成后，严格按照ELISA试剂盒说明书步骤检测血清中BDNF和VEGF的浓度。

2.2.4 患侧皮质脊髓兴奋性 分别于治疗前后采用经颅磁刺激仪（武汉依瑞德医疗设备新技术有限公司，型号：YRD CCY-I）检测患侧皮质脊髓兴奋性。于损伤侧大脑初级运动皮质区给予单脉冲经颅磁刺激，于患侧拇短展肌处记录运动诱发电位（motor evoked potential，MEP），以MEP波幅反映皮质脊髓束的兴奋性。以MEP总潜伏期减去周围段传导时间计算得出神经冲动从大脑运动皮层，经皮质脊髓束传递到脊髓或脑干运动神经元所需的时间，即中枢运动传导时间（central motor conduction time，CMCT）[15]。CMCT是评估中枢运动通路（从大脑皮层到脊髓前角细胞）功能完整性的核心神经电生理指标。

2.2.5 安全性评价 详细记录2组患者在治疗期间出现的眩晕、恶心、视疲劳、头痛、跌倒等不良事件发生情况，以评估治疗方案的安全性。

2.3 统计学方法

采用SPSS 27.0软件进行统计分析。计量资料符合正态分布以（$\bar{x}\pm s$）表示，组间比较采用两样本t检验，组内比较采用配对样本t检验；计量资料不符合正态分布以$M(P_{25},P_{75})$表示，组内比较采用Wilcoxon符号秩检验，组间比较采用Mann-Whitney U检验。计数资料组间比较采用χ^2检验。$P<0.05$表示差异具有统计学意义。

3 结 果

3.1 2组治疗前后FMA-UE、FMA-LE和MBI评分比较

与治疗前比较，2组治疗后FMA-UE、FMA-LE和MBI评分均明显升高（$P<0.05$）。与对照组比较，试验组治疗后FMA-UE、FMA-LE和MBI评分均较高（$P<0.05$）。见表2。

3.2 2组治疗前后BDNF和VEGF表达水平比较

与治疗前比较，2组治疗后BDNF和VEGF表达水平均明显升高（$P<0.05$）。与对照组比较，试验组治疗后BDNF表达水平较高（$P<0.05$）。见表3。

表2 2组治疗前后FMA-UE、FMA-LE和MBI评分比较($\bar{x}\pm s$) 分

Table 2 Comparison of FMA-UE, FMA-LE, and MBI scores between two groups before and after treatment ($\bar{x}\pm s$) Scores

组别	例数	FMA-UE		FMA-LE		MBI	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
对照组	43	33.95±7.96	41.07±10.90[1)]	22.33±4.50	26.93±6.45[1)]	54.51±13.47	70.67±15.23[1)]
试验组	43	34.60±8.02	46.44±7.89[1)2)]	22.58±4.20	30.35±6.05[1)2)]	55.49±12.33	78.65±13.23[1)2)]

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与对照组比较,2) $P<0.05$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the control group, 2) $P<0.05$.

表3 2组治疗前后BDNF和VEGF表达水平比较($\bar{x}\pm s$) ng/mL

Table 3 Comparison of BDNF and VEGF expression levels between two groups before and after treatment ($\bar{x}\pm s$) ng/mL

组别	例数	BDNF		VEGF	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
对照组	43	4.08±1.39	4.26±1.26[1)]	0.23±0.09	0.28±0.12[1)]
试验组	43	4.12±1.78	4.99±1.70[1)2)]	0.22±0.07	0.31±0.11[1)]

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与对照组比较,2) $P<0.05$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the control group, 2) $P<0.05$.

3.3 2组治疗前后皮质脊髓兴奋性比较

与治疗前比较,2组治疗后CMCT明显缩短($P<0.05$),波幅明显增大($P<0.05$)。与对照组比较,试验组治疗后CMCT较短($P<0.05$),波幅较大($P<0.05$)。见表4。

表4 2组治疗前后皮质脊髓兴奋性比较($\bar{x}\pm s$)

Table 4 Comparison of corticospinal excitability between two groups before and after treatment ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	CMCT/ms		波幅/μV	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
对照组	43	11.10±1.42	10.22±2.40[1)]	238.77±77.64	281.58±113.65[1)]
试验组	43	11.55±1.32	8.98±1.94[1)2)]	240.65±86.47	338.40±117.53[1)2)]

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与对照组比较,2) $P<0.05$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the control group, 2) $P<0.05$。

3.4 安全性评价

治疗期间,试验组部分患者在VR训练过程中出现轻度眩晕和视疲劳,经闭眼休息、调整头戴设备亮度和视野范围后症状均得到缓解。2组患者均完成既定训练方案,无1例因不良事件而退出试验。

4 讨 论

4.1 VR训练可提高脑卒中患者损伤侧大脑皮质兴奋性

本研究结果显示,治疗后2组CMCT较治疗前缩短,波幅增大,且试验组改变更明显,提示VR训练可有效提高脑卒中患者损伤侧大脑皮质的兴奋性。这可能与以下因素有关:① VR训练通过特定任务设计直接增强患侧大脑半球的神经生理活动。VR技术提供了高度沉浸感、交互性和趣味性的训练环境,并通过多感官反馈引导患者以患侧肢体进行任务导向性训练,从而直接增强损伤侧大脑皮层的兴奋性[16]。既往研究表明,针对性的VR训练可显著降低患者损伤侧半球的静息运动阈值,并提高MEP波幅[17]。周山虎等[18]在老年脑卒中患者中也观察到类似结果,VR干预后神经传导潜伏期显著缩短、波幅显著增高。这些研究结果与本研究一致。此外,功能磁共振研究证实,VR训练可显著激活损伤侧初级运动皮层(M1区)并调节双侧半球间的兴奋-抑制平衡[19-20]。② VR训练可通过促进多模式感觉整合与神经可塑性发挥作用。沉浸式VR环境可同步提供高度可视化的视觉反馈、实时听觉反馈及精确的本体感觉输入[21]。这种多感觉整合的训练方式,通过强化运动想象和运动执行之间的关联,促进受损神经网络的功能重组[22]。研究表明,该模式有助于建立新的神经连接,增强患侧皮质的激活模式和功能效率,最终促进皮质兴奋性恢复和运动功能改善[23-24]。本研究采用完全沉浸式VR系统,并针对上、下肢设计任务导向训练,将中枢和

外周干预有机结合，能更有效地提高脑卒中患者损伤侧大脑皮质兴奋性，从而促进运动功能恢复。

4.2 VR训练可提高脑卒中患者血清BDNF和VEGF的表达水平

本研究结果显示，治疗后2组患者血清BDNF和VEGF表达均较治疗前升高，提示VR训练对神经修复和血管生成具有积极作用。BDNF作为关键的神经营养因子，通过结合其受体酪氨酸激酶受体B（tropomyosin receptor kinase B，TrkB）参与突触可塑性、神经元存活及轴突生长[25]。干预4周后，试验组BDNF水平显著高于对照组，分析其原因可能为：VR训练通过主动、目标导向和重复性练习，激活运动学习相关脑区（如初级运动皮层、海马体、前额叶等）的神经元活动，促进细胞内钙离子内流及兴奋性突触后电位的增强[26-27]，进而驱动BDNF的转录与合成，这一过程与神经活动依赖性的可塑性理论高度契合[28]。VEGF作为重要的血管活性因子，在新生血管形成和缺血组织修复中发挥中心作用[29-30]。本研究中，2组治疗后VEGF表达均较治疗前升高，但组间差异无统计学意义。推测其原因可能为：VEGF的表达对运动强度和时间窗口的依赖性较强，而对运动类型敏感性相对较弱[31-32]。后续研究可进一步探讨不同干预强度及周期对VEGF表达的影响，并结合神经影像学手段动态观察VR训练诱导的血管结构与功能变化，以更全面地阐明VR训练在脑卒中后神经血管修复中的作用机制。

4.3 VR训练可改善脑卒中患者上、下肢运动功能及日常生活活动能力

本研究结果显示，治疗后2组患者FMA-UE、FMA-LE和MBI评分均较治疗前明显提高，且试验组改善的程度优于对照组，表明VR训练可有效改善脑卒中患者上、下肢运动功能和日常生活活动能力。一项大型Meta分析显示，在常规康复基础上联合VR训练，对脑卒中患者上肢运动功能和日常生活活动能力的改善效果均显著优于单纯常规治疗，且该获益在慢性期患者中尤为突出，凸显了VR在长期功能重塑中的价值[33]。从作用机制层面分析，VR训练的优势源于其高度契合神经可塑性原理的设计。其具备高强度、重复性、任务导向及趣味性等特点，可显著提升患者的主动参与度和康复依从性；同时，VR环境提供的即时、量化、多感官视觉反馈增强了运动学习效果，有助于重建受损的大脑运动控制网络[34]。VR训练构成中枢-外周相结合的干预模式，能更有效地募集和激活受损的神经环路，促进皮层功能重组和双侧半球兴奋性优化[35]。

4.4 本研究的临床应用前景

VR训练凭借其高重复性、任务导向性及沉浸式反馈等优势，能够有效提升康复训练效果，可作为常规康复治疗的有效补充和强化手段。在实践层面，本研究不仅关注功能结局的改善，还通过血清BDNF及皮质脊髓兴奋性等分子生物学与神经生理学指标，为疗效评估提供了客观的生物学证据。这一多维度的评价体系有助于推动康复治疗的精准化与个体化，为临床决策提供更全面的参考依据。展望未来，后续研究应重点围绕以下方向展开：① 开展亚组分析，明确该方案在不同病程阶段、功能障碍严重程度及脑卒中类型患者中的疗效差异，以精准界定受益人群；② 研发更具针对性的VR训练模块，满足不同功能障碍特点患者的个体化需求；③ 探索VR训练与脑机接口、经颅磁刺激等神经调控技术的联合应用模式，充分发挥协同增效作用，形成整合性康复干预策略。

5 小　结

VR训练在改善脑卒中患者上、下肢运动功能及日常生活活动能力方面效果明显，且优于同等运动成分的常规训练。其潜在机制可能与VR训练特异性上调与神经可塑性密切相关的BDNF表达、增强皮质脊髓通路兴奋性与传导效率有关。本研究尚存在样本量相对有限、干预周期较短、个体对VR技术的适应能力存在差异等局限性。未来研究应着力于扩大样本规模、延长干预与随访周期，并系统评估不良反应的预防策略，以进一步明确VR训练的优势人群及长期临床价值，充分挖掘其康复应用潜力。

参考文献

[1] 陈佩顺，黄臻，李豪，等. 虚拟现实技术结合活动平板训练对脑卒中患者步行功能的影响[J]. 神经损伤与功能重建，2015，10(4)：360-361.
CHEN P S，HUANG Z，LI H，et al. Effects of virtual reality technology combined with treadmill training on walking function in stroke patients [J]. Neural Inj Funct Reconstr，2015，10(4)：360-361.

[2] LIU Y Y，LIN R Z，TIAN X B，et al. Effects of VR task-oriented training combined with rTMS on balance function and brain plasticity in stroke patients：a randomized controlled trial study protocol [J]. Trials，2024，25(1)：702.

[3] TANG Z Q，LIU T H，LIU Y，et al. Different doses of intermittent *Theta* burst stimulation for upper limb motor dysfunction after

stroke: a study protocol for a randomized controlled trial [J]. Front Neurosci, 2023, 17: 1259872.

[4] GÓRNA S, DOMASZEWSKA K. The effect of endurance training on serum BDNF levels in the chronic post-stroke phase: current evidence and qualitative systematic review [J]. J Clin Med, 2022, 11(12): 3556.

[5] 樊饶,孔健达,丁国诏,等. 运动在延缓脑衰老中的作用:从大脑可塑性到神经保护[J]. 生理科学进展,2024,55(4):361-368.
FAN R, KONG J D, DING G Z, et al. The role of exercise in delaying brain aging: from brain plasticity to neuroprotection [J]. Prog Physiol Sci, 2024, 55(4): 361-368.

[6] 谢勇,林嘉莉,刘燕平,等. 重复外周磁刺激作用于上肢不同位置对亚急性期脑卒中患者腕关节运动功能的影响:一项随机对照试验[J]. 中国全科医学,2024,27(23):2846-2852.
XIE Y, LIN J L, LIU Y P, et al. Effect of repeated peripheral magnetic stimulations at different sites of upper limbs on wrist motor function in subacute stroke patients: a randomized controlled trial [J]. Chin Gen Pract, 2024, 27(23): 2846-2852.

[7] LIN C L, REN Y Y, LU A M. The effectiveness of virtual reality games in improving cognition, mobility, and emotion in elderly post-stroke patients: a systematic review and meta-analysis [J]. Neurosurg Rev, 2023, 46(1): 167.

[8] HAO J, XIE H Y, HARP K, et al. Effects of virtual reality intervention on neural plasticity in stroke rehabilitation: a systematic review [J]. Arch Phys Med Rehabil, 2022, 103(3): 523-541.

[9] BONGIORNO G, ALBI I, COIANIZ T, et al. Usability and expert validation of a virtual reality system for post-mastectomy rehabilitation [J]. Front Rehabil Sci, 2025, 6: 1718756.

[10] 中华医学会神经病学分会,中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国各类主要脑血管病诊断要点2019[J]. 中华神经科杂志,2019,52(9):710-715.
Chinese Medical Association Neurology Branch, Cerebrovascular Disease Group of the Neurology Branch of the Chinese Medical Association. Diagnostic criteria of cerebrovascular diseases in China (version 2019) [J]. Chin J Neurol, 2019, 52(9): 710-715.

[11] LI H Z, JIA J P, YANG Z Q, et al. Chinese mini mental status in elderly Chinese: a population-based normative study [J]. J Alzheimer's Dis, 2016, 53(2): 487-496.

[12] DE BLAS-ZAMORANO P, MONTAGUT-MARTÍNEZ P, PÉREZ-CRUZADO D, et al. Fugl-Meyer Assessment for Upper Extremity in stroke: a pyschometric systematic review [J]. J Hand Ther, 2026, 39(1): 22-51.

[13] HERNÁNDEZ E D, FORERO S M, GALEANO C P, et al. Intra- and inter-rater reliability of Fugl-Meyer Assessment of Lower Extremity early after stroke [J]. Braz J Phys Ther, 2021, 25(6): 709-718.

[14] YANG C M, WANG Y C, LEE C H, et al. A comparison of test-retest reliability and random measurement error of the Barthel Index and modified Barthel Index in patients with chronic stroke [J]. Disabil Rehabil, 2022, 44(10): 2099-2103.

[15] 王淑楠,李思燃,宋鹏辉,等. 中枢运动传导时间对皮质脊髓束损伤的评价及其临床意义[J]. 中华医学杂志,2022,102(25):1918-1923.
WANG S N, LI S R, SONG P H, et al. Contribution of central motion conduction time to the assessment of corticospinal tract lesions and its clinical significance [J]. Natl Med J China, 2022, 102(25): 1918-1923.

[16] 邹鸿雁,白定群,杨力凝,等. 虚拟现实技术在卒中后上肢康复中的应用现状及可能机制[J]. 中国康复,2024,39(2):111-115.
ZOU H Y, BAI D Q, YANG L N, et al. Application status and possible mechanisms of virtual reality technology in upper limb rehabilitation after stroke [J]. Chin J Rehabil, 2024, 39(2): 111-115.

[17] NATH D, SINGH N, SAINI M, et al. Clinical potential and neuroplastic effect of targeted virtual reality based intervention for distal upper limb in post-stroke rehabilitation: a pilot observational study [J]. Disabil Rehabil, 2024, 46(12): 2640-2649.

[18] 周山虎,张鑫,刘慧晴,等. 虚拟现实技术联合计算机化认知训练干预对老年脑卒中患者认知功能的改善研究[J]. 中华老年心脑血管病杂志,2025,27(4):431-435.
ZHOU S H, ZHANG X, LIU H Q, et al. Improvement of cognitive function in elderly stroke patients by virtual reality combined with computerized cognitive training intervention [J]. Chin J Geriatr Heart Brain Vessel Dis, 2025, 27(4): 431-435.

[19] ORIHUELA-ESPINA F, FERNÁNDEZ DEL CASTILLO I, PALAFOX L, et al. Neural reorganization accompanying upper limb motor rehabilitation from stroke with virtual reality-based gesture therapy [J]. Top Stroke Rehabil, 2013, 20(3): 197-209.

[20] BIAN M J, SHEN Y X, HUANG Y J, 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: 985700.

[21] EVERARD G J, LEJEUNE T M, BATCHO C S. Visual feedback and age affect upper limb reaching accuracy and kinematics in immersive virtual reality among healthy adults [J]. Int J Rehabil Res, 2023, 46(3): 221-229.

[22] SÁNCHEZ-CUESTA F J, ARROYO-FERRER A, GONZÁLEZ-ZAMORANO Y, et al. Clinical effects of immersive multimodal BCI-VR training after bilateral neuromodulation with rTMS on upper limb motor recovery after stroke. a study protocol for a randomized controlled trial [J]. Medicina, 2021, 57(8): 736.

[23] CHEN L, CHEN Y, FU W B, et al. The effect of virtual reality on motor anticipation and hand function in patients with subacute stroke: a randomized trial on movement-related potential [J]. Neural Plast, 2022, 2022: 7399995.

[24] MADHAVAN S. Harnessing neuroplasticity: the role of priming in enhancing post stroke motor function [J]. Restor Neurol Neurosci, 2026, 44(2): 80-97.

[25] DORSEY S G, BAMBRICK L L, BALICE-GORDON R J, et al. Failure of brain-derived neurotrophic factor-dependent neuron survival in mouse trisomy 16 [J]. J Neurosci, 2002, 22(7): 2571-2578.

[26] TAO W P, ZHANG X S, DING J, et al. The effect of propofol on hypoxia- and TNF-α-mediated BDNF/TrkB pathway dysregula-

tion in primary rat hippocampal neurons [J]. CNS Neurosci Ther, 2022, 28(5): 761-774.
[27] PIMENTA SILVA D, PONA-FERREIRA F, CACHO R, et al. Integrating virtual reality into multidisciplinary care for Parkinson's disease: a narrative review [J]. J Parkinsons Dis, 2025, 15(3): 459-479.
[28] IU E C Y, CHAN C B. Is brain-derived neurotrophic factor a metabolic hormone in peripheral tissues? [J]. Biology, 2022, 11(7): 1063.
[29] SUN Y J, JIN K L, XIE L, et al. VEGF-induced neuroprotection, neurogenesis, and angiogenesis after focal cerebral ischemia [J]. J Clin Invest, 2003, 111(12): 1843-1851.
[30] 龚雨婷，王林农. 角膜新生血管抗血管内皮生长因子治疗新途径[J]. 中国眼耳鼻喉科杂志, 2022, 22(4): 409-412.
GONG Y T, WANG L N. New approaches to anti-vascular endothelial growth factor treatment for corneal neovascularization [J]. Chin J Ophthalmol Otorhinolaryngol, 2022, 22(4): 409-412.
[31] YANG Y F, LAGISZ M, FOO Y Z, et al. Beneficial intergenerational effects of exercise on brain and cognition: a multilevel meta-analysis of mean and variance [J]. Biol Rev Camb Philos Soc, 2021, 96(4): 1504-1527.
[32] WŁODARCZYK L, CICHON N, SALUK-BIJAK J, et al. Neuroimaging techniques as potential tools for assessment of angiogenesis and neuroplasticity processes after stroke and their clinical implications for rehabilitation and stroke recovery prognosis [J]. J Clin Med, 2022, 11(9): 2473.
[33] ZHANG J L, JIANG X, XU Q Z, et al. Effect of virtual reality-based training on upper limb dysfunction during post-stroke rehabilitation: a meta-analysis combined with meta-regression [J]. J Integr Neurosci, 2024, 23(12): 225.
[34] BANDUNI O, SAINI M, SINGH N, et al. Post-stroke rehabilitation of distal upper limb with new perspective technologies: virtual reality and repetitive transcranial magnetic stimulation-a mini review [J]. J Clin Med, 2023, 12(8): 2944.
[35] CHAUHAN P, DAS S K, SHAHANAWAZ S D. The simultaneous application of transcranial magnetic stimulation and virtual reality to treat cognitive deficits among stroke patients: a randomized controlled trial [J]. Cureus, 2024, 16(6): e62434.

Effects and Mechanisms of Virtual Reality Training on Motor Function in Stroke Patients

LIU Yuanyuan[1], CHEN Jing[1], NAN Songsen[2], ZHANG Junfang[1], TIAN Xinbao[1], LI Yongju[1], ZHU Ning[1*]
[1] *General Hospital of Ningxia Medical University, Yinchuan, Ningxia 750004, China;*
[2] *Ningxia Gemflower Hospital, Yinchuan, Ningxia 750001, China*
*Correspondence: ZHU Ning, E-mail: 13995310532@163.com

ABSTRACT **Objective** To observe the effects of virtual reality (VR) training on motor function in stroke patients and to explore its underlying mechanisms. **Methods** A total of 86 stroke patients with motor dysfunction admitted to the Department of Rehabilitation Medicine, General Hospital of Ningxia Medical University from January to December 2024 were enrolled and randomly allocated into a control group and an experimental group using a random number table, with 43 patients in each group. Both groups received conventional rehabilitation therapy. The control group additionally received upper and lower limb exercise training, while the experimental group additionally received VR training. Both groups were treated continuously for four weeks. Before and after treatment, the Fugl-Meyer Assessment Upper Extremity (FMA-UE) and Fugl-Meyer Assessment Lower Extremity (FMA-LE) were used to evaluate upper and lower limb motor function and the Modified Barthel Index (MBI) was used to assess activities of daily living. Serum levels of brain-derived neurotrophic factor (BDNF) and vascular endothelial growth factor (VEGF) were measured by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA), and corticospinal excitability on the affected side was assessed using transcranial magnetic stimulation. Adverse events occurring during the treatment period were recorded in both groups. **Results** (1) FMA-UE, FMA-LE, and MBI scores: Compared with those before treatment, the FMA-UE, FMA-LE, and MBI scores in both groups increased significantly after treatment (P<0.05). Compared with the control group, the FMA-UE, FMA-LE, and MBI scores in the experimental group were higher after treatment (P<0.05). (2) BDNF and VEGF levels: Compared with those before treatment, BDNF and VEGF levels in both groups increased significantly after treatment (P<0.05). Compared with the control group, the BDNF level in the experimental group was higher after treatment (P<0.05). (3) Corticospinal excitability: Compared with those before treatment, the central motor conduction time (CMCT) in both groups shortened significantly after treatment (P<0.05), while the motor evoked potential amplitude increased significantly (P<0.05). Compared with the control group, CMCT in the experimental group was shorter after treatment (P<0.05), and amplitude was larger (P<0.05). (4) Safety: A small number participants in the experimental group experienced mild dizziness and visual fatigue during VR training, which were alleviated by closing the eyes for rest and adjusting the brightness and visual field of the headset. All patients completed the scheduled intervention protocol. **Conclusion** VR training can effectively improve upper and lower limb motor function and activities of daily living in stroke patients. The underlying mechanism may be related to upregulating BDNF expression and enhancing corticospinal tract excitability and conduction efficiency.

KEY WORDS stroke; motor dysfunction; virtual reality; brain-derived neurotrophic factor; vascular endothelial growth factor; corticospinal excitability
DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.09004