

虚拟现实技术有助于降低学习者的认知负荷?

——基于 23 项实验与准实验研究的元分析

王国华^{1,2} 宋佳音³ 田梁浩¹ 梁云真¹

(1. 河南师范大学 教育学部, 河南新乡 453000; 2. 智能教育河南省协同创新中心, 河南新乡 453000; 3. 同济大学 职业技术教育学院, 上海 201804)

【摘要】 虚拟现实技术因能促进学习者的概念理解、知识迁移和情感投入等而广受关注。认知负荷是衡量虚拟现实技术教育效果的重要因素。国内外均有针对虚拟现实技术影响学习者认知负荷的实证研究, 但结论存在争议。本研究采用元分析方法, 深入分析国内外 23 篇实证类研究文献, 从学科、学段、干预时间等维度探讨调节变量对虚拟现实影响认知负荷的作用。结果表明, 虚拟现实技术整体上对减少认知负荷起中等程度的促进作用; 调节分析显示, 认知负荷测量工具、虚拟现实应用场景、教学方法在虚拟现实技术影响认知负荷过程中发挥调节作用, 学段、学科、干预时间和频率、虚拟现实技术类型等不存在调节效应。

【关键词】 虚拟现实; 认知负荷; 多媒体学习; 元分析

【中图分类号】 G434 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1007-2179(2023)04-0110-11

一、引言

近年来, 人工智能、大数据、元宇宙等技术在教育领域应用成为研究者关注的热点(马燕等, 2022)。作为新兴教育技术的重要形态, 虚拟现实(VR)不仅能够用于创建与现实场景类似的学习环境, 满足学习情景化及交互自然化的需求(郑玲等, 2021), 还可以克服传统实验的局限性, 为成本与风险较高的实验教学提供优质解决方案(Makransky

et al., 2017)。已有研究揭示, VR 技术具有增强学习动机和学习兴趣(Parong, 2018)、促进记忆和理解(Jensen et al., 2018)等的教育潜力。然而, 除动机、成绩等外, 认知负荷同样是衡量技术使用效果的重要指标之一。有研究者发现, VR 技术可能引发认知负荷超载的风险(Chao et al., 2022), 认知负荷的变化又会对学习者的学习状态、学习质量等产生影响(薛耀峰等, 2019)。

认知负荷指在一段特定时间内, 个体的工作记

【收稿日期】 2023-04-20

【修回日期】 2023-06-13

【DOI 编码】 10.13966/j.cnki.kfjyyj.2023.04.011

【基金项目】 2021 年度教育部人文社会科学研究青年项目“多模态生理数据驱动的在线学习认知负荷测评模型及方法研究”(21YJC880072); 2020 年度国家自然科学基金青年基金项目“STEAM 教育中跨学科协同学习的内在机理与优化策略研究”(72004055)。

【作者简介】 王国华, 博士, 讲师, 硕士生导师, 河南师范大学教育学部, 研究方向: 在线学习、认知状态评估等(wgh19892008@126.com); 宋佳音, 硕士研究生, 同济大学职业技术教育学院, 研究方向: 在线学习; 田梁浩, 硕士研究生, 河南师范大学教育学部, 研究方向: 认知状态评估; 梁云真, 博士, 副教授, 硕士生导师, 河南师范大学教育学部, 研究方向: 在线学习、STEAM 教育等。

【引用信息】 王国华, 宋佳音, 田梁浩, 梁云真(2023). 虚拟现实技术有助于降低学习者的认知负荷? ——基于 23 项实验与准实验研究的元分析[J]. 开放教育研究, 29(4): 110-120.

忆进行信息加工所需的心理资源总量(Sweller, 1988)。由于注意力资源和工作记忆容量有限,大脑处理新信息的数量和持续时间会受限制(Daneman et al., 1980)。如果同时处理的信息量超过个体认知资源总量,就会造成认知负荷过载,从而阻碍信息加工活动,影响任务执行。因此,评估VR技术的认知负荷对提高认知资源利用率,指导VR技术教育教学应用具有重要意义。已有研究虽然就此开展了实证研究,但相关研究存在值得商榷之处。首先,已有研究结果存在差异,VR技术究竟怎样影响认知负荷问题仍亟待回答;其次,大多数研究是在特定学科、学段等条件下探讨VR技术对认知负荷的影响,研究结论单一,缺少系统性综述结论。基于此,本研究采用元分析法整合国内外有关VR技术对认知负荷影响的实验与准实验研究结果,对单个样本进行综合的统计学分析(Glass, 1976),整体评价VR技术对认知负荷的影响。

二、研究进展

许多学者就虚拟现实技术如何影响认知负荷开展了大量实证研究,形成以下三种观点:VR技术能有效降低认知负荷,VR技术会增加认知负荷,VR技术对认知负荷无显著影响。

(一)VR技术能有效降低认知负荷

有研究者认为虚拟现实技术能用于创造个性化、沉浸式和交互性的真实情景,提供“边做边学”的机会(Renganayagalu et al., 2021),实现抽象内容的可视化,复杂信息的结构化。比如,刘等(Liu et al., 2022)研究发现,与传统学习材料相比,VR学习材料更简单直观,有利于降低认知负荷,这与丹等(Dan et al., 2018)的研究结论一致。也有学者发现利用虚拟现实技术营造的沉浸式学习环境能支持学习者的多通道感知(Hackett et al., 2018),使其产生置身真实场景的体验(艾兴等, 2021),有利于学习者专注于学习材料(Buttussi et al., 2018),减少外在认知负荷,释放无关信息占用的有限认知资源。比如,赵等(Cho et al., 2022)以“颜色混合”为内容,发现虚拟环境下四年级学生的认知或心理资源投入更少,认知负荷更低。

(二)VR技术会增加认知负荷

有研究发现虚拟现实相比于传统多媒体教学

环境,操作更复杂(Lo et al., 2022),感知和交互更丰富,如提供背景音乐、动画等有趣但不必要的交互(Parong et al., 2021),会分散注意力,加重与学习无关的认知负荷。理查兹等(Richards et al., 2015)认为,虚拟现实环境丰富的感官刺激可能增加感官信息量,导致认知负荷超载;陈等(Chen et al., 2022)的实验结果表明,虚拟现实应用的交互设计使学生在工程设计任务产生了更高的认知负荷。同时,也有研究者(Parong et al., 2021)注意到高沉浸感诱发学习者产生过高的积极情绪,增加额外的认知负荷,干扰认知过程。

(三)VR技术对认知负荷无显著影响

有研究者(李萌等, 2020)以80名中学生为研究对象,分别基于VR或传统课堂的方式开展研究,发现实验组和对照组的认知负荷不存在显著差异;林等(Lin et al., 2021)采用对照实验探究项目式学习使用VR技术,发现学生穿戴VR头显设备学习没有产生额外的认知负荷。

综上所述,越来越多的研究者关注VR技术对认知负荷的影响,但结论不一。有研究者(Huang et al., 2020)甚至提出,学习者的经验水平和学习风格会影响研究结果。鉴于此,本研究采用元分析方法,以国内外虚拟现实技术教育应用的实证研究为分析对象,尝试解决以下问题:

- 1) VR技术能否影响认知负荷?效果如何?
- 2) VR技术对认知负荷的影响是否在学段、学科、干预时间与频率、认知负荷测量工具、教学方法、技术类型等调节变量上存在显著差异?

三、研究设计

(一)研究方法 with 工具

本研究采用元分析方法,通过提取相关文献的样本量、平均值和标准差等,比较和整合多个相同领域的实验结果,探究VR技术对学生认知负荷的影响。元分析评估步骤如下:1)收集研究文献;2)对特征值进行编码;3)计算效应值;4)分析调节变量对效应值的影响(Glass, 1976)。数据分析工具是元分析软件CMA3.7(Comprehensive Meta-Analysis),同时Excel2019用于前期文献整理与编码。

(二) 研究过程

1. 文献检索

本研究以虚拟现实、认知负荷为关键词,在中国知网、Springer、Web of Science、Elsevier Science-Direct 等数据库搜索相关文献。虚拟现实相关检索主题为“虚拟现实”“虚拟环境”“沉浸式”“vr”“virtual reality”“virtual environment”和“immersion”,认知负荷的检索主题词包括“认知负荷”“cognitive load”。文献搜索时间截至2023年1月1日。在初步收集文献的基础上,研究者使用“滚雪球”法进行文献追溯,减少漏检数量,最终得到1220篇文献。

2. 文献纳入和排除标准

结合元分析方法特点,本研究依据以下标准筛选文献:1)纳入以中文或英文发表的文献,排除其他语言文献;2)研究方法为实验研究或准实验研究,排除综述型文献;3)包含实验组(VR技术)与对照组(非VR技术),单组实验设计需包含前后测;4)结果变量包括认知负荷;5)提供实验组和对照组的样本量、均值、标准差,或者标准误、T值、P值、 χ^2 值等能够有效计算效应值的统计量。

依据上述筛选标准,本研究逐篇排查1220篇

文献,最终被纳入元分析研究的文献有23篇,其中中文2篇,英文21篇。为保证效应量间的独立性,对存在VR技术和其他实验条件联合干预的实验组,本研究只纳入体现VR技术干预效果的一组实验,获得23个独立的效应量,实验组和对照组的总样本量为2229(见图1)。

3. 资料提取与编码

本研究在参考已有文献的基础上,提取23个样本进行编码,自变量为是否使用VR技术,因变量是主观认知负荷。

因不同文献使用的的认知负荷测量量表不一,本研究提取因变量数据时,若文献提供的是总认知负荷值,则将其作为结果数据;若文献提供了多个维度的认知负荷,则依据已有研究纳入测量VR技术影响认知负荷更加敏感的一类结果。

文献编码包括描述性变量和调节变量。描述性变量包括标题、作者信息、发表年份、样本量和实验结果。调节变量包括学段、学科、干预时间、干预频率、教学方法、VR技术类型、VR应用类型、认知负荷测量工具(CL测量工具)(见表1)。

编码由两位教育技术学专业本科生独立完成,对编码结果不一致的文献共同协商或咨询第三方

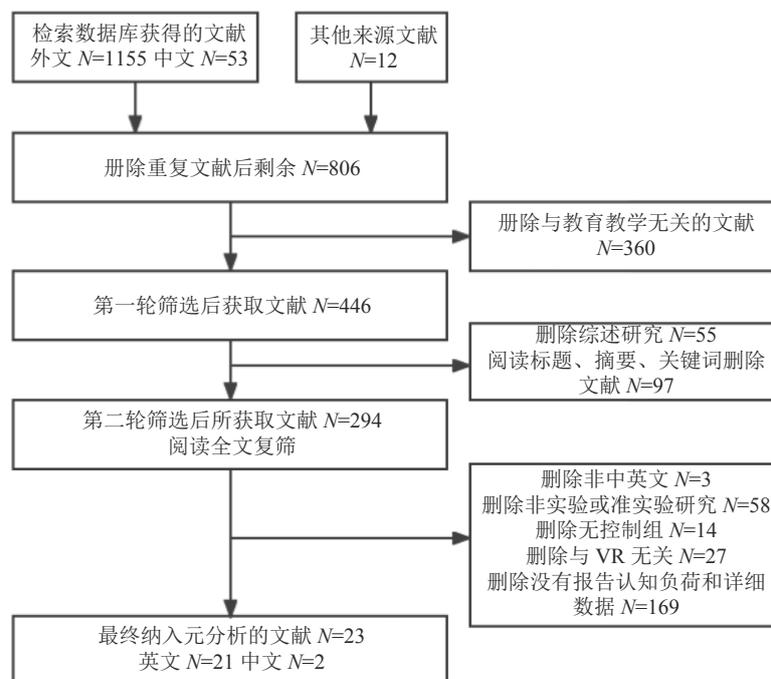


图1 文献筛选流程

解决, 最终的编码结果见表 2。

4. 数据处理与分析

本研究利用 CMA3.7 软件计算各研究的单个效应值、整体效应值、发表偏倚、异质性检验和调节变量影响; 对单位不统一的连续数据, 一般使用标准化均数差作为效应值。鉴于纳入分析的部分实验样本量小, 研究统一采用 Hedges's g(简称 g 值) 而不是 Cohen's d 作为效应值指标。元分析模型有两种: 固定效应模型和随机效应模型。当不同文献特征值影响元分析结果时, 本研究选择随机效应模型使结果更科学合理。鉴于教学方法、认知负荷测量工具等存在差异, 本研究使用随机效应模型, 通过异质性检验验证模型选择的合理性。

四、统计结果与分析

(一) 发表偏移检验

本研究使用失安全系数(Rosenthal's fail-safe number, N_{fs})、Egger 线性回归检验(Egger linear

表 1 调节变量编码标准

调节变量	类别
学段	小学、中学、大学、其他(研究生和非学历教育)
学科	自然科学、人文学科、工程技术、医学教育、其他
干预时间	$t \leq 30 \text{ min}$ 、 $t > 30 \text{ min}$
干预频率	单次、多次
教学方法	讲授法、任务驱动法、探究发现法、测试/评估法
VR 技术类型	桌面式、沉浸式
VR 应用类型	观察性学习、操作性学习、社会性学习
CL 测量工具	Andersen 量表、Hwang 量表、NASA-TLX 量表、Paas 量表、其他(其他研究者开发或改编的量表)

regression test) 和 Begg 秩相关检验(Begg rank correlation test) 进行发表偏差检验(见表 3)。从失安全系数看, 认知负荷为 136, 大于 $5k+10$ (k 为研究个数), 表明研究结论整体上安全可靠。Begg 秩相关检验结果为 $Z=1.06 < 1.96$, $p=0.291 > 0.05$, Egger 线性回归法的 $p=0.203 > 0.05$, 说明本研究存在发表偏差的可能性小, 样本数据可用于后续研究。

表 2 编码结果

研究文献	样本量	学科	学段	干预时间	干预频率	教学方法	VR 技术类型	VR 应用场景	CL 测量工具
管珏琪等(2021)	80	自然科学	中学	——	多次	探究发现法	沉浸式	观察性学习	Hwang 量表
李萌等(2020)	49	其他	小学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	讲授法	沉浸式	操作性学习	其他
Lo et al.(2022)	107	医学教育	大学	$t > 30 \text{ min}$	单次	讲授法	沉浸式	操作性学习	其他
Cho et al.(2022)	83	人文学科	小学	$t > 30 \text{ min}$	多次	任务驱动法	桌面式	社会性学习	Hwang 量表
Chao et al.(2022)	64	医学教育	大学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	讲授法	沉浸式	操作性学习	其他
Liu et al.(2022)	362	自然科学	小学	$t > 30 \text{ min}$	多次	探究发现法	沉浸式	观察性学习	Hwang 量表
Petersen et al.(2022)	158	自然科学	大学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	讲授法	沉浸式	观察性学习	Andersen 量表
Baceviciute et al.(2022)	28	工程技术	其他	——	单次	任务驱动法	沉浸式	操作性学习	Andersen 量表
Yu et al.(2022)	41	医学教育	其他	$t \leq 30 \text{ min}$	多次	测试/评估法	桌面式	操作性学习	Paas 量表
Parong et al.(2021)	120	人文学科	大学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	讲授法	沉浸式	观察性学习	其他
Liu et al.(2021)	104	自然科学	小学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	讲授法	沉浸式	观察性学习	Paas 量表
Baceviciute et al.(2022)	192	医学教育	大学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	测试/评估法	沉浸式	观察性学习	Paas 量表
Yang et al.(2021)	80	工程技术	大学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	任务驱动法	沉浸式	操作性学习	Hwang 量表
Singh et al.(2021)	65	工程技术	大学	$t > 30 \text{ min}$	单次	任务驱动法	桌面式	操作性学习	Hwang 量表
Parong et al.(2021)	30	自然科学	其他	$t \leq 30 \text{ min}$	多次	讲授法	沉浸式	观察性学习	其他
Zhao et al.(2020)	111	自然科学	大学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	探究发现法	沉浸式	观察性学习	NASA-TLX 量表
Huang et al.(2021)	130	人文学科	中学	$t > 30 \text{ min}$	多次	讲授法	沉浸式	观察性学习	其他
Lin et al.(2021)	88	其他	大学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	任务驱动法	沉浸式	社会性学习	Paas 量表
Hackett et al.(2018)	119	医学教育	大学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	探究发现法	沉浸式	观察性学习	NASA-TLX 量表
Dan et al.(2018)	13	其他	大学	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	测试/评估法	沉浸式	操作性学习	NASA-TLX 量表
Wenk et al.(2021)	40	其他	其他	$t \leq 30 \text{ min}$	单次	测试/评估法	沉浸式	操作性学习	NASA-TLX 量表
Chen et al.(2022)	81	工程技术	中学	——	单次	任务驱动法	沉浸式	操作性学习	Andersen 量表
Zhong et al.(2020)	84	工程技术	中学	——	多次	任务驱动法	桌面式	操作性学习	Paas 量表

表 3 发表偏倚检验

	研究数	Rosenthal's N_{fs}	Begg		Egger's intercept	
			Z	p	T	p
认知负荷	23	136	1.06	0.291	1.315	0.203

(二) 异质性检验

本研究采用 Q 检验和 I^2 检验识别异质性。Q 检验以 p 值形式呈现, 若 $p < 0.05$, 表明显著异质。 I^2 检验以 I^2 值的形式呈现, 该值越大表明异质程度越高, 25%、50%、75% 分别作为低、中、高异质性的界限(Higgins et al., 2003)。异质性检验结果见表 4。其中, Q 值为 204.676($p < 0.001$), $I^2 = 89.251$, 大于 75%, 表明采用随机效应模型合理。同时, Q 检验结果显著意味着 VR 技术对认知负荷的影响可能存在潜在的调节变量, 有必要通过调节效应检验判断亚组之间的效应量是否存在差异。

表 4 异质性检验结果

效应模型	研究数	异质性检验			
		Q 值	df	p	I^2
随机效应模型(REM)	23	204.676	22	***	89.251

注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$ 。

(三) 虚拟现实技术对认知负荷的整体影响

本研究采用随机效应模型探讨 VR 技术对认知负荷的影响(见表 5)。23 项研究合并的标准均值差是负值, g 值为 -0.337, 95% 置信区间为 [-0.642, -0.032], 不包括 0, $p < 0.05$, 达到统计学显著水平。这表明, VR 技术在中等程度上对认知负荷起负向显著影响(效应值绝对值 0~0.2 为小效应、0.2~0.8 为中等效应、0.8~1 为大效应)(Cohen, 1992)。

表 5 元分析合并效应值(随机效应模型)

效应模型	研究数	合并效应值(SMD)	95% 置信区间		双尾检验	
			下限	上限	Z	p
随机效应模型(REM)	23	-0.337	-0.642	-0.032	-2.166	*

注: *表示 $p < 0.05$ 。

从整体看, VR 技术可在一定程度上降低学生的认知负荷。

(四) 调节变量效果检验

1. 学段的调节效应

本研究根据实验对象所处的阶段将样本分为小学、中学、大学和其他(见表 6)。组间效应 $\text{Chi}^2 = 1.114$, $p = 0.774 > 0.05$, 组间差异不具有统计学意义, 说明 VR 技术对不同学段学生认知负荷产生的影响效果稳定。具体来看, 各学段的效应值依次是大学($g = -0.586$, $p > 0.05$)、小学($g = -0.289$, $p < 0.01$)、中学($g = -0.205$, $p > 0.05$)、其他($g = -0.118$, $p > 0.05$)。VR 技术对大学、小学和中学的影响效果属中等程度, 对其他阶段的影响效果属小效应, 仅小学阶段达到显著水平, 表明 VR 技术能够有效降低小学生的认知负荷。

2. 学科的调节效应

为探究 VR 技术对认知负荷的影响在不同学科间的差异, 本研究将学科范围分为自然科学(数学、物理和生物等)、人文学科(语文、历史和艺术等)、工程技术(机械、通信和计算机等)、医学教育和其他五类,(见表 7)。总体上, 组间效应 $\text{Chi}^2 = 9.251$, $p = 0.055 > 0.05$, 说明 VR 技术对认知负荷的影响程度在不同学科间没有显著差异。其中, 工程技术($g = -1.473$)和其他($g = -0.863$)具有大的效

表 6 不同学段的影响差异

学段	效应数	效应值(SMD)	95% 置信区间		异质性检验(I^2)	双尾检验		组间效应
			下限	上限		Z	p	
小学	4	-0.289	-0.457	-0.121	0.000	-3.377	**	$\text{Chi}^2 = 1.114$ ($p = 0.774$)
中学	4	-0.205	-0.643	0.234	74.034	-0.913	0.361	
大学	11	-0.586	-1.241	0.069	94.143	-1.754	0.080	
其他	4	-0.118	-0.902	0.666	84.276	-0.296	0.767	

注: **表示 $p < 0.01$ 。

应值, 且是负值, 表明 VR 技术能够有效减少这两类学科的学习认知负荷, 但仅对工程技术的影响效果显著($p < 0.05$)。其余学科的效应值是正值, 大小依次是医学教育($g = 0.120$)、自然科学($g = 0.060$)、人文学科($g = 0.011$), 均未达到显著水平($p > 0.05$), 表明 VR 技术对认知负荷的影响在这三类学科中尚不明确。

3. 干预时间的调节效应

本研究将实验的干预时间分为 $t \leq 30 \text{ min}$ 、 $t > 30 \text{ min}$ (见表 8)。可以看出, 组间效应 $\text{Chi}^2 = 0.739$, $p = 0.390 > 0.05$, 说明不同干预时间下 VR 技术对认知负荷的影响程度基本一致, 没有显著差异。结果显示, $t \leq 30$ 、 $t > 30$ 的效应值分别是 -0.454 、 -0.170 , 说明 VR 技术在不同干预时间下对降低认知负荷起积极作用, 但均未达到显著水平($p > 0.05$)。

4. 干预频率的调节效应

本研究以干预频率(单次/多次)为调节变量。

组间效应 $\text{Chi}^2 = 3.691$, $p = 0.055 > 0.05$, 说明在不同干预频率下, VR 技术对认知负荷的影响同样无显著差异。其中, 单次效应值较高且显著($g = -0.555$, $p < 0.05$), 多次效应值极小且无统计学意义($g = -0.013$, $p > 0.05$)。这表明, 仅在单次使用频率下, VR 技术对认知负荷具有中等效果的减少作用, 频率越高, VR 技术的影响作用大幅下降(见表 9)。

5. 教学方法的调节效应

本研究将纳入文献采用的教学方法分为讲授法、任务驱动法、测试/评估法和探究发现法(见表 10)。组间效应 $\text{Chi}^2 = 9.936$, $p = 0.019 < 0.05$, 说明采取这四种教学方法, VR 技术对认知负荷的影响差异具备统计学意义。不同教学方法的效应值为: 任务驱动法($g = -1.021$)和测试/评估法($g = -0.803$)的效应值较大, 讲授法($g = 0.180$)和探究发现法($g = -0.098$)的效应值小。这说明, VR 技术用于前两种教学方法比用于后两种教学方法的效果更明

表 7 不同学科的影响差异

学科	效应数	效应值(SMD)	95% 置信区间		异质性检验(I^2)	双尾检验		组间效应
			下限	上限		Z	p	
自然科学	6	0.060	-0.279	0.399	69.003	0.348	0.728	$\text{Chi}^2 = 9.251$ ($p = 0.055$)
人文学科	3	0.011	-0.459	0.481	60.617	0.045	0.964	
工程技术	5	-1.473	-2.619	-0.327	95.248	-2.520	*	
医学教育	5	0.120	-0.337	0.576	81.342	0.515	0.607	
其他	4	-0.863	-1.907	0.181	89.376	-1.621	0.105	

注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$ 。

表 8 不同干预时间的影响差异

干预时间	效应数	效应值(SMD)	95% 置信区间		异质性检验(I^2)	双尾检验		组间效应
			下限	上限		Z	p	
$t \leq 30 \text{ min}$	14	-0.454	-0.997	0.088	92.513	-1.643	0.100	$\text{Chi}^2 = 0.739$ ($p = 0.390$)
$t > 30 \text{ min}$	5	-0.170	-0.526	0.186	77.453	-0.936	0.349	

表 9 不同干预频率的影响差异

干预频率	效应数	效应值(SMD)	95% 置信区间		异质性检验(I^2)	双尾检验		组间效应
			下限	上限		Z	p	
单次	16	-0.555	-1.021	-0.090	91.703	-2.338	*	$\text{Chi}^2 = 3.691$ ($p = 0.055$)
多次	7	-0.013	-0.312	0.285	72.663	-0.088	0.930	

注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$ 。

显, 但只有在任务驱动法中($p < 0.05$), VR 技术对认知负荷的降低效果显著。VR 技术用于讲授法, 可能增加认知负荷, 不过结果不具备显著差异。

6. VR 技术类型的调节效应

本研究将 VR 技术类型分为桌面式(利用计算机的鼠标、键盘等进行交互)和沉浸式(借助 VR 设备, 如手柄、头戴式眼镜和头盔等进行交互), 沉浸式对应的效应值为 $g = -0.348$ ($p > 0.05$), 桌面式对应的效应值为 $g = -0.341$ ($p > 0.05$), 异质性检验统计量 $Q_B = 0.001$ ($p = 0.981 > 0.05$), 彼此的效应值非常接近, 说明不同类型的 VR 技术对认知负荷的影响不存在显著性差异(见表 11)。

7. VR 教育应用场景的调节效应

本研究把 VR 教育应用的场景分为观察性学习、操作性学习和社会性学习(高媛等, 2016)(见表 12)。整体来看, 组间效应检验达到统计显著水平($Chi^2 = 6.034$, $p = 0.049 < 0.05$), 说明在三种 VR 教育应用场景中, VR 技术对认知负荷的调节效应存

在差异。三种 VR 教育应用场景的效应值均是负值, 意味着 VR 技术对不同应用场景的认知负荷均能起降低作用, 且对操作性学习影响最大($g = -0.904$, $p < 0.01$), 社会性学习次之($g = -0.013$, $p > 0.05$), 观察性学习影响小($g = -0.001$, $p > 0.05$)。

8. 认知负荷测量工具的调节效应

根据测量量表的不同, 本研究将认知负荷测量工具分为 Hwang 量表、Andersen 量表、Paas 量表、NASA-TLX 量表和其他(其他研究者开发或改编的量表)(见表 13)。从组间效应看, $Chi^2 = 18.314$, $p = 0.001$, 说明 VR 技术对认知负荷的影响在不同认知负荷测量工具间存在显著差异。具体而言, Andersen 量表 [$g = -0.424$, $p < 0.05$] 和 Hwang 量表 [$g = -1.102$, $p < 0.05$] 测出的结果显示, VR 技术能显著降低认知负荷水平, 且 Hwang 量表比 Andersen 量表的效应值大, 意味着 VR 技术对使用 Hwang 量表测量的认知负荷的降低效果更明显; 其他量表 [$g = 0.333$, $p < 0.05$] 测出的认知负荷结果表明, 使用 VR 技术会

表 10 不同教学方法的影响差异

教学方法	效应数	效应值 (SMD)	95% 置信区间		异质性检验 (I^2)	双尾检验		组间效应
			下限	上限		Z	p	
讲授法	8	0.180	-0.106	0.466	59.379	1.235	0.217	Chi ² =9.936 (p=0.019)
任务驱动法	7	-1.021	-1.847	-0.194	94.693	-2.421	*	
探究发现法	4	-0.098	-0.498	0.302	77.508	-0.480	0.631	
测试/评估法	4	-0.803	-1.817	0.211	88.974	-1.551	0.121	

注: *表示 $p < 0.05$ 。

表 11 不同 VR 技术类型的影响差异

VR 技术类型	效应数	效应值 (SMD)	95% 置信区间		异质性检验 (I^2)	双尾检验		组间效应
			下限	上限		Z	p	
桌面式	4	-0.341	-0.791	0.108	75.293	-1.489	0.136	Chi ² =0.001 (p=0.981)
沉浸式	19	-0.348	-0.713	0.016	90.576	-1.872	0.061	

表 12 不同 VR 教育应用场景的影响差异

VR 应用场景	效应数	效应值 (SMD)	95% 置信区间		异质性检验 (I^2)	双尾检验		组间效应
			下限	上限		Z	p	
观察性学习	10	-0.001	-0.256	0.254	66.815	-0.008	0.993	Chi ² =6.034 (p=0.049)
操作性学习	11	-0.904	-1.582	-0.225	93.979	-2.611	**	
社会性学习	2	-0.013	-0.700	0.673	80.607	-0.038	0.970	

注: **表示 $p < 0.01$ 。

表 13 不同认知负荷测量工具的影响差异

CL 测量工具	效应数	效应值 (SMD)	95% 置信区间		异质性检验 (I^2)	双尾检验		组间效应
			下限	上限		Z	p	
Andersen 量表	3	-0.424	-0.798	-0.050	35.327	-2.224	*	Chi ² =18.443 (p=0.001)
Hwang 量表	5	-1.102	-2.099	-0.106	96.518	-2.168	*	
NASA-TLX 量表	4	-0.924	-1.879	0.031	87.281	-1.896	0.058	
Paas 量表	5	-0.076	-0.459	0.307	69.844	-0.387	0.699	
其他	6	0.333	0.051	0.614	42.374	2.313	*	

注: *表示 $p < 0.05$ 。

使其显著增加。此外, 对于 Paas 量表 [$g=-0.076$, $p>0.05$] 和 NASA-TLX 量表 [$g=-0.924$, $p>0.05$] 测得的认知负荷而言, VR 技术没有显著影响。

五、结论与讨论

(一) 结论

本研究结论如下: 1) 虚拟现实技术对于降低认知负荷能起正向促进作用; 2) 认知负荷测量工具、VR 应用类型、教学方法在 VR 技术影响认知负荷过程中发挥着调节作用, 学段、学科、干预时间和频率、VR 技术类型等变量均不存在调节效应。

(二) 讨论

1. VR 技术对认知负荷的整体影响

主效应检验结果显示, 总效应值为-0.337, 且达到显著水平, 表明整体上虚拟现实技术对于降低认知负荷有中等程度的正向影响, 这与黄、辛格等 (Huang et al., 2020; Singh et al., 2021) 的研究结论一致。其原因是虚拟现实技术具有沉浸性、交互性和构想性特征 (Burdea et al., 2003), 既能增强内容的表现形式 (Hwang et al., 2013), 又可以帮助学生从多种空间视角获得丰富的感官和心理体验 (李宝敏等, 2019), 促进学生对抽象和复杂概念的理解, 降低认知负荷。具体来说, 个人的工作记忆由多个通道组成 (Greenberg et al., 2021), 虚拟现实技术可以将零散、割裂的学习材料高度整合成视觉、听觉、触觉等多种感官刺激于一体的学习环境 (崔钰婷等, 2020), 促进学习者同时使用多种通道处理信息, 从而扩大有限的工作记忆容量, 降低认知负担。此外, 虚拟现实技术带来的沉浸感与临场感能激发学习者的心流体验, 使学习者过滤外界干扰, 专注于知识获取, 降低其他信息占用认知负荷。

2. 调节变量对认知负荷的影响效应

从学段看, VR 技术对于减少不同学段学生的认知负荷有促进作用。其中, 对小学生的降低效果最佳。这是因为小学生的抽象思维能力和逻辑思维能力有限, 虚拟现实技术能实现抽象知识的具象化呈现, 帮助学生以系统的思维方式建构知识、理解复杂问题, 从而减轻认知负荷。需指出的是, 大学阶段的效应值较大, 统计学意义不显著, 但其 p 值在给定显著性水平附近, 这意味着不应轻易拒绝 VR 技术能有效降低大学阶段认知负荷的假设 (郑昊敏等, 2011)。相比中小学生, 大学生抗干扰能力和多任务处理能力更高, 且有更丰富的认知图式提升 VR 环境下工作记忆的处理效率, 认知负荷水平更低。从学科来说, VR 技术对不同学科学习的认知负荷有正负向的影响, 对工程技术学科的影响最明显。这是因为工程技术需具象化的学习场景帮助学习者理解学习内容, 且需要大量实践操作。VR 技术可以将抽象概念具体化, 有助于学习者自主探究、反复练习, 降低认知负荷。

从干预时间和频率来说, VR 技术在 $t \leq 30$ min 或单次干预下可以有效降低认知负荷。有研究者 (Rogers, 2021) 基于新奇效应对上述结论进行解释, 当一种交互技术为学习者带来新奇感时, 其认知负荷水平会受影响。有证据 (Poppenk, 2011) 表明, 在新奇效应的作用下, 海马区的记忆和代谢活动会增强, 有利于促进认知图式的激活与利用, 降低认知负荷水平。

从教学方法看, 采用任务驱动教学法时, VR 技术对认知负荷的降低作用显著。这可能是因为任务驱动法倡导“做中学”, 强调学生的主观能动性。VR 技术使学生能在虚实融合的空间中探索、解决

问题, 从而积极建构知识, 降低认知负荷。

从 VR 技术类型看, 两种 VR 设备对认知负荷的影响效果接近。认知负荷往往和设备的可用性相关。这表明, 实验被试对桌面式和沉浸式 VR 设备适应较好。这一方面是因为桌面式 VR 实验数据较少, 结果有待验证。另一方面可能是被试接受过高等教育或属数字原住民, 对新兴技术的接受度较高(张玥等, 2023)。因此, 不同 VR 技术对其认知负荷的影响差距不大, 这与 VR 技术能减少各学段认知负荷且不存在显著性差异的结果一致。值得注意的是, 该结果未支持长时间使用沉浸式 VR 设备会产生眩晕、疲劳等不良反应, 导致认知负荷过载(Bailenson, 2018)的结论。这可能是由于大多数实验时长小于 30 分钟, 且随着 VR 设备和技术的迭代进步, 分辨率低、设备过重等问题得到改善, 舒适使用时间得以延长。

从应用场景类型看, VR 技术的优势在操作性学习中明显, 对认知负荷的影响也更显著, 原因与工程技术学科效果显著类似。在操作性学习中, VR 技术营造的高度拟真环境既能促进学习者掌握抽象的概念, 也支持学习者反复操作并及时获得结果反馈, 从而减轻认知负担, 实现个性化学习。

从认知负荷测量工具看, VR 技术对 Hwang 量表测出的认知负荷的影响最明显, 其次是 Andersen 量表和其他。究其原因, 可能是不同量表包含的维度不同, 且量表敏感性存在差异。这意味着在上述三个量表纳入研究的维度对于评估认知负荷相对敏感。其他量表测量结果显示认知负荷增加, 说明相对于经典量表, 新编制量表的稳定性有待提升。

3. 不足与展望

本研究的不足在于: 第一, 纳入分析的文献数量偏少, 导致调节效应检验的部分变量包含的样本量小, 变量之间的样本数量差距过大, 可能影响分析结果; 第二, 限于样本数据, 本研究未能探讨体现学习者特征的调节变量, 如学习风格、先前经验水平等, 它们可能是有效解释 VR 技术影响认知负荷的重要因素; 第三, 本研究仅统计了量表评定的主观认知负荷结果, 对于生理和任务绩效客观测量的认知负荷数据因样本量少无法纳入分析。此外, 认知负荷是一种多维结构(Sweller et al., 1998), 本研

究分析了总认知负荷或某一维度, 可能存在正负效应相互抵消的情况。因此, 未来研究可从以下方面改进: 1) 扩大文献检索数量, 除期刊和会议论文外, 应涵盖硕博学位论文; 2) 丰富调节变量, 重视学习者因素对认知负荷的影响, 深入调查异质性来源; 3) 尝试整合主观评定与客观测量的认知负荷数据, 聚焦 VR 技术对不同维度认知负荷的影响。

[参考文献]

- [1] 艾兴, 李苇(2021). 基于具身认知的沉浸式教学: 理论架构、本质特征与应用探索[J]. 远程教育杂志, 39(5): 55-65.
- [2] Bailenson, J.(2018). Experience on demand: What virtual reality is, how it works, and what it can do[J]. WW Norton & Company, 142(20): 121-121.
- [3] Baceviciute, S., Cordoba, A. L., Wismer, P., Jensen, T. V., Klausen, M., & Makransky, G. (2022). Investigating the value of immersive virtual reality tools for organizational training: An applied international study in the biotech industry[J]. Journal of Computer Assisted Learning, 38(2): 470-487.
- [4] Burdea, G. C., & Coiffet, P. (2003). Virtual reality technology[M]. New York: John Wiley & Sons: 663-664.
- [5] Buttussi, F., & Chittaro, L.(2018). Effects of different types of virtual reality display on presence and learning in a safety training scenario[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 24(2): 1063-1076.
- [6] Chao, Y. P., Kang, C. J., Chuang, H. H., Hsieh, M. J., Chang, Y. C., Kuo, T. B., & Lee, L. A. (2022). Comparison of the effect of 360° versus two-dimensional virtual reality video on history taking and physical examination skills learning among undergraduate medical students: a randomized controlled trial[J]. Virtual Reality: 1-14.
- [7] Chen, Y. C., Chang, Y. S., & Chuang, M. J.(2022). Virtual reality application influences cognitive load-mediated creativity components and creative performance in engineering design[J]. Journal of Computer Assisted Learning, 38(1): 6-18.
- [8] Cho, I. H., Yeo, J. H., Hwang, G. H., & Yang, H. H.(2022). Impact of a virtual environment on the learning effectiveness, motivation, cognitive load, and group self-efficacy of elementary school students in collaborative learning[J]. Educational Technology Research and Development, 70(6): 2145-2169.
- [9] Cohen, J.(1992). Quantitative methods in psychology: A power primer[J]. Psychol Bull., 112(1): 1155-1159.
- [10] 崔钰婷, 赵志群(2020). 虚拟现实技术对学生学习绩效的影响——基于 59 项实验或准实验研究的元分析[J]. 中国远程教育, 2020(11): 59-67+77.
- [11] Dan, A., & Reiner, M.(2018). Reduced mental load in learning a motor visual task with virtual 3D method[J]. Journal of computer assisted learning, 34(1): 84-93.

- [12] Daneman, M., & Carpenter, P. A.(1980). Individual differences in working memory and reading[J]. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19(4): 450-466.
- [13] 高媛, 刘德建, 黄真真, 黄荣怀(2016). 虚拟现实技术促进学习的核心要素及其挑战 [J]. *电化教育研究*, 37 (10): 77-87+103.
- [14] Glass, G. V.(1976). Primary, secondary, and meta-analysis of research[J]. *Educational Researcher*, 5(10): 3-8.
- [15] 管珏琪, 张悦, 吴哲, 陈宇峰, 张坚勇(2021). 基于 vr 的论证教学对初中生科学学习的影响研究 [J]. *电化教育研究*, 42 (10): 92-99.
- [16] Greenberg, K., Zheng, R., Gardner, M., & Orr, M.(2021). Individual differences in visuospatial working memory capacity influence the modality effect[J]. *Journal of Computer Assisted Learning*, 37(3): 735-744.
- [17] Hackett, M., & Proctor, M.(2018). The effect of autostereoscopic holograms on anatomical knowledge: A randomised trial[J]. *Medical Education*, 52(11): 1147-1155.
- [18] Higgins, J. P., Thompson, S. G., Deeks, J. J., & Altman, D. G.(2003). Measuring inconsistency in meta-analyses[J]. *Bmj*, 327(7414): 557-560.
- [19] Huang, C. L., Luo, Y. F., Yang, S. C., Lu, C. M., & Chen, A. S.(2020). Influence of students' learning style, sense of presence, and cognitive load on learning outcomes in an immersive virtual reality learning environment[J]. *Journal of Educational Computing Research*, 58(3): 596-615.
- [20] Huang, H. L., Hwang, G. J., & Chang, C. Y.(2020). Learning to be a writer: A spherical video - based virtual reality approach to supporting descriptive article writing in high school Chinese courses[J]. *British Journal of Educational Technology*, 51(4): 1386-1405.
- [21] Hwang, W. Y., & Hu, S. S.(2013). Analysis of peer learning behaviors using multiple representations in virtual reality and their impacts on geometry problem solving[J]. *Computers & Education*, 62(5): 308-319.
- [22] Jensen, L., & Konradsen, F.(2018). A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training[J]. *Education and Information Technologies*, 23(4): 1515-1529.
- [23] 李宝敏, 王钰彪, 任友群(2019). 虚拟现实教学对学生学习成绩的影响研究——基于 40 项实验和准实验的元分析 [J]. *开放教育研究*, 25 (4): 82-90.
- [24] 李萌, 胡永斌, 王翠如(2020). 虚拟现实学习环境对学习成效的影响研究——以小学安全教育课程为例 [J]. *中国教育技术装备*, 487 (7): 62-66.
- [25] Lin, H. C. S., Yu, S. J., Sun, J. C. Y., & Jong, M. S. Y.(2021). Engaging university students in a library guide through wearable spherical video-based virtual reality: Effects on situational interest and cognitive load[J]. *Interactive Learning Environments*, 29(8): 1272-1287.
- [26] Liu, R., Wang, L., Koszalka, T. A., & Wan, K.(2022). Effects of immersive virtual reality classrooms on students' academic achievement, motivation and cognitive load in science lessons[J]. *Journal of Computer Assisted Learning*, 38(5): 1422-1433.
- [27] Liu, T., Lin, Y., Hsu, C., Hsu, C., & Paas, F.(2021). Learning from animations and computer simulations: Modality and reverse modality effects[J]. *British Journal of Educational Technology*, 52(1): 304-317.
- [28] Lo, Y. T., Yang, C. C., Yeh, T. F., Tu, H. Y., & Chang, Y. C.(2022). Effectiveness of immersive virtual reality training in nasogastric tube feeding education: A randomized controlled trial[J]. *Nurse Education Today*, 119: 105601.
- [29] Makransky, G., Lilleholt, L., & Aaby, A.(2017). Development and validation of the Multimodal Presence Scale for virtual reality environments: A confirmatory factor analysis and item response theory approach[J]. *Computers in Human Behavior*, 72: 276-285.
- [30] 马燕, 汪爱珠, 郭惠芬, 范文翔, 李明勇(2022). 混合现实技术对学生学习绩效的影响研究——基于 33 项实验与准实验的元分析 [J]. *基础教育*, 19 (1): 85-94.
- [31] Parong, J., & Mayer, R. E.(2018). Learning science in immersive virtual reality[J]. *Journal of Educational Psychology*, 110(6): 785-797.
- [32] Parong, J., & Mayer, R. E.(2021). Cognitive and affective processes for learning science in immersive virtual reality[J]. *Journal of Computer Assisted Learning*, 37(1): 226-241.
- [33] Parong, J., & Mayer, R. E.(2021). Learning about history in immersive virtual reality: does immersion facilitate learning?[J]. *Educational Technology Research and Development*, 69(3): 1433-1451.
- [34] Petersen, G. B., Petkakis, G., & Makransky, G.(2022). A study of how immersion and interactivity drive vr learning[J]. *Computers & Education*, 179(4): 1-16.
- [35] Poppenk, J. L. (2011). Revisiting Cognitive and Neuropsychological Novelty Effects[D]. University of Toronto (Canada): 23-26.
- [36] Renganayagalu, S. K., Mallam, S. C., & Nazir, S. (2021). Effectiveness of VR head mounted displays in professional training: A systematic review[J]. *Technology, Knowledge and Learning*; 122(2): 1-43.
- [37] Richards, D., & Taylor, M.(2015). A Comparison of learning gains when using a 2D simulation tool versus a 3D virtual world: An experiment to find the right representation involving the Marginal Value Theorem[J]. *Computers & Education*, 86: 157-171.
- [38] Rogers, B. A. & Franklin, A. E.(2021). Cognitive load experienced by nurses in simulation-based learning experiences: An integrative review[J]. *Nurse Education Today*, 99(1): 1-13.
- [39] Singh, G., Mantri, A., Sharma, O., & Kaur, R.(2021). Virtual reality learning environment for enhancing electronics engineering laboratory experience[J]. *Computer Applications in Engineering Education*, 29(1): 229-243.
- [40] Sweller, J.(1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning[J]. *Cognitive Science*, 12(2): 257-285.
- [41] Sweller, J., Van Merriënboer, J. J., & Paas, F. G.(1998). Cognitive architecture and instructional design[J]. *Educational Psychology Review*, 10(3): 251-296.

[42] Wenk, N., Penalver-Andres, J., Buetler, K. A., Nef, T., R. M. Müri, & Marchal-Crespo, L.(2021). Effect of immersive visualization technologies on cognitive load, motivation, usability, and embodiment[J]. *Virtual Reality*, 27(7): 307-331.

[43] 薛耀锋, 李卓玮(2019). 基于眼动追踪技术的在线学习认知负荷量化模型研究 [J]. *现代教育技术*, 29 (7): 59-65.

[44] Yang, J. , Liu, F. , Wang, J. , Kou, Z. , Zhu, A. , & Yao, D. (2021). Effect of virtual reality technology on the teaching of urban railway vehicle engineering[J]. *Computer Applications in Engineering Education*. 29(1): 1163-1175.

[45] Yu, P. , Pan, J. , Wang, Z. et al. (2022). Quantitative influence and performance analysis of virtual reality laparoscopic surgical training system[J]. *BMC Med Educ* 22(1): 1-10.

[46] Zhao, J. , Lin, L. , Sun, J. , & Liao, Y. (2020). Using the sum-

marizing strategy to engage learners: empirical evidence in an immersive virtual reality environment[J]. *The Asia-Pacific Education Researcher*. 29(5): 473-482.

[47] 郑吴敏, 温忠麟, 吴艳(2011). 心理学常用效应量的选用与分析 [J]. *心理科学进展*, 19 (12): 1868-1878.

[48] 张玥, 姚璐静(2023). AR 技术赋能对用户认知负荷影响的元分析研究 [J]. *现代情报*, 43 (2): 56-64+167.

[49] 郑玲, 刘革平, 谢涛, 陈娟菲, 张可(2021). 协作学习中虚拟现实技术对学习效果的影响——2007—2019 年国际实证论文的元分析研究 [J]. *中国远程教育*, 2021 (4): 56-64.

[50] Zhong, B., Zheng, J., & Zhan, Z.(2020). An exploration of combining virtual and physical robots in robotics education[J]. *Interactive Learning Environments*, 31(3): 370-382.

(编辑: 李学书)

Does Virtual Reality Technology Help to Reduce Learners' Cognitive Load? - A Meta-analysis Based on 23 Experimental and Quasi-experimental Studies

WANG Guohua^{1,2}, SONG Jiayin³, TIAN Lianghao¹ & LIANG Yunzhen¹

(1. Faculty of Education, Henan Normal University, Xinxiang 453000, China; 2. Intelligent Education Henan Provincial Collaborative Innovation Center, Xinxiang, China 453000; 3. Institute of Vocational Education, Tong Ji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: *Virtual reality technology has received widespread attention from researchers because of its significant value in effectively promoting learners' conceptual understanding, knowledge transfer, and emotional engagement in learning. Cognitive load is an important factor in measuring educational effectiveness of the virtual reality technology. Can the virtual reality technology help reduce learners' cognitive load? Although there are empirical studies examining the impact of virtual reality technology on learners' cognitive load both domestically and internationally, their results are different from each other with some controversial ones. Taking a meta-analysis approach, the study analyzed 23 empirical study reports from domestic and international literature sources, exploring the moderating effects of regulating variables on the impact of virtual reality for cognitive load from the dimensions of discipline, school levels, and intervention time. The results showed that overall, virtual reality technology had a moderate promoting effect on reducing cognitive load. The moderated analysis showed that the cognitive load measurement tool, type of virtual reality application, and teaching methods played a moderating role in the process of virtual reality technology influencing cognitive load, while variables such as school levels, discipline, intervention time and frequency, and type of virtual reality technology did not have a moderating effect. The article provides the references of value for people's scientific understanding of the impact of virtual reality technology on cognitive load.*

Key words: *virtual reality; cognitive load; multimedia learning; meta-analysis*