基于虚拟现实技术的运动游戏治疗脑瘫儿童上肢功能有效性的 meta 分析

孙天虹[1]　王　楠[1,2△]

【提　要】 目的　对有关基于虚拟现实(virtual reality, VR)技术的运动游戏治疗脑瘫儿童上肢功能有效性的所有文献进行 meta 分析,验证其疗效。**方法**　计算机检索 Web of Science、PubMed、Embase、Cochrane Library、中国知网、维普、万方和中国生物医学文献数据库,由 2 位经过循证培训的研究者进行文献筛选和质量评价,纳入的文献运用 RevMan 5.3 软件进行 meta 分析。**结果**　最终纳入文献 12 篇,其中英文 8 篇,中文 4 篇。总样本量为 502 例,平均样本量为 42 例。meta 分析结果表明,基于 VR 的运动游戏可以改善脑瘫儿童的 Peabody 运动发育量表(Peabody developmental motor scales 2, PDMS-2)评分和上肢技能质量测试量表(quality of upper extremity skills test, QUEST)评分,但不能改善辅助手评估量表(assisting hand assessment, AHA)评分和缩短捷成-泰勒手功能测试(Jesben-Taylor hand function test, JTHFT)用时。**结论**　本项研究的结果表明,基于 VR 的运动游戏在提升脑瘫儿童的上肢功能方面与常规康复具有等同的效果。由于干预方案、频率和评价指标的不同,未来需要更多高质量、多中心、大样本的随机对照试验证实 VR 运动游戏对脑瘫儿童上肢功能的影响。

【关键词】 虚拟现实　虚拟现实技术　脑瘫　上肢　康复　meta 分析
【中图分类号】 R742.3　　**【文献标识码】** A　　**DOI** 10.11783/j.issn.1002-3674.2025.04.019

脑瘫(cerebral palsy, CP)是一种临床综合征,由于胎儿或婴儿未发育成熟的大脑中发生的非进行性病变而导致运动技能和姿势控制障碍,是儿童致残的最常见原因[1]。2013 年国内的流行病学调查显示,我国脑瘫的患病率为 2.46‰[2]。超过一半的脑瘫患儿会经受上肢功能的损害,如接触、抓握和操纵物体,吃饭、穿衣和洗澡等[3],造成儿童的日常生活能力严重下降。虚拟现实(virtual reality, VR)技术是使用计算机硬件和软件创建的交互式模拟,为用户提供参与环境的机会,这些环境类似于现实世界的对象和事件[4]。VR 通过刺激脑瘫儿童的视觉、听觉、触觉和动觉,使中枢神经传导与外周运动控制同步,有助于脑瘫儿童积极参与康复[5]。传统的康复训练方法往往单调乏味,导致训练的动机和参与度较低。相比之下,高度互动和沉浸式的 VR 运动游戏已被证明可以提高治疗依从性[6]。因此,不愿意进行传统治疗的脑瘫儿童可能更喜欢基于 VR 的康复[7]。研究表明,当用作传统治疗的辅助手段时,VR 运动游戏在增强上肢功能和手部灵活性方面疗效显著[8]。国内外已有很多研究证实了 VR 技术可以改善脑瘫儿童上肢功能,但相关文献纳入的样本量较少、结果测量不一致以及文献的质量参差不齐,VR 技术对脑瘫患儿上肢功能的康复效果仍存有争议。目前,多个随机对照试验(randomized control trial,RCT)研究结果的系统综述结论被视为最可靠的证据,是公认的客观评价和整合某一特定问题研究成果的最佳方式[9]。作为系统综述中常用的一种统计方法,meta 分析在临床医学和预防医学等众多领域得到了广泛应用。本研究全面检索 VR 运动游戏治疗脑瘫儿童上肢功能有效性的 RCT 并进行科学系统的 meta 分析,为医护人员制定有效的脑瘫儿童 VR 运动游戏训练计划提供科学的循证依据。

资料与方法

1. 纳入标准

(1)研究对象

①脑瘫儿童符合由中国康复医学会儿童康复专业委员会及中国残疾人康复协会小儿脑性瘫痪康复专业委员会在 2007 年联合制定的《小儿脑性瘫痪的定义、分型和诊断条件》的诊断及分型标准[10];②年龄≥3 岁,能理解并配合治疗师的指令;③监护人对研究过程知情同意并签署知情同意书。

(2)研究类型

随机对照试验。

(3)干预方法

试验组采用基于 VR 的运动游戏,对照组采用常规上肢康复训练。

(4)结局指标

至少采用以下其中一种结局指标:①上肢技能质量测试量表(quality of upper extremity skills test, QUEST);②Peabody 运动发育量表(Peabody developmental motor scales 2, PDMS-2);③捷成-泰勒手功能测试(Jesben-Taylor hand function test, JTHFT);④辅助手评估量表(assisting hand assessment, AHA)。

2. 排除标准

①会议演讲、病例报告或综述等;②发表语言为非

1. 中国医科大学附属盛京医院(110004)
2. 中国医科大学医学人文学院
△通信作者:王楠,E-mail:1583773869@qq.com

中英文语种;③原始文献报告信息过少,无法利用;④重复发表的文献。

3. 检索策略

计算机检索 Web of Science、PubMed、Embase、Cochrane Library、中国知网、维普、中国生物医学文献数据库和万方数据库,检索时间为建库至 2024 年 12 月。英文检索策略为((((cerebral palsies) OR (CP)) OR (cerebral palsy)) AND (((((VR) OR (computer game*)) OR (exergame*)) OR (interactive game*)) OR (virtual reality))) AND ((upper limb) OR (upper extremity))。中文检索策略为(脑瘫 OR 脑性瘫痪 OR 小儿脑瘫) AND (虚拟现实 OR 虚拟环境 OR 虚拟技术 OR VR)。所有的检索策略都是主题词与自由词相结合,不同的数据库策略有所调整。另外,滚雪球式追溯所需文献,以获得更全面的文献信息。

4. 文献筛选和资料提取

由 2 位经过循证护理培训的研究者根据纳入和排除标准对文献的标题、摘要以及全文进行精细的筛选,确定出符合纳入标准的文献,最后进行相互核对。当出现分歧的时候,则需要第 3 位研究者参与决定。对文献数据的提取包括:作者及发表时间、样本例数、年龄、干预措施及疗程和结局指标。

5. 文献质量评价

利用 Cochrane 评价手册 5.1.0 版本中的 RCT 质量评价标准进行评价,包括 7 项:随机序列;分配隐藏;对研究对象及干预实施者进行盲法;对结果测评者进行盲法;结局指标完整;选择性报告;其他偏倚。根据满足上述质量标准的程度,文献被分为 A、B、C 三级。A 为全部符合,B 为部分符合,C 为全部不符,应剔除该文献。所有文献由 2 位研究者独立完成质量评价,最后一起讨论确定评价结果。当出现分歧时,则需要第 3 位研究者参与决定。

6. 统计学分析

RevMan 5.3 软件被用来进行统计分析:①异质性检验:采用 χ^2 检验,若纳入研究间无异质性($P \geqslant 0.1$, $I^2<50\%$),则采用固定效应模型进行 meta 分析,反之则采用随机效应模型进行分析[11];②连续型变量(PDMS-2、QUEST、JTHFT 和 AHA)需要计算加权均数差(weighted mean difference, WMD)或者标准化均数差(standard mean difference, SMD)来表示合并效应量的大小[12]。同时计算 95%的可信区间(confidence interval, *CI*),$P<0.05$ 表示两组之间差异具有统计学意义。

结　果

1. 文献检索结果

通过数据库共检索文献 629 篇。经 Endnote X9 查重后剩余 256 篇。再阅读标题、摘要以及全文后,最终纳入 12 篇文献[13-24],其中英文 8 篇,中文 4 篇。筛选流程见图 1。

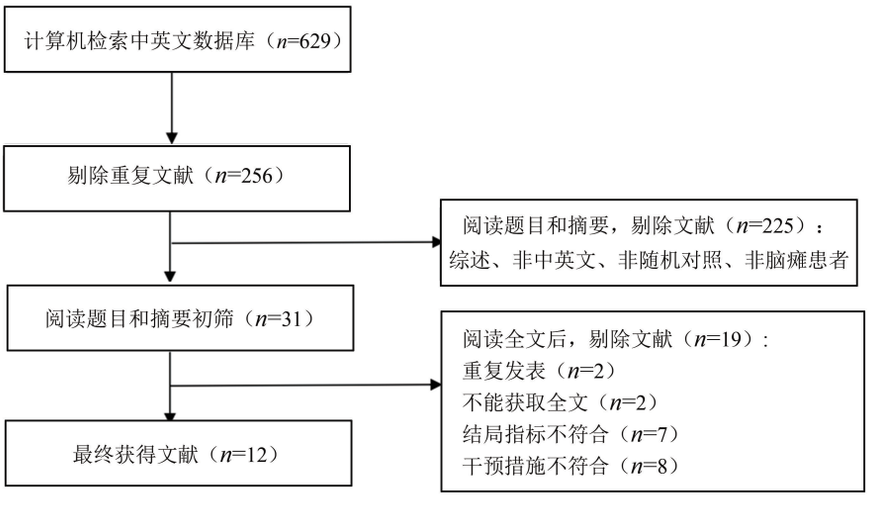

图 1　文献筛选流程图

2. 纳入研究的基本特征及方法学质量评价

纳入的 12 篇文献[13-24]发表于 2006 至 2023 年,共 502 例患者,样本量平均为 42 例。参与者的年龄从 3 岁至 13 岁不等,干预周期从 3 周至 20 周不等,干预频率也因研究而异,干预方式主要为 VR 运动游戏和常规康复,具体内容见表 1。所有研究均提及了基线可比较以及采用随机分组,5 项研究[14,20-22,24]说明分配隐藏。仅有 3 项研究[20,21,24]说明了受试者盲法,5 项研究[16,20-22,24]说明了结果测评者盲法。2 项研究[13,19]数据完整或缺失但不会对结果产生较大影响。其中 2 篇文献[20,24]质量等级为 A,其余文献质量等级为 B,提示纳入研究的质量尚可。具体情况见图 2。

表 1　纳入研究的一般资料

作者	例数（T/C）	年龄（岁）（T/C）	干预措施		干预疗程	结局指标	质量等级
			观察组	对照组			
赵晓科 2018	21/22	3. 9/3. 5	采用 X-BOX 360+Kinect 体感器进行拳击、标枪、深海漏水和等游戏训练。	常规运动疗法、经皮神经肌肉电刺激及中医推拿。	1 h/d，5 d/周，共 3 周	QUEST	B
任凯 2016	19/16	4. 9/4. 5	采用 Q4 情景互动训练系统进行墙面训练、地面训练各 2~3 项。	常规作业疗法和运动疗法。	40 min/d，5 d/周，共 3 个月	PDMS-2	B
胡继红 2016	18/20	4. 5/4. 6	采用怡普乐体感互动康复训练系统进行芝麻开门、保龄球和捞金鱼等游戏。	患手的物品感知、患侧上肢和手的肌力提高训练、患手的抓握操作训练、患手的精细操作能力训练和双手的协调操作训练。	30 min/d，6 d/周，共 3 个月	PDMS-2	B
Chiu 2014	30/27	9. 4/9. 5	四种保龄球、空中运动、飞盘和篮球 Wii 运动竞技游戏。	常规上肢训练。	40 min/d，3 d/周，共 6 周	JTHFT	A
James 2015	51/50	11. 8/11. 9	Mitii 系统包括上肢、认知、视觉感知和身体活动训练。	标准护理通常包括专职医疗人员给予的咨询建议。	30 min/d，6 d/周，共 20 周	JTHFT	B
Acar 2016	15/15	9. 5/9. 7	标准的神经发育治疗+针对偏瘫手网球、棒球和拳击的 VR 游戏。	张力调节、感觉、感知和运动发育支持、促进上肢活动的正常运动、上肢功能技能训练以及穿衣吃饭等日常生活活动。	15 min/d，2 d/周，共 6 周	QUEST JTHFT	B
Sajan 2017	9/9	10. 6/12. 4	Wii 游戏包括拳击和网球等。	常规物理治疗和职业治疗。	45 min/d，6 d/周，共 3 周	QUEST	A
El-Shamy 2018	15/15	9. 5/9. 8	使用 Armeo 软件指定的标准游戏和难度设置。	肘部和手腕屈肌的被动伸展运动、上肢负重训练；全方位刺激上肢的保护反应、加强痉挛肌肉拮抗的锻炼；肘部和手腕伸、促进手部技能的练习。	40 min/d，3 d/周，共 12 周	PDMS-2	B
刘蔚蔚 2023	18/25	5. 5/6. 9	RSK VR 系统通过手部传感器捕捉前臂和手部动作，进而完成相应的游戏活动。沉浸式 VR 设备采用金矢机器人 iReMo 其中的摘水果游戏。	上肢关节活动度、牵伸训练、肌肉放松训练、肌力训练及其手部精细活动训练等常规治疗。	40 min/d，5 d/周，共 4 周	PDMS-2	B
Menekseoglu 2023	18/18	8. 2/8. 3	使用 Oculus Quest 沉浸式 VR 眼镜向患者展示基于运动的“凤凰”、“蝴蝶”“蜜蜂”和“鹰”游戏。	进行肘、腕和手指屈肌的被动伸展运动；前臂旋前肌、上肢举重运动；全方位刺激上肢保护反应；伸展、抓握、搬运和释放。	60 min/d，2 d/周，共 6 周	QUEST	B
Bedair 2016	20/20	6. 1/8. 2	X-BOX 系统的六个 VR 游戏：网球、保龄球、高尔夫、太空流行乐、泡泡和划船游戏。	常规上肢治疗方案。	90min/d，3d/周	PDMS-2	B
Reid，Campbell 2006	19/12	9. 7/9. 3	VR 应用程序包括足球和排球等体育游戏；鼓等音乐节目；还有类似鲨鱼或杂技者等游戏的程序。	常规职业治疗和物理治疗。	90 min/d，1 d/周，共 8 周	QUEST	B

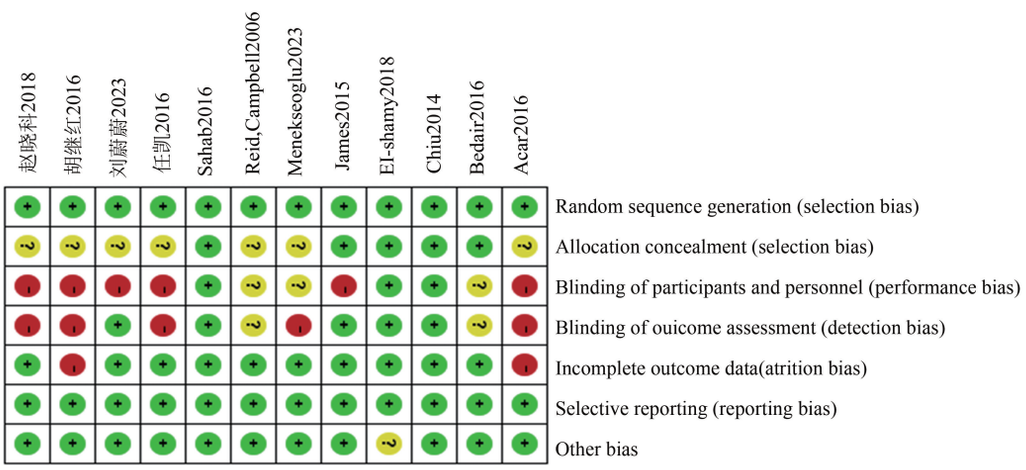

图 2　纳入研究的总体风险偏倚摘要

3. meta 分析的结果

(1)实验组与对照组 PDMS-2 评分的比较

共有 4 项研究[13-14,16-17]涉及 PDMS-2 评分。干预组 75 例,对照组 71 例。meta 分析结果显示各研究间具有同质性($\chi^2=0.93$, $P=0.82$, $I^2=0\%<50\%$),采用固定效应模型进行合并分析。合并效应量与无效竖线不相交,表明 VR 组 PDMS-2 评分高于对照组(SMD=1.09,95% *CI*:0.73~1.44, $P<0.05$),提示基于 VR 的运动游戏可以提升脑瘫患儿的上肢精细运动功能,见图 3。

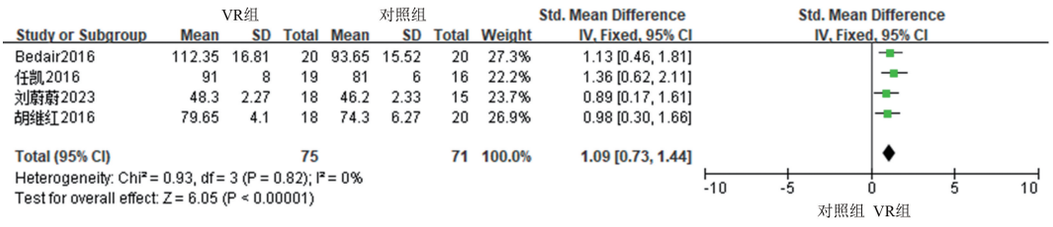

图 3 PDMS-2 评分

(2)实验组与对照组 QUEST 评分的比较

6 项研究[15,18-19,21,23-24]采用 QUEST 评分作为结局指标。干预组 98 例,对照组 92 例。meta 分析结果显示各研究间具有同质性($\chi^2=4.10$, $P=0.54$, $I^2=0\%<50\%$),采用固定效应模型进行合并分析。合并效应量与无效竖线不相交,表明 VR 组 QUEST 评分高于对照组(MD=5.14,95% *CI*:3.68~6.59, $P<0.05$),提示基于 VR 的运动游戏可以提升脑瘫患儿的上肢功能,见图 4。

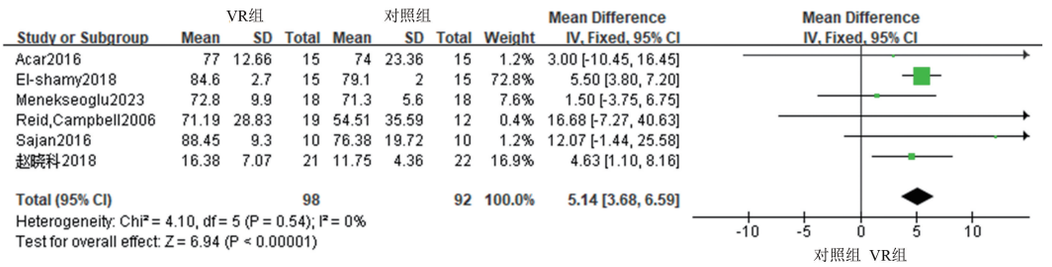

图 4 QUEST 评分

(3)实验组与对照组 JTHFT 时间的比较

共有 3 项研究[19-20,22]涉及 JTHFT 时间。干预组 96 例,对照组 93 例。meta 分析结果显示各研究间具有异质性($\chi^2=7.51$, $P=0.02$, $I^2=73\%>50\%$),采用随机效应模型进行合并分析。合并效应量与无效竖线相交(MD=-1.82,95% *CI*:-7.35~3.71, $P=0.52$),表明 VR 组 JTHFT 与对照组相比无统计学意义,提示基于 VR 的运动游戏不能改善脑瘫患儿的手功能,见图 5。

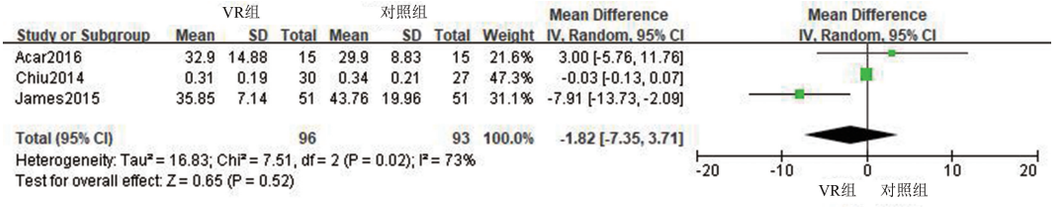

图 5 JTHFT 时间

(4)实验组与对照组 AHA 评分的比较

2 项研究[22-23]采用 AHA 评分作为结局指标。干预组 69 例,对照组 69 例。meta 分析结果显示各研究间具有同质性($\chi^2=0.31$, $P=0.58$, $I^2=0\%<50\%$),采用固定效应模型进行合并分析。合并效应量与无效竖线相交,表明 VR 组与对照组 AHA 评分相比无统计学意义(MD=1.52,95% *CI*:-2.99~6.02, $P=0.51$),提示 VR 的运动游戏不能提升脑瘫患儿的手功能,见图 6。

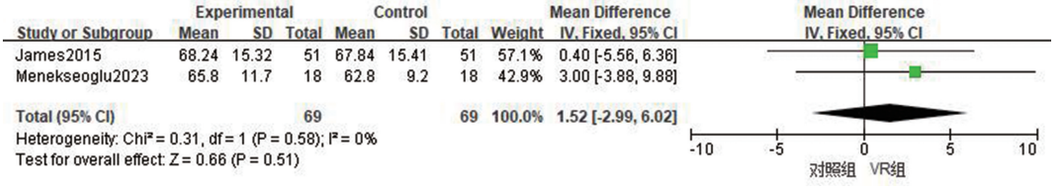

图 6 AHA 评分

讨　论

本研究通过严谨的异质性控制策略增强了结果的可靠性。首先,针对 VR 技术干预形式多样可能导致的异质性采取了两阶段控制策略:在文献筛选阶段,通过限定干预部位(仅纳入上肢功能研究)和干预形式(采用游戏化 VR 系统)实现临床及方法学异质性的源头控制;其次,在统计分析阶段,采用随机效应模型处理残余异质性。这种分层控制策略使各研究间效应量具有良好的一致性,最终获得的合并效应量具有较高的统计效度。

本研究结果表明,基于 VR 的运动游戏在改善脑瘫儿童的上肢功能和精细运动能力方面效果尚不明确,治疗后脑瘫患儿的 QUEST 和 PDMS-2 评分显著高于对照组,但在 AHA 评分和 JTHFT 用时方面两组无显著差异。尽管如此,这仍能为 VR 技术作为常规康复的辅助手段应用于脑瘫患者提供依据。国外一项 meta 分析的结果表示,VR 技术似乎是脑瘫儿童和青少年上肢活动的有效工具[25]。传统的作业疗法以及神经康复技术显示了在脑瘫患者上肢功能康复中的作用,但脑瘫患者对于这些疗法的兴趣较低、配合性较差,如何找到激励性的、有趣的锻炼方法以保持期望的训练水平一直是个难点。Levac 等人在一项范围审查中提出了 VR 疗法帮助脑瘫儿童提高运动技能的一些可能原因,包括①VR 增强了游戏中的问题解决和认知参与,增加了动机和神经可塑性变化;② VR 在类似于现实世界的生态有效的虚拟环境中创建了重复的面向任务和特定任务的实践,并提供了调整任务难度、视觉和/或听觉反馈以及社交游戏和交互潜力的灵活性;③ VR 提供来自父母、同伴或治疗师的社会支持。通过训练,脑瘫儿童可以逐渐减少身体结构和功能的损伤以及活动限制,并逐渐改善对学校、社区和社会的参与[26]。此外,VR 技术还可以缓解作业治疗师大量训练任务的压力。基于以上传统康复疗法不具有的优势,VR 技术可以作为治疗脑瘫儿童上肢功能的有效手段。

本研究存在以下局限性:首先,干预的具体方案、时间、地点、频率和测评指标各异。其次,分析的结果指标因文献不足而不能进行漏斗图分析。最后,本研究只纳入了公开发表的中英文文献,缺少相关的灰色文献。

结　论

本项 meta 分析通过合并多个研究的结果,增加了样本量,从而提高了统计效能,证实了基于 VR 的运动游戏与常规疗法相比在提升脑瘫儿童上肢功能方面具有等同的效果,这提示 VR 技术可以作为一个辅助工具广泛应用于脑瘫儿童的康复护理中。未来仍然需要开展多中心、高质量、大样本的随机对照试验,制定统一的干预方案、时间和测评指标等,进一步证实 VR 技术在脑瘫患儿上肢康复中的应用效果。

参　考　文　献

[1] Koman LA, Smith BP, Shilt JS. Cerebral palsy[J]. Lancet, 2004, 363(9421): 1619-1631.

[2] 唐久来, 秦炯, 邹丽萍, 等. 中国脑性瘫痪康复指南(2015):第一部分[J]. 中国康复医学杂志, 2015, 30(7): 747-754.

[3] Delgado MR, Tilton A, Carranza-Del Río J, et al. Efficacy and safety of abobotulinumtoxinA for upper limb spasticity in children with cerebral palsy: a randomized repeat-treatment study[J]. Dev Med Child Neurol, 2021, 63(5): 592-600.

[4] Martinie O, Mercier C, Gordon AM, et al. Upper Limb Motor Planning in Individuals with Cerebral Palsy Aged between 3 and 21 Years Old: A Systematic Review[J]. Brain Sci, 2021, 11(7): 90.

[5] Liu C, Wang X, Chen R, et al. The Effects of Virtual Reality Training on Balance, Gross Motor Function, and Daily Living Ability in Children With Cerebral Palsy: Systematic Review and meta-analysis[J]. JMIR Serious Games, 2022, 10(4): e38972.

[6] Zhang C, Yu S, Ji J. CFI: a VR motor rehabilitation serious game design framework integrating rehabilitation function and game design principles with an upper limb case[J]. J Neuroeng Rehabil, 2024, 21(1): 113.

[7] Harris K, Reid D. The influence of virtual reality play on children′s motivation[J]. Can J Occup Ther, 2005, 72(1): 21-29.

[8] 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.

[9] 董悦颖. Meta 分析方法学质量与报告质量评价的主要问题[J]. 中国卫生统计, 2017, 34(6): 1006-1008.

[10] 中国康复医学会儿童康复专业委员会, 中国残疾人康复协会小儿脑瘫康复专业委员会. 小儿脑性瘫痪的定义、分型和诊断条件[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2007, 29(5): 309.

[11] 张蔚, 薛皓皓, 李雯, 等. 腹腔镜内镜微创保胆术治疗胆囊息肉的 meta 分析[J]. 中国医科大学学报, 2016, 45(11): 1013-1016+1030.

[12] 李素文, 程玉海. 临床护理路径在冠心病心绞痛患者中应用效果的 meta 分析[J]. 中国卫生统计, 2021, 38(5): 716-720.

[13] 胡继红, 张惠佳, 罗卫红, 等. 虚拟现实技术结合作业疗法对痉挛型偏瘫脑瘫患儿上肢功能康复的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2016, 38(12): 916-919.

[14] Bedair R, AI-Talawy H, Shoury K, et al. Impact of virtual reality games as an adjunct treatment tool on upper extremity function of spastic hemiplegic children[J]. Int J PharmT ech Res, 2016(9):1-8.

[15] Reid D, Campbell K. The use of virtual reality with children with cerebral palsy: a pilot randomized trial[J]. Ther Rec J, 2006, 40(4): 255-268.

[16] 刘蔚蔚. 虚拟现实技术对儿童脑瘫上肢运动功能及其脑功能连接的研究[D]. 昆明: 昆明医科大学, 2023.

[17] 任凯, 龚晓明, 章荣, 等. 虚拟现实训练对痉挛型双瘫脑瘫患儿肢体运动功能的影响[J]. 中国当代儿科杂志, 2016, 18(10):

975-979.
[18] 赵晓科, 张跃, 汤健, 等. 限制诱导运动疗法辅助虚拟现实游戏对偏瘫儿童运动功能的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2018, 40(5): 361-365.
[19] Acar G, Altun GP, Yurdalan S, et al. Efficacy of neurodevelopmental treatment combined with the Nintendo® Wii in patients with cerebral palsy[J]. J Phys Ther Sci, 2016, 28(3): 774-780.
[20] 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.
[21] El-Shamy SM. Efficacy of Armeo® Robotic Therapy Versus Conventional Therapy on Upper Limb Function in Children With Hemiplegic Cerebral Palsy[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2018, 97(3): 164-169.
[22] James S, Ziviani J, Ware RS, et al. Randomized controlled trial of web-based multimodal therapy for unilateral cerebral palsy to improve occupational performance[J]. Dev Med Child Neurol, 2015, 57(6): 530-538.
[23] Menekseoglu AK, Capan N, Arman S, et al. Effect of a Virtual Reality-Mediated Gamified Rehabilitation Program on Upper Limb Functions in Children With Hemiplegic Cerebral Palsy: A Prospective, Randomized Controlled Study[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2023, 102(3): 198-205.
[24] Sajan JE, John JA, Grace P, et al. Wii-based interactive video games as a supplement to conventional therapy for rehabilitation of children with cerebral palsy: A pilot, randomized controlled trial[J]. Dev Neurorehabil, 2017, 20(6): 361-367.
[25] Burin-Chu S, Baillet H, Leconte P, et al. Effectiveness of virtual reality interventions of the upper limb in children and young adults with cerebral palsy: A systematic review with Meta-analysis[J]. Clin Rehabil, 2024, 38(1): 15-33.
[26] Levac D, Rivard L, Missiuna C. Defining the active ingredients of interactive computer play interventions for children with neuromotor impairments: a scoping review[J]. Res Dev Disabil, 2012, 33(1): 214-223.

(责任编辑:郭海强)

(上接第 569 页)

[4] 罗天娥,李淼,郭强,等. 联合脆弱 Copula 模型在含有终止事件的复发事件数据分析中的应用[J].中国卫生统计,2020,37(5):654-658.
[5] Cai T, Cheng SC, Wei LJ. Semiparametric mixed-effects models for clustered failure time data [J]. Journal of the American Statistical Association, 2002, 97(458): 514-522.
[6] Zeng D, Lin DY, Lin X. Semiparametric transformation models with random effects for clustered failure time data [J]. Statistica Sinica, 2008, 18(1): 355.
[7] 罗天娥,刘成芳,赵晋芳,等. 共享伽玛脆弱模型在癫痫复发的应用及实现[J].中国卫生统计,2012,29(2):175-176+180.
[8] Hirsch K, Wienke A. Software for semiparametric shared gamma and log-normal frailty models: an overview [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2012, 107(3): 582-597.
[9] Vu HTV, Knuiman MW. A hybrid ML-EM algorithm for calculation of maximum likelihood estimates in semiparametric shared frailty models [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2002, 40(1): 173-187.
[10] Hunter DR, Lange K. A tutorial on MM algorithms [J]. The American Statistician, 2004, 58(1): 30-37.
[11] 王佳,丁洁丽,沈静. 比例风险模型下参数估计的两种 MM 算法的一些应用[J].数理统计与管理,2016,35(4):649-661.
[12] Klein JP. Semiparametric estimation of random effects using the Cox model based on the EM algorithm [J]. Biometrics, 1992: 795-806.
[13] Fleming TR, Harrington DP. Counting processes and survival analysis [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
[14] 惠晓莹,孙金峤,高维银,等. 慢性肉芽肿病中远期随访和感染预防性药物的效果分析[J].中国循证儿科杂志,2012,7(5):321-325.
[15] 郭强,王晶晶,刘桂芬,等. 参数正则稳态脆弱模型在临床复发事件数据分析中的应用[J].中国卫生统计,2017,34(2):218-221.

(责任编辑:郭海强)

(上接第 573 页)

[12] Arellano M, Bover O. Another Look at the Instrumental Variable Estimation of Error-components Models [J]. Journal of Econometrics, 1995, 68(1): 29-51.
[13] 刘宇佳,李春艳. 收入差距对高技术产业创新能力的影响及传导机制:基于系统 GMM 和门限效应的实证检验[J].河南师范大学学报(哲学社会科学版),2022,49(3):92-98.
[14] 王珍愚,曹瑜,林善浪. 环境规制对企业绿色技术创新的影响特征与异质性:基于中国上市公司绿色专利数据[J].科学学研究,2021,39(5):909-919+929.
[15] 明艳,董志勇. 我国人口预期寿命的影响因素分析[J].学理论,2010(4):47-50.
[16] 吴重轩. 社会经济因素对我国预期寿命的影响研究:基于五普、六普数据的计量分析[D]. 上海:上海社会科学院,2014.
[17] 李海明,王有强. 卫生资源投入与健康中国建设:基于价值的卫生系统视角[J].中国行政管理,2018(8):65-69.

(责任编辑:郭海强)