

上肢康复机器人联合 VR 训练对重症颅脑损伤术后干预效果及对日常行为的中介效应研究

王婷婷¹, 蔺洁璐¹, 李静², 杨芳³

(1. 延安市中医医院重症医学科 陕西 延安 716000; 2. 西安交通大学第一附属医院重症医学科 陕西 西安 710061; 3. 西北大学附属医院·西安市第三医院手术室 陕西 西安 710021)

摘要 目的: 研究重症颅脑损伤 (sTBI) 患者去骨瓣减压术 (DC) 后采取上肢康复机器人训练 (ULRRT) 联合虚拟现实 (VR) 互动干预后, 其日常生活能力、神经功能、认知功能和肢体功能的改善情况。同时, 依照“认知行为理论”, 探讨认知功能、神经功能在肢体功能对日常生活行为的关系中的中介效应。方法: 回顾性分析 2019 年 1 月—2023 年 6 月于西安交通大学第一附属医院治疗的 92 例 sTBI 患者的临床资料, 根据可比性原则按不同干预方式将其划分为机器人组 (32 例, 常规干预+上肢康复机器人干预)、VR 组 (26 例, 常规干预+VR 互动干预)、联合组 (34 例, 常规干预+上肢康复机器人干预+VR 互动干预)。采用美国国立卫生院卒中量表 (NIHSS)、简易精神状态检查 (MMSE)、上肢运动功能评定量表 (FMA-UE) 及日常生活能力量表 (ADL) 分别评估并比较三组患者的神经功能、认知功能、上肢功能及日常生活能力。结果: 干预后, 联合组 MMSE、FMA-UE、ADL 评分均高于机器人组、VR 组 ($P<0.05$), 而联合组 NIHSS 低于机器人组、VR 组 ($P<0.05$)。ADL 与 MMSE、FMA-UE 为正相关关系, 与 NIHSS 为负相关关系 ($P<0.05$)。ADL 的变化受到 FMA-UE、NIHSS 和 MMSE 的影响。NIHSS、MMSE 在 FMA-UE 对 ADL 的影响关系中起到完全中介的作用。结论: 上肢康复机器人联合 VR 互动干预对 sTBI 患者术后康复具有积极意义, 可以提高上肢运动功能, 改善认知和神经功能, 进而提高生活质量。

关键词 重症颅脑损伤; 去骨瓣减压术; 上肢康复机器人; 虚拟现实互动干预; 上肢功能

中图分类号 R608 R651.1+5 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2024) 06-1142-07

Study on the effect of upper limb rehabilitation robot combined with VR training on the postoperative recovery of severe traumatic brain injury patients and the mediating effect on daily behavior

WANG Tingting¹, LIN Jielu¹, LI Jing², YANG Fang³

(1. Intensive Care Department of Yan'an Traditional Chinese Medicine Hospital, Yan'an 716000, China; 2. Department of Critical Care Medicine, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China; 3. Operating Room, the Affiliated Hospital of Northwest University/Xi'an Third Hospital, Xi'an 710021, China)

Abstract **Objective:** To investigate the improvement of activities of daily living (ADLs), cognitive function, and limb function in patients with severe traumatic brain injury (sTBI) who underwent upper limb rehabilitation robot training (ULRRT) combined with virtual reality (VR) interactive intervention after decompressive craniectomy (DC). Meanwhile, to explore the mediating effects of cognitive and neurological functions on the relationship between limb function and ADLs based on the Cognitive Behavioral Theory. **Methods:** Clinical data of 92 sTBI patients who were treated in the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University from January 2019 to June 2023 was retrospectively analyzed. The patients were divided into the robot group ($n=32$), VR group ($n=26$) and joint group ($n=34$) according to different intervention ways. The robot group received conventional intervention + upper limb robot intervention, the VR group received conventional intervention + VR interactive

收稿日期: 2024-01-11 录用日期: 2024-05-19

Received Date: 2024-01-11 Accepted Date: 2024-05-19

基金项目: 陕西省重点研发项目计划 (2020JM-079)

Foundation Item: Key R&D Project Plan of Shaanxi Province (2020JM-079)

通讯作者: 杨芳, Email: Yf15398067855@163.com

Corresponding Author: YANG Fang, Email: Yf15398067855@163.com

引用格式: 王婷婷, 蔺洁璐, 李静, 等. 上肢康复机器人联合 VR 训练对重症颅脑损伤术后干预效果及对日常行为的中介效应研究 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2024, 5 (6): 1142-1148.

Citation: WANG T T, LIN J L, LI J, et al. Study on the effect of upper limb rehabilitation robot combined with VR training on the postoperative recovery of severe traumatic brain injury patients and the mediating effect on daily behavior [J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(6): 1142-1148.

intervention, while the joint group received upper limb robot training intervention + VR interactive intervention on the basis of conventional intervention. The national institutes of health stroke scale (NIHSS), mini-mental state examination (MMSE), Fugl-Meyer assessment of the upper extremity (FMA-UE) and ADL scale were used to evaluate and compare the degree of neurological deficits, cognitive function, upper limb function and ADLs of patients in the three groups. **Results:** After intervention, the MMSE, FMA-UE and ADL scores of the joint group were higher than those of the robot group and VR group ($P<0.05$), while the NIHSS of the joint group was lower than that of the robot group and VR group ($P<0.05$). The ADLs is positively correlated with MMSE and FMA-UE, and negatively correlated with NIHSS ($P<0.05$). The changes in ADL scale were influenced by FMA-UE, NIHSS and MMSE. NIHSS and MMSE play a fully mediating role in the relationship between FMA-UE and ADL scale. **Conclusion:** The combination of upper limb rehabilitation robot combined with VR interactive intervention has a positive effect on the postoperative recovery of sTBI patients, which can improve patients' upper limb motor function, cognitive function, and ultimately enhance their quality of life.

Key words Severe Traumatic Brain Injury; Decompressive Craniectomy; Upper Limb Rehabilitation Robot; Virtual Reality Interactive Intervention; Upper Limb Function

重症颅脑损伤 (Severe Traumatic Brain Injury, sTBI) 是由严重外伤导致患者出现认知、运动和情感等方面功能障碍的疾病, 严重者危及生命^[1-2]。去骨瓣减压术 (Decompressive Craniectomy, DC) 是一种常用的治疗手段, 可以有效降低颅内压, 缓解 sTBI 病情, 缩短抢救时间^[3-5]。然而, sTBI 患者经 DC 后康复是一个漫长而复杂的过程, 需综合多种干预手段来实现最佳康复效果。上肢康复机器人训练 (Upper Limb Rehabilitation Robot Training, ULRRRT) 联合虚拟现实 (Virtual Reality, VR) 交互干预是一种新型的康复治疗方法, 利用机器人训练技术和模拟现实生活中的动作和场景, 引导患者借助机器人外骨骼设备进行关节活动、力量等方面的针对性训练, 以达到改善上肢功能和日常生活能力的目的。这种干预方法符合患者的实际情况, 具有显著的个性化、针对性、可调整等优势。但是, 临床上关于 ULRRRT 联合 VR 交互干预的研究鲜有, 本研究旨在探讨这种联合干预方式对 sTBI 患者 DC 后的干预效果, 以期为患者预后康复研究提供新思路。现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析 2019 年 1 月—2023 年 6 月于西安交通大学第一附属医院治疗的 92 例 sTBI 患者的临床资料, 根据可比性原则按不同干预方式划分为机器人组 (32 例, 常规干预 + 上肢康复机器人干预)、VR 组 (26 例, 常规干预 + VR 互动干预)、联合组 (34 例, 常规干预 + 上肢康复机器人干预 + VR 互动干预), 三组患者在性别、损伤部位、年龄、病因、认知功能等方面差异无统计学意义 ($P>0.05$), 具有可比性 (见表 1)。纳入标准: ①符合《神经病学诊断》^[6]关于 sTBI 诊断标准者; ②年龄 ≥ 18 岁; ③资料齐全。排除标准: ①恶性肿瘤癌变患者; ②并发严重肝肾功能衰竭患者; ③并发严重心

血管疾病、凝血功能障碍疾病患者; ④手术禁忌患者; ⑤严重意识不清或者精神病患者。本研究经医院伦理委员会批准 [院伦理审 (2019) 第 235 号]。

1.2 治疗方法 入院后, 患者接受常规的止血和抗感染治疗, 均实施 DC。在患者耳屏前约 1 cm 的颞骨处切开延长至耳廓上缘, 经顶结节处, 直至额部发际。逐层切开充分暴露颅骨后钻孔, 打开骨瓣并去除, 然后游离。切开硬膜下血肿进行减压, 彻底清除脑膜外血肿和坏死组织。进行人工补片, 减压缝合后置入外引流管。

1.3 干预措施 所有患者均进行常规干预, 包括木钉盘活动、滚筒训练、磨砂板活动及日常生活活动训练等, 20 分钟/(次·天), 每周 5 天, 共 4 周。

1.3.1 机器人组 采用常规干预 + ULRRRT 干预, 即在原有常规作业训练的基础上, 引入上肢智能反馈机器人训练。训练前对患者进行上肢功能评估, 根据其具体情况选择适合的机器人设备。上肢康复机器人训练内容涵盖主动训练、主动-辅助训练和阻力训练。初始阶段, 由机器人设备开展被动训练, 引导患者做肩关节屈伸、肘关节屈伸、水平内收、水平外展等方面活动, 该过程要保持缓慢轻柔, 避免患者疼痛。患者上肢运动功能逐渐恢复阶段, 根据其运动意图给予适当阻力训练, 增加自主运动能力。待其上肢运动功能恢复后可减少阻力, 由患者主动训练。每周对患者进行一次评估, 并据此修改训练参数。训练活动包括 2 min 患侧肢体被动活动, 16 min 游戏训练以及 2 min 放松训练。如果在训练过程中患者出现不适症状或威胁生命健康的疾病, 立即终止训练。每次训练结束后, 资深治疗师会给出专业的训练总结并给予鼓励。每次共训练 40 min, 每天 1 次, 每周 5 天, 持续 4 周。同时, 结合语言治疗、物理治疗等实施综合康复训练。

表 1 三组患者的一般资料比较 [$\bar{x} \pm s$, n (%)]Table 1 Comparison of general data among the three groups of patients [$\bar{x} \pm s$, n (%)]

指标	机器人组 ($n=32$)	VR组 ($n=26$)	联合组 ($n=34$)	总计 ($n=92$)	χ^2/t 值	P 值	
性别	女	17 (53.13)	13 (50.00)	13 (38.24)	43 (46.74)	1.623	0.444
	男	15 (46.88)	13 (50.00)	21 (61.76)	49 (53.26)		
损伤部位	颞顶部	7 (21.88)	3 (11.54)	6 (17.65)	16 (17.39)	7.167	0.306
	额颞顶部	11 (34.38)	14 (53.85)	8 (23.53)	33 (35.87)		
	额颞部	9 (28.13)	5 (19.23)	14 (41.18)	28 (30.43)		
	颞部	5 (15.63)	4 (15.38)	6 (17.65)	15 (16.30)		
病因	脑挫伤	6 (18.75)	6 (23.08)	10 (29.41)	22 (23.91)	4.845	0.564
	原发性脑干损伤	11 (34.38)	10 (38.46)	9 (26.47)	30 (32.61)		
	颅内血肿	6 (18.75)	7 (26.92)	10 (29.41)	23 (25.00)		
	其他	9 (28.13)	3 (11.54)	5 (14.71)	17 (18.48)		
年龄 (岁)	55.69 \pm 13.38	58.50 \pm 14.45	53.56 \pm 14.03	55.70 \pm 13.92	0.927	0.400	
缺损面积 (cm ²)	91.09 \pm 20.76	101.15 \pm 23.82	98.00 \pm 24.74	96.49 \pm 23.28	1.468	0.236	
BMI (kg/m ²)	23.32 \pm 2.25	23.13 \pm 1.99	22.51 \pm 2.13	22.97 \pm 2.14	1.308	0.276	
NIHSS (分)	27.84 \pm 4.30	26.92 \pm 5.18	27.29 \pm 5.24	27.38 \pm 4.87	0.26	0.771	
MMSE (分)	14.84 \pm 1.37	15.23 \pm 1.11	15.03 \pm 1.42	15.02 \pm 1.32	0.615	0.543	

1.3.2 VR组 在常规训练的基础上实施VR互动干预。VR互动干预内容：在干预前对患者进行全面评估，包括认知功能、日常生活活动能力、情绪状态等方面，帮助制定个性化的干预计划。根据患者的具体情况和评估结果，选择适合的VR技术设备和软件。通过VR技术，可以创建与患者日常生活相关的各种虚拟情景，如购物、烹饪、打扫等，患者进行实际的操作和互动，以及各种认知任务，如解决问题、决策、沟通等，以提高其日常生活活动能力和认知能力。通过模拟真实生活中的各种挑战和障碍，患者可以逐渐适应不同的环境并提高应对能力。干预过程中，记录患者的各项数据，如完成任务的时间、正确率、反应速度等，根据该数据和分析结果，逐步调整干预计划和方法。例如，对于表现困难的患者，可以减小训练的难度和强度；对于表现较好的患者，可以逐渐减少阻力并鼓励其更自主地参与训练。同时，对患者进行心理辅导、家庭支持等协同干预。干预结束后，对患者进行长期随访和评估，了解其恢复情况、生活质量以及是否需要进一步的康复支持和服务。每次共训练40 min，每天1次，每周5天，共4周。

1.3.3 联合组 在常规干预的基础上实施ULRRT联合VR交互干预。首先根据患者实际需求，分阶段开展ULRRT与VR交互干预。在患者上肢

功能被动训练中，以ULRRT为主，设计针对性干预方案。患者上肢功能恢复后采用ULRRT与VR交互干预相结合的方式，除ULRRT外，还可通过家庭场景实施打扫、烹饪等上肢活动训练，或者通过以机器人辅助设备带动患者开展家庭购物等日常行为。每次共训练40 min，每天1次，每周5天，共4周。

1.4 质控措施 ①训练合格。本研究由1名主治医师、1名康复训练师、1名护士长、3名轮班责任护士组成的同一康复团队实施，所有医护人员均通过专业培训并达标上岗。②间隔干预。在干预期间，为了避免组间沾染，因患者相互沟通而影响研究结果，选取不同楼层或者不同楼栋的患者开展研究。③资料分拣。患者病例资料、干预效果评估资料以责任护士为主进行收集，做到资料分开整理、分开统计、分开存放。

1.5 观察指标 ①神经功能采用美国国立卫生研究院卒中量表^[7] (National Institute of Health Stroke Scale, NIHSS) 进行评估，包括15个条目，涵盖运动、感觉、语言、视野和认知功能等方面，总分为0~42分，分数越高表示神经功能缺损越严重。②认知功能采用简易精神状态检查^[8] (Mini-mental State Examination, MMSE) 评估，包括20个项目，涵盖注意力、定向力、记忆、计算力、语言和视空间能力等方面，总分为

0~30 分，分数越高表示认知功能越好。③上肢功能采用上肢运动功能评定量表^[9]（Fugl-Meyer Assessment of the Upper Extremity, FMA-UE）进行评估，包括 33 个上肢近端及远端肢体运动相关条目，每项按 0、1、2 计分，0 分为完全不能完成，2 分为可以完成规定动作，1 分介于二者之间。总分为 0~66 分，分数越高，表示上肢功能越好。④日常生活能力评估采用日常生活能力量表^[10]（Activity of Daily Living Scale, ADL），包括如进食、洗澡、穿衣、如厕、控制排便排尿等指标，每一项细分为 5 级，总分 100 分。

1.6 统计学方法 采用 SPSS 26.0 统计学软件进行数据统计分析，符合正态分布的计量资料以均数 ± 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示，多组间采用方差分析并以 LDS-*t* 进行多重比较。计数资料用例数（百分比）[*n* (%)] 表示，行 χ^2 检验。*P* < 0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

干预前，三组患者 NIHSS、MMSE、FMA-UE、ADL 评分比较，差异无统计学意义 (*P* > 0.05)。干预后，MMSE、FMA-UE 评分表现为联合组 > VR 组 > 机器人组 (*P* < 0.05)，ADL 表现为联合组 > 机器人组 > VR 组 (*P* < 0.05)，而 NIHSS 评分表现为联合组 < 机器人组 < VR 组，差异有统计学意义 (*P* < 0.05)，见表 2。ADL 与 MMSE、FMA-UE 为正相关关系，与 NIHSS 为负相关关系，差异有统计学意义 (*P* < 0.05)，如图 1。以 ADL 作为因变量，以 FMA-UE、NIHSS、MMSE 作为自变量进行线性回归分析，结果显示，*R*² 值为 0.638，表明该模型的拟合度较好，ADL 的变化受 FMA-UE、NIHSS、MMSE 的影响（见表 3）。在 ULRRT 联合 VR 交互干预下，依照“认知行为理论”，以衡量日常生活执行力的 ADL 为因变量 Y，以衡量肢体功能的 FMA-UE 为自变量 X，以衡量认知功能的

表 2 三组患者神经功能、认知功能、上肢功能、日常生活能力比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Comparison of neurological function, cognitive function, upper limb function and ADLs among the three groups of patients ($\bar{x} \pm s$)

组别	NIHSS (分)		MMSE (分)		FMA-UE (分)		ADL (分)	
	干预前	干预后	干预前	干预后	干预前	干预后	干预前	干预后
机器人组 (<i>n</i> =32)	27.84 ± 4.30	12.38 ± 1.76 ^a	14.84 ± 1.37	12.09 ± 1.09 ^a	36.59 ± 4.07	41.97 ± 3.33 ^a	59.38 ± 4.06	78.53 ± 5.42 ^a
VR 组 (<i>n</i> =26)	26.92 ± 5.18	15.12 ± 1.77 ^{ab}	15.23 ± 1.11	13.92 ± 1.23 ^{ab}	34.19 ± 3.36	43.46 ± 3.58 ^{ab}	58.85 ± 4.53	74.38 ± 3.93 ^{ab}
联合组 (<i>n</i> =34)	27.29 ± 5.24	8.91 ± 2.69 ^{abc}	15.03 ± 1.42	20.06 ± 3.52 ^{abc}	35.18 ± 3.79	51.32 ± 4.31 ^{abc}	58.79 ± 3.68	94.65 ± 4.82 ^{abc}
<i>F</i> 值	0.260	62.462	0.615	104.927	2.984	57.469	0.198	154.637
<i>P</i> 值	0.771	<0.001	0.543	<0.001	0.056	<0.001	0.821	<0.001

注：与干预前相比，^a*P* < 0.05；与机器人组相比，^b*P* < 0.05；与 VR 组相比，^c*P* < 0.05

表 3 线性回归分析

Table 3 Linear regression analysis

项目	非标准化系数		标准化系数		<i>t</i> 值	<i>P</i> 值	共线性诊断	
	<i>B</i> 值	标准误	β 值				VIF	容忍度
常数	69.730	7.496	—	—	9.303	0.000	—	—
NIHSS	-1.174	0.230	-0.385	-0.385	-5.102	0.000	1.385	0.722
MMSE	0.997	0.212	0.419	0.419	4.713	0.000	1.918	0.521
FMA-UE	0.262	0.155	0.147	0.147	1.696	0.093	1.840	0.544
<i>R</i> ² 值					0.638			
<i>F</i> 值					51.751			
<i>P</i> 值					0.000			
<i>D-W</i> 值					1.947			

MMSE 以及衡量神经功能的 NIHSS 作为中介变量 M, 纳入中介效应模型中, 中介效应分析共涉及 4 个模型, 分别如下: $ADL=34.419+1.066 \times FMA-UE$; $NIHSS=24.199-0.269 \times FMA-UE$; $MMSE=-6.912+0.490 \times FMA-UE$; $ADL=69.730+0.262 \times FMA-UE-1.174 \times NIHSS+0.997 \times MMSE$ (见表 4~5)。通过效应值显著性分析, a 和 b 显著, 且 c' 不显著,

则为完全中介。这表明在 FMA-UE 对 ADL 的影响关系中 NIHSS、MMSE 起到完全中介的作用(见表 6~7)。

3 讨论

本研究中, 干预后三组患者 ADL 评分表现为联合组 > 机器人组 > VR 组, 而 NIHSS 评分顺序与之相反, FMA-UE、MMSE 评分表现为联合组 > VR 组 > 机器人组, 这表明 ULRRT 联合 VR 交互干预在 sTBI 经 DC 后对患者的康复更具优势。因为上肢康复机器人可根据患者的具体情况, 制定个性化的训练方案, 借助机器人通过被动、主动或辅助性的运动训练, 帮助患者恢复上肢的运动功能^[11-13]。VR 为患者提供模拟的生活场景, 以场景活动带动患者肢体行为执行, 提高训练的积极性。同时, VR 可刺激患者的视觉、听觉和触觉等多种感官, 有助于提高其认知和感知能力^[14-16]。此外, ULRRT 联合 VR 交互干预具有相互补充、相互促进作用, 以机器人训练强化患者肢体功能恢复, 以生活场景调动患者主观能动性, 以康复目标为导向, 为患者树立信心, 同时家属、康复师等给予患者情



图 1 相关性热图
Figure 1 Correlation heatmap

表 4 中介效应涉及的 ADL 和 NIHSS 模型

Table 4 Mediating effect model between ADL and NIHSS score

指标	ADL					NIHSS				
	B 值	标准误	t 值	P 值	β 值	B 值	标准误	t 值	P 值	β 值
常数	34.419	6.919	4.974	<0.001	—	24.199	2.515	9.620	<0.001	—
FMA-UE	1.066	0.150	7.120	<0.001	0.600	-0.269	0.054	-4.938	<0.001	-0.462
R ² 值	0.360					0.213				
F 值	50.696					24.388				
P 值	<0.001					<0.001				

表 5 中介效应涉及的 MMSE 和 ADL 模型

Table 5 Mediating effect model between MMSE and ADL score

指标	MMSE					ADL				
	B 值	标准误	t 值	P 值	β 值	B 值	标准误	t 值	P 值	β 值
常数	-6.912	2.737	-2.526	0.013	—	69.730	7.496	9.303	<0.001	—
FMA-UE	0.490	0.059	8.272	<0.001	0.657	0.262	0.155	1.696	0.093	0.147
NIHSS						-1.174	0.230	-5.102	<0.001	-0.385
MMSE						0.997	0.212	4.713	<0.001	0.419
R ² 值	0.432					0.638				
F 值	68.423					51.751				
P 值	<0.001					<0.001				

表 6 中介作用检验过程表
Table 6 Process of mediating effect testing

项目	效应符号	意义	效应值	95% CI		Z/t 值	P 值	结论
				下限	上限			
FMA-UE → NIHSS → ADL	a*b	间接效应	0.316	0.103	0.268	7.471	0.000	完全中介
FMA-UE → NIHSS	a	X → M	-0.269	-0.376	-0.162	-4.938	0.000	
NIHSS → ADL	b	M → Y	-1.174	-1.626	-0.723	-5.102	0.000	
FMA-UE → ADL	c'	直接效应	0.262	-0.041	0.565	1.696	0.093	
FMA-UE → ADL	c	总效应	1.066	0.773	1.360	7.120	0.000	
FMA-UE → MMSE → ADL	a*b	间接效应	0.489	0.157	0.403	7.797	0.000	完全中介
FMA-UE → MMSE	a	X → M	0.490	0.374	0.606	8.272	0.000	
MMSE → ADL	b	M → Y	0.997	0.582	1.412	4.713	0.000	
FMA-UE → ADL	c'	直接效应	0.262	-0.041	0.565	1.696	0.093	
FMA-UE → ADL	c	总效应	1.066	0.773	1.360	7.120	0.000	

表 7 中介作用检验结果汇总
Table 7 Summary of mediation test results

项目	FMA-UE → NIHSS → ADL	FMA-UE → MMSE → ADL
c	1.066 ^a	1.066 ^b
a	-0.269 ^b	0.490 ^b
b	-1.174 ^b	0.997 ^b
a*b 中介效应值	0.316	0.489
a*b BootSE	0.042	0.063
a*b Z 值	7.471	7.797
a*b P 值	0.000	0.000
a*b 95% BootCI	0.103~0.268	0.157~0.403
c'	0.262	0.262
检验结论	完全中介	完全中介

注：^aP<0.05；^bP<0.01

感支持，引导患者实现自我照顾和完成日常生活中的自我管理。本研究在 FMA-UE、MMSE 评分中联合组位居首位，VR 组位居次位，机器人组位居末位；ADL 评分中联合组表现最佳，其次是机器人组，最后是 VR 组。因为组合干预要比单一干预更加全面，上肢康复机器人侧重功能恢复，VR 侧重认知、感受方面的恢复。尽管常规干预方式是所有患者干预的基础，但在此基础上介入其他干预方式可能会造成干预结果的偏向。通过 ULRRT 带动患者肢体训练，促进大脑皮层的重塑和神经网络的重建，提高患者的注意力和记忆力等认知能力；同时借助 VR 来模拟日常生活场景，让患者进行上肢的训练和

操作，提高上肢的灵活性和协调性，增加患者回归生活的信心，改善日常生活能力。总之，ULRRT 联合 VR 交互干预对于 sTBI 经 DC 治疗后的康复具有重要意义，可以帮助患者恢复上肢运动功能、提高认知和感知能力、促进社交互动和情感支持、改善生活质量并为难治性脑性瘫痪的治疗提供新的思路和方法。

在 ULRRT 联合 VR 交互干预下，依照现实依据，sTBI 的生活质量与自身肢体功能、认知功能、神经功能等密切相关。为此，本研究以评估日常生活执行力的 ADL 作为因变量，以 FMA-UE、NIHSS、MMSE 作为自变量，探讨生活质量与肢体功能、认知功能、神经功能的关系。结果显示，FMA-UE、NIHSS、MMSE 对 ADL 有影响。FMA-UE 是评估 sTBI 患者运动功能的指标，分数越高表示运动功能越好。同时，相关性分析结果显示，FMA-UE 与 ADL 为正相关且在线性回归分析中属于正向影响，即随着 FMA-UE 分数的提高，ADL 也会相应提高，这表明患者的运动功能恢复越好，其日常生活活动能力也就越强。NIHSS 是评估 sTBI 患者神经功能受损严重程度的指标，分数越高表示神经功能受损越严重。NIHSS 与 ADL 为负相关且在线性回归分析中属于负向影响，即随着 NIHSS 分数下降，ADL 上升。换言之，sTBI 患者的神经功能逐渐康复，其日常生活活动能力越来越强。MMSE 是评估 sTBI 患者认知功能的指标，分数越高表示认知功能越好。相关性分析中，MMSE 与 ADL 的相关系数为 0.662，属于中度正相关关系，表明 MMSE 升高会带来 ADL 的升高，反之亦然。许凤娟等人^[17]也认同颅脑损伤患者的生活质量与认知障碍、上肢功能密切相关，但对于三

者之间是何种关系并未阐述。本研究认为, 上肢肢体功能是 sTBI 患者日常行动的前提, 而美好的生活执行力是 sTBI 患者的期许。为此, 衡量个体上肢功能的 FMA-UE 可以是自变量, 而衡量个体生活执行力的 ADL 可以是因变量。根据“认知-行为”理论, sTBI 患者日常生活执行力与患者的认知程度、神经缺损程度密切相关, 为此, MMSE、NIHSS 可能是肢体产生行为的中介因素。在此假设下, 本研究将 MMSE、NIHSS 设定为中介因素, 与因变量 ADL、自变量 FMA-UE 一同纳入中介效应模型当中, 经检验模型成立, NIHSS、MMSE 为完全中介因素, NIHSS 仍是负向影响, MMSE 仍是正向影响。这说明在 ULRRT 联合 VR 交互干预下, 患者生活质量的提高需在肢体功能康复的基础上依赖于认知功能恢复和神经功能恢复。Calvillo M 等人^[18]曾指出, 颅脑损伤行为和认知恢复的难点在于认知和情感障碍, 二者会随着伤害的严重性而增加, 这表明认知障碍会因为颅脑损伤成为影响患者日常行为的可能诱因。Ozga J E 等人^[19]曾在 2018 年的研究中指出, 人类行为执行功能是由决策、冲动控制、注意力、行为灵活性和工作记忆等认知过程加以实施的, 主要依靠额叶皮层、纹状体和海马体以及其他大脑区域中的单胺能(多巴胺能、血清素能和去甲肾上腺素能)神经传递, 而颅脑损伤会导致信号传递过程的中断, 使得行为执行功能区域长期处于空白缺陷的状态。换言之, 无认知指令则日常行为将难以实施, 这也解释了认知功能在肢体功能与日常生活行为的中介作用。但穆景颂等人^[20]的研究方向与本研究不同, 是从颅脑损伤患者认知障碍与意识障碍、肢体功能、尿路感染等关系作为突破口, 强调认知障碍有多种影响因素, 而未将 sTBI 患者日常行为作为考量对象, 但是其指出的并发症也应成为不可忽视的因素。由于本研究属于单中心、小样本研究, 对于机器人训练对患者肢体康复进展的仿真学研究、患者肢体康复生化指标变化、VR 互动干预多样化探讨等方面并未提及, 还需大样本多中心进一步佐证, 是未来深入研究的方向。

利益冲突声明: 本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明: 王婷婷负责设计论文框架, 起草论文, 论文修改; 李静负责实验操作, 研究过程的实施; 蔺洁璐、李静负责数据收集, 统计学分析, 绘制图表; 杨芳负责拟定写作思路, 指导撰写文章并最后定稿。

参考文献

- [1] Dzierżęcki S, Ząbek M, Zaczyński A, et al. Prognostic properties of the association between the S-100B protein levels and the mean cerebral blood flow velocity in patients diagnosed with severe traumatic brain injury[J]. *Biomed Rep*, 2022, 17(1): 58.
- [2] Mudekereza P S, Murhula G B, Kachungunu C, et al. Factors associated with hospital outcomes of patients with penetrating craniocerebral injuries in armed conflict areas of the Democratic Republic of the Congo: a retrospective series[J]. *BMC Emerg Med*, 2021, 21(1): 109.
- [3] Kim J H, Choo Y H, Jeong H, et al. Recent updates on controversies in decompressive craniectomy and cranioplasty: Physiological effect, indication, complication, and management[J]. *Korean J Neurotrauma*, 2023, 19(2): 128–148.
- [4] Korhonen T K, Suo-Palosaari M, Serlo W, et al. Favourable long-term recovery after decompressive craniectomy: the Northern Finland experience with a predominantly adolescent patient cohort[J]. *Childs Nerv Syst*, 2022, 38(9): 1763–1772.
- [5] 陈真, 张林林. 脑外伤患者行早期颅骨修补手术的临床疗效及对患者 NIHSS 与 MMSE 评分的影响[J]. *贵州医药*, 2022, 46(2): 254–255.
- [6] 杰克·阿伯特. 神经病学诊断: 实用临床入门[M]. 曹亦宾, 译. 天津: 天津科技翻译出版有限公司, 2014.
- [7] 巫嘉陵, 王纪佐, 王世民, 等. 脑卒中患者临床神经功能缺损程度评分的信度与效度[J]. *中华神经科杂志*, 2009, 42(2): 75–78.
- [8] 燕铁斌, 伍少玲, 郭友华, 等. Loewenstein 认知评定量表与简易精神状态检查评定脑损伤患者认知功能的比较[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2004, 26(7): 400–403.
- [9] 毕胜, 纪树荣, 顾越, 等. 运动功能状态量表效度研究[J]. *中国康复理论与实践*, 2007, 13(2): 114–116.
- [10] 翁映虹, 黄坚红. 阿尔茨海默病评定量表-认知部分中文版与日常生活能力量表评价血管性痴呆的信度与效度[J]. *中国老年学杂志*, 2014, 34(7): 1751–1753.
- [11] Moulaei K, Bahaadinbeigy K, Haghdoost A A, et al. Overview of the role of robots in upper limb disabilities rehabilitation: a scoping review[J]. *Arch Public Health*, 2023, 81(1): 84.
- [12] Dalla Gasperina S, Roveda L, Pedrocchi A, et al. Review on patient-cooperative control strategies for upper-limb rehabilitation exoskeletons[J]. *Front Robot AI*, 2021, 8: 745018.
- [13] Bosomworth H, Rodgers H, Shaw L, et al. Evaluation of the enhanced upper limb therapy programme within the Robot-Assisted Training for the Upper Limb after Stroke trial: descriptive analysis of intervention fidelity, goal selection and goal achievement[J]. *Clin Rehabil*, 2021, 35(1): 119–134.
- [14] WANG Z M, LI Y, AN J C, et al. Effects of restorative environment and presence on anxiety and depression based on interactive virtual reality scenarios[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(13): 7878.
- [15] Faria A L, Latorre J, Silva Cameirão M, et al. Ecologically valid virtual reality-based technologies for assessment and rehabilitation of acquired brain injury: a systematic review[J]. *Front Psychol*, 2023, 14: 1233346.
- [16] Andrade Ferreira L D, Ferreira H, Cavaco S, et al. User experience of interactive technologies for people with dementia: comparative observational study[J]. *JMIR Serious Games*, 2020, 8(3): e17565.
- [17] 许凤娟, 穆景颂, 黄炎, 等. 影响颅脑损伤患者日常生活活动能力的相关因素分析[J]. *中国康复*, 2023, 38(5): 300–303.
- [18] Calvillo M, Irimia A. Neuroimaging and psychometric assessment of mild cognitive impairment after traumatic brain injury[J]. *Front Psychol*, 2020, 11: 1423.
- [19] Ozga J E, Povroznik J M, Engler-Chiurazzi E B, et al. Executive (dys)function after traumatic brain injury: special considerations for behavioral pharmacology[J]. *Behav Pharmacol*, 2018, 29(7): 617–637.
- [20] 穆景颂, 倪朝民, 吴鸣, 等. 颅脑损伤患者认知障碍相关因素分析[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2020, 42(6): 500–504.

编辑: 崔明璠