

虚实融合的实验教学对中小学物理科学教育的影响

——基于2007~2022年的元分析

吕 博

浙江工业大学教育科学与技术学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年6月21日; 录用日期: 2023年7月21日; 发布日期: 2023年7月31日

摘 要

在中小学物理科学教育教学中, 现有研究对虚拟实验与真实实验结合的教学方式是否比单独的真实实验或虚拟实验教学方式更能对中学生科学教育起到积极影响存在争议。为明确基于虚实结合的实验教学方式相较于单独的虚拟或真实实验教学方式在中小学科学教育环境中的整体有效性。本研究采用元分析方法系统评价11项实验或准实验的34个研究结果显示, 虚实结合的实验教学方式相较于单独的虚拟或真实实验教学方式对中小学科学教育的整体有效性较佳(总效应值 $g = 0.800$), 因此倡导虚拟与真实实验结合起来协调教学, 而不是使用单一的虚拟或真实实验, 这对教育技术发展新周期下的虚拟实验教学的课程设计提供了有用信息。

关键词

虚拟现实, 实验教学, 科学教育, 元分析

The Influence of Experimental Teaching Combined with Virtual and Reality on Science Education in Primary and Secondary Schools

—Based on a Meta-Analysis from 2007~2023

Bo Lv

College of Educational Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang

Received: Jun. 21st, 2023; accepted: Jul. 21st, 2023; published: Jul. 31st, 2023

Abstract

Existing research is controversial about whether the combination of virtual experiment and real experiment teaching methods can positively impact middle school students' science education more than the single real experiment or virtual experiment teaching method. To clarify the overall effectiveness of the experimental teaching method based on the combination of virtual and real compared with the separate virtual or real experimental teaching methods in the primary and secondary school science education environment. This study used a Meta-analysis method to systematically review 11 randomized control trials. The results show that the experimental teaching method combining virtual and real experiments is more effective in the overall effectiveness of primary and secondary school science education than the single virtual or real experimental teaching method (total effect value $g = 0.800$), so the combination of virtual and real experiments is advocated to coordinate teaching, rather than using a single virtual or real experiment. This provides useful information for the course design of virtual experiment teaching under the new cycle of educational technology development.

Keywords

Virtual Reality, Experimental Teaching, Science Education, Meta-Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着教育信息化发展的不断深入，教育对教学技术的要求越来越高。VR 技术作为新型技术手段，可以广泛应用于基础教育中的虚拟学习环境构建，将其与实验教学深度融合打破了固有传统的实验教学，极大的激发了学生的学习兴趣、探究能力及学业成绩。

实验教学是中小學生进行学科教育的有效策略，也是实践性教学的一种组织形式。它指的是学生利用仪器设备，在人为控制条件下，引起实验对象的变化，通过观察、测定和分析，获得知识与发展能力。实验教学在中小学基础课和专业课中广泛应用，目的在于着重于培养学生正确使用仪器设备，进行测试、调整、分析、综合和设计实验方案、编写实验报告等能力[1]。

近年来，我国教育充分利用教育数字化转型契机，精准实施了一系列“互联网 + 教育”改革方案[2]。Web3.0 时代下的“互联网 + 教育”的发展机遇与挑战并存，随着时代的发展，数字化技术不断革新，新的设计观念、思想、方法和手段不断涌现。传统的实验教学环节受到多个方面制约，教学内容及资源更新缓慢脱轨于时代需求，传统的实验教学内容已经不能适应当今的人才培养及学科发展[3]，数字赋能的“虚拟现实 + 教育”应运而生。

虚拟现实(virtual reality, VR)技术，又称虚拟仿真技术，是一种新兴的人机交互技术，它利用计算机和相应的应用软件构建一个逼真的、虚拟的世界，能让人身临其境，融入逼真的“情景”中去感受、体验“虚拟的”真实培训场景，带给学者沉浸感十足的体验[4]。在教育数字化战略行动背景下，我国虚拟仿真技术与教育不断融合发展，在赋能教育数字化变革、促进教育公平、改善教学效果等方面做出了突

出贡献。教育部《关于 2017~2020 年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知》(教高厅[2017]4 号)和教育部《关于开展国家虚拟仿真实验教学项目建设的通知》(教高函[2018]5 号)明确指出要大力发展国家虚拟仿真实验教学项目。2015 年我国首次从国家层面强调 STEM (科学 Science, 技术 Technolog, 工程 Engineering, 数学 Mathematics)教育对提升人才竞争力的重要性, 教育研究者结合学科课程独有的育人价值, 积极探索 STEM 教育的本土化发展之路[5], 已有大量研究表明, 已经开发的基于 STEM 的虚拟实验室的实施可以提高学生的科学素养[6]。

2. 研究目的

我们需要进行教育产品的用户体验测评, 在一项题为“虚拟现实融入实验教学”的课题准备前, 需要充分明确虚实结合实验教学对科学教育的影响, 同时需要完善先前综述文章的一些局限性, 以下是研究目标。

目标一: 探究基于虚实结合的实验教学方式相较于单独的虚拟或真实实验教学方式在中小学科学教育环境中的整体有效性。

目标二: 在基于虚实结合的实验教学设计原则结果下, 研究人员对研究编码了 11 个调节变量进行亚组分析, 试图更好的完善目标一。1) 虚实结合、单独虚拟、单独真实条件下的实验教学差异; 2) 虚实结合顺序上的差异; 3) 虚拟现实设备类型的差异; 4) 实验干预时长的差异; 5) 知识领域的差异; 6) 影响内容上的差异; 7) 不同年龄段的差异; 8) 测量时效性的差异; 9) 教学情景下教师的可用性。

3. 研究方法

元分析被定义为对来自个别研究的大量分析结果进行统计分析, 以整合研究结果[7]。研究人员开展的元分析过程是在遵循系统性综述和元分析指导准则 PRISMA 的框架的进行的。

3.1. 文献查找和搜索策略

研究从两个英文数据库和一个中文数据库进行综合查找, 这三个数据库都属于国际权威数据库, 分别是 Web of Science core、Science Direct 和中国国家知识基础设施(CNKI), 查找工作由三名研究者共同展开, 时间跨度自研究立项开始截止到 2023 年 3 月 28 日。采用以下主题词检索: 虚拟现实、虚拟实验、实验教学, 虚实结合, VR, virtual reality, virtual manipulative, virtual laboratory, virtual instrument, AND, physical experiment, physical manipulative, laboratory, And, hands-on, teaching, education, learning, Blended Experiment, science education。中文数据库内分别使用虚拟现实结合实验教学和虚实结合教学进行主题搜索, 英文数据库内的主题词组合策略见图 1。

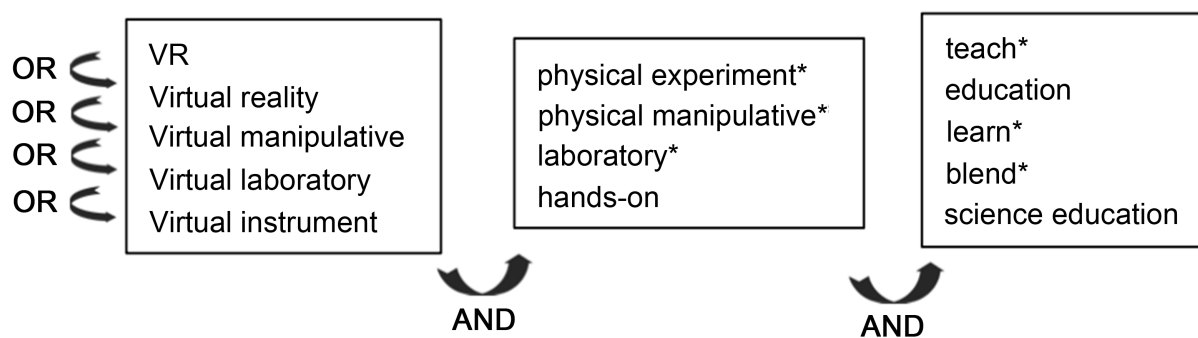


Figure 1. The English database uses Boolean operators “OR” (inside the box) and “AND” (between the boxes)

图 1. 主题词组合策略英文数据库采用布尔运算符“OR”(方框内)和“AND”(方框间)

此外通过其他渠道进行了查找, 根据已有文献的参考文献进行了反向搜索, 并由第一作者通过通讯群组联系虚拟现实技术领域的专家进行查找考证。最终得到文献 3358 篇, 其中三大数据库查得 3237 篇, 其中 Web of Science core 1318 篇, Science Direct 1832 篇, 中国国家知识基础设施(CNKI) 87 篇, 其他渠道查找文献 121 篇。

3.2. 文献纳入和排除标准

根据研究主题和 workflows 确定了文献选择标准。1) 研究设计必须是实验或者准实验研究; 2) 研究必须是基础教育(K-12)阶段和物理学科范畴内的实验教学, 且必须虚实结合; 3) 必须具备开展元分析所需的完整数据, 如实验组和控制组各自效应值的平均数、标准差和样本量, 或者可以表征标准化均数(Standardized Mean Difference, 简称 SMD)的 d 值(Cohen's d)、g 值(Hedges's g)等; 4) 在同行评审期刊上发表的全文文献; 5) 实验组和对照组在内的实验参与者人数在 10 人以上; 6) 文献以中文或英文发表; 7) 实验组和控制组随机分配或可说明参与者之间的等质性。

首次检索的文献用 Zotero 文献管理软件保存操作, 通过删减剔除后, 共有 11 项实验和准实验研究(中英文文献 6 篇, 中文文献 5 篇)被纳入到元分析当中, 文献检索筛选流程见图 2。

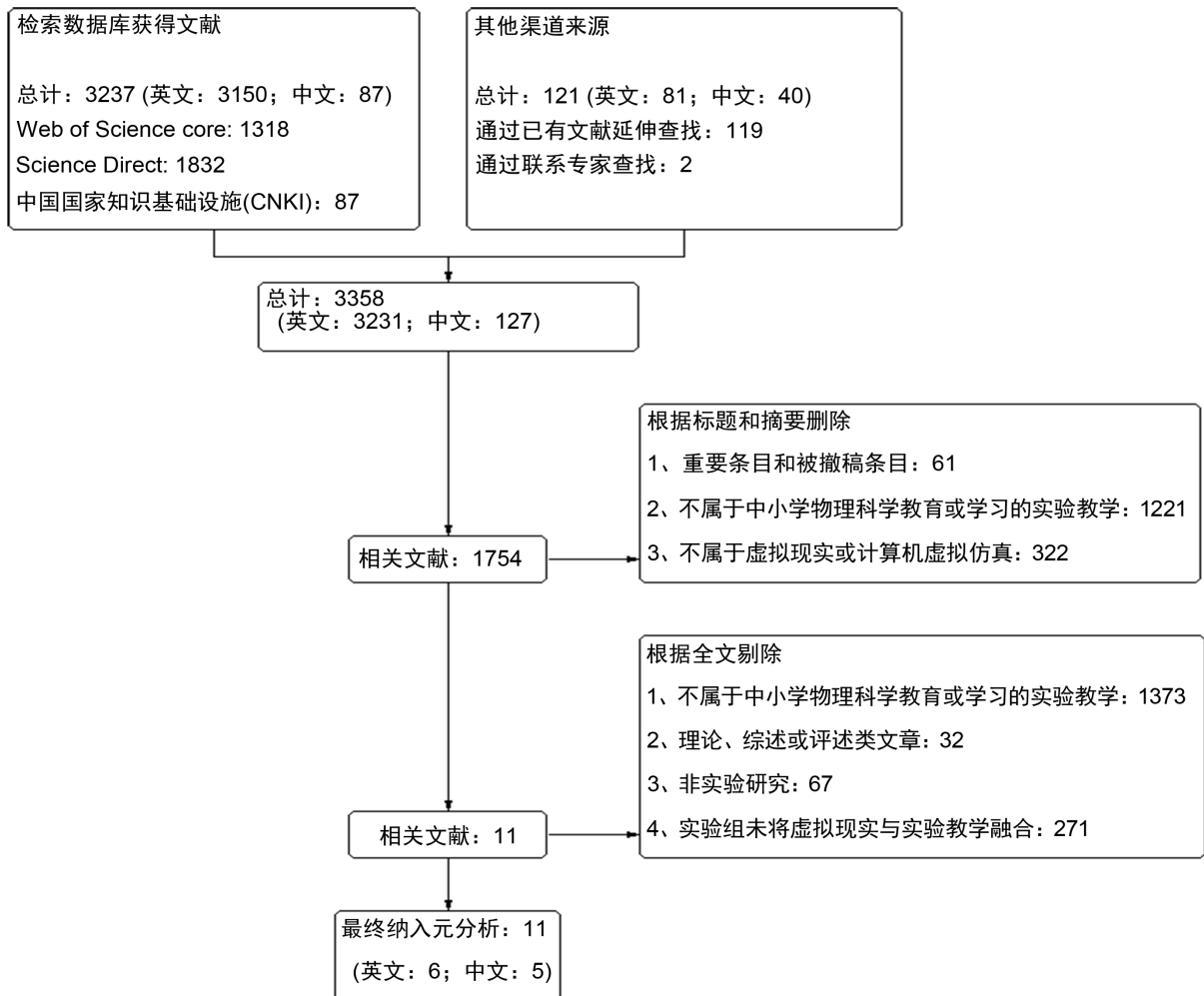


Figure 2. Literature screening process
图 2. 文献筛选流程

3.3. 文献质量评估和风险偏倚

为了保证研究结果的有效性，需要基于针对随机对照组实研究开发的 Cochrane 风险评估工具 Cochrane Collaboration Risk of Bias Tool 对纳入文献的质量进行评估，质量评估由两位研究者分别独立制作风险评估表进行，项目包括随机分配、分配隐藏、盲法(受试者，研究者、评估者)、数据缺失(脱落案例)、选择性报告和其他偏倚(期刊质量、利益冲突、样本量小、基线非均衡)，通过判断每个域的高风险、低风险或不清楚风险，确定单项研究的质量。

最终评估结果显示了 2 项研究存在高偏倚风险，原因是其中一项研究样本量过低，而另一项研究有较高的选择性报告风险。除此之外未发现其他潜在的偏倚风险。经过专家评估和小组会谈决定不排除 2 篇高风险文章。在盲法方面，虚拟现实实验教学与传统实验教学形式差异较大，受试参与者盲法存在客观困难。

3.4. 特征数据提取与编码

两位研究者独立进行了信息提取与编码工作，纳入分析的 11 项研究包含总样本量 1211 人，其中实验组 446 人，对照组 637 人。研究对象来自中国、土耳其和芬兰等七个国家，五项研究发表于 2013 年或 2012 年以前，占 51.67%。七项研究发表于 2013 年或 2013 年以后，占 58.33%。

纳入文献编码内容包括：1) 一般信息即作者名、国别、发表年份；2) 实验方式识别记号；3) 样本抽取方式；4) 测量变量即知识成绩、任务能力、兴趣；5) 因变量测量时机即未延后、延后；6) 学段即小学、初中、高中；7) 干预持续时间；8) 干预总时长；9) 领域即电路、其他；10) 实验组教学方式；11) 控制组教学方式；12) 样本数；13) 虚拟现实类型即计算机 3D 桌面型虚拟现实(Desktop VR)、计算机 2D 桌面型虚拟现实(Desktop VR)；14) g 值(Hedges'g)。两位研究者编码的一致性系数 Cohen Kappa = 0.930，说明特征值编码结果可信。对于编码结果不一致的项目，一位专家和两位研究者一起讨论确定了每一个项目的最终编码类别。由于同一篇文献存在多个实验组对照组的研究，或者在不同时间点进行了多次实验结果的测量，因此 11 项研究文献的编码结果一共产生 34 个独立的效应值，编码后实验组和控制组总样本数 N = 3367，见表 1。

Table 1. Summary of eigenvalue coding for included literatures [8]-[18]

表 1. 纳入文献特征值编码汇总表[8]-[18]

作者(年份)	实验方式识别	国别	学段	样本抽取	测量变量	干预持续时间	干预总时长	因变量测量时机	领域	虚拟现实类型	样本量	实验组教学方式	控制组教学方式	Hedges'g
Hasan Ozgur Kapici (2019) study1	知识 1 - 顺序 1 - 成绩	土耳其	七年级 (12-14 岁)	按班级划分	知识成绩	6周每周 4 小时	24 小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	143	虚拟 - 真实 - 虚拟	真实 - 真实 - 真实	0.45
Hasan Ozgur Kapici (2019) study2	知识 1 - 顺序 2 - 成绩	土耳其	七年级 (12-14 岁)	按班级划分	知识成绩	6周每周 4 小时	24 小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	143	真实 - 虚拟 - 真实	虚拟 - 虚拟 - 虚拟	0.87
Hasan Ozgur Kapici (2019) study3	知识 2 - 顺序 1 - 成绩	土耳其	七年级 (12-14 岁)	按班级划分	知识成绩	6周每周 4 小时	24 小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	143	虚拟 - 真实 - 虚拟	真实 - 真实 - 真实	0.33
Hasan Ozgur Kapici (2019) study4	知识 2 - 顺序 2 - 成绩	土耳其	七年级 (12-14 岁)	按班级划分	知识成绩	6周每周 4 小时	24 小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	143	真实 - 虚拟 - 真实	虚拟 - 虚拟 - 虚拟	0.1
Hasan Ozgur Kapici (2019) study5	顺序 1 - 能力	土耳其	七年级 (12-14 岁)	按班级划分	探索能力	6周每周 4 小时	24 小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	143	虚拟 - 真实 - 虚拟	真实 - 真实 - 真实	0.07

Continued

Hasan Ozgur Kapici (2019) study6	顺序 2 - 能力	土耳其	七年级 (12~14 岁)	按班级划分	探索能力	6 周每周 4 小时	24 小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	143	真实 - 虚拟 - 真实	虚拟 - 虚拟	0.64
Kevin Manunure (2019) study1	知识 1 - 成绩	津巴布韦	中学生 (12~14 岁)	随机分配	知识成绩	3 周每周 2.5 小时	7.5 小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	49	虚拟 - 真实	真实	1.84
Kevin Manunure (2019) study2	知识 2 - 成绩	津巴布韦	中学生 (12~14 岁)	随机分配	知识成绩	3 周每周 2.5 小时	7.5 小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	49	虚拟 - 真实	真实	2.12
Kevin Manunure (2019) study3	知识 3 - 成绩	津巴布韦	中学生 (12~14 岁)	随机分配	知识成绩	3 周每周 2.5 小时	7.5 小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	49	虚拟 - 真实	真实	1.61
Kevin Manunure (2019) study4	知识 4 - 成绩	津巴布韦	中学生 (12~14 岁)	随机分配	知识成绩	3 周每周 2.5 小时	7.5 小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	49	虚拟 - 真实	真实	2.19
林凡生(2018) study1	顺序 1 - 成绩	中国	六年级	方便取样	知识成绩	4 周 6 节课	4 小时	未延后	物质受热变化	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	205	真实 - 虚拟	真实 - 真实	0.54
林凡生(2018) study2	顺序 2 - 成绩	中国	六年级	方便取样	知识成绩	4 周 6 节课	4 小时	未延后	物质受热变化	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	205	虚拟 - 真实	虚拟 - 虚拟	-0.15
林凡生(2018) study3	顺序 3 - 成绩	中国	六年级	方便取样	知识成绩	4 周 6 节课	4 小时	未延后	物质受热变化	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	205	真实 - 虚拟	虚拟 - 虚拟	0.41
林凡生(2018) study4	顺序 4 - 成绩	中国	六年级	方便取样	知识成绩	4 周 6 节课	4 小时	未延后	物质受热变化	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	205	虚拟 - 真实	真实 - 真实	0.54
Tomi Jaakkola (2010) study1	知识 1 - 成绩	芬兰	五年级 (11~12 岁)	随机分配	知识成绩	2 周	未说明	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	50	虚实同时	虚拟	1.16
Tomi Jaakkola (2010) study2	知识 2 - 成绩	芬兰	五年级 (11~12 岁)	随机分配	知识成绩	2 周	未说明	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	50	虚实同时	虚拟	0.39
Tomi Jaakkola (2010) study3	知识 1 - 时长	芬兰	五年级 (11~12 岁)	随机分配	学习时长	2 周	未说明	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	50	虚实同时	虚拟	0.44
Tomi Jaakkola (2010) study4	知识 2 - 时长	芬兰	五年级 (11~12 岁)	随机分配	学习时长	2 周	未说明	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	50	虚实同时	虚拟	0.76
Tomi Jaakkola (2010) study5	知识 1 - 效率	芬兰	五年级 (11~12 岁)	随机分配	学习效率	2 周	未说明	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	50	虚实同时	虚拟	1.35
Tomi Jaakkola (2010) study6	知识 2 - 效率	芬兰	五年级 (11~12 岁)	随机分配	学习效率	2 周	未说明	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	50	虚实同时	虚拟	0.27
T. Jaakkola & S. Nurmi (2008) study1	知识 1 - 真实对照组 - 成绩	芬兰	四、五年级 (10~11 岁)	前测	知识成绩	2 周	未说明	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	66	虚实同时	真实	0.73
T. Jaakkola & S. Nurmi (2008) study2	知识 2 - 真实对照组 - 成绩	芬兰	四、五年级 (10~11 岁)	前测	知识成绩	2 周	未说明	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	66	虚实同时	真实	0.3
T. Jaakkola & S. Nurmi (2008) study3	知识 1 - 虚拟对照组 - 成绩	芬兰	四、五年级 (10~11 岁)	前测	知识成绩	2 周	未说明	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	66	虚实同时	虚拟	1.16

Continued

T. Jaakkola & S. Nurmi (2008) study4	知识 - 虚拟对照组 - 成绩	芬兰	四、五年级 (10~11岁)	前测	知识成绩	2周	未说明	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	54	虚实同时	虚拟	0.45
Zacharias C. Zacharia (2016) study1	知识 - 真实对照组 - 成绩	塞浦路斯	六年级	随机分配	知识成绩	3周每周 80分钟	4小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	55	虚实同时	真实	4.46
Zacharias C. Zacharia (2016) study2	知识 - 虚拟对照组 - 成绩	塞浦路斯	六年级	随机分配	知识成绩	3周每周 80分钟	4小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	55	虚实同时	虚拟	4.19
Zeynep Koyunlu Ünlü (2011) study1	知识 - 真实对照组 - 成绩	土耳其	七年级	随机分配	知识成绩	3周每周 4小时	12小时	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	66	虚实同时	真实	-0.29
Zeynep Koyunlu Ünlü (2011) study2	知识 - 虚拟对照组 - 成绩	土耳其	七年级	随机分配	知识成绩	3周每周 4小时	12小时	未延后	电路	计算机 2D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	66	虚实同时	虚拟	0.18
李丽芳(2017) study1	知识 - 及时测量 - 成绩	中国	八年级	随机分配	知识成绩	1节课	未说明	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	127	虚实同时	真实	0.36
李丽芳(2017) study2	知识 - 期末测量 - 成绩	中国	八年级	随机分配	知识成绩	1节课	未说明	期末	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	127	虚实同时	真实	0.38
李丽芳(2017) study3	兴趣 - 实验组前后测	中国	八年级	随机分配	兴趣	1节课	未说明	未延时	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	64	虚实同时	未干预	0.59
李伟(2021)	知识 - 成绩	中国	九年级	前测	知识成绩	3小时	3小时	未延后	电路	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	101	虚实同时	真实	0.42
熊忠(2008)	知识 - 成绩	中国	高一	前测	知识成绩	持续 1年	未说明	期末	高中物理 (第一册)	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	115	虚实同时	真实	0.53
于洪涛(2007)	知识 - 成绩	中国	高中	随机分配	知识成绩	1节课	未说明	未延后	游标卡尺	计算机 3D 桌面型虚拟现实 (Desktop VR)	153	虚实同时	真实	0.4

3.5. 结果归纳

研究人员从 11 项纳入文献中获得 34 个虚实结合实验教学影响中小生物理科学学习效应量, 影响主要集中在任务能力(两项研究 4 个效应量), 学习绩效(11 项研究 27 个效应量), 学习兴趣(两项研究 3 个效应量)三个方面。由于影响学生学习结果因素的多元和复杂, 不同研究所处的背景和地域存在较大差异, 根据研究间具有实质性差异的大小, 对学习绩效和任务能力采用随机效应模型分析, 对学习兴趣采用固定效应模型分析。

相较于 Cohen's d 值, Hedges's g 值可以在样本量小于 20 项研究的时候更好的统计偏差, 所以研究人员采用 Hedges's g 来表征标准化均值差[19]。效应值 g 的绝对值等于 0.1、0.2、0.5、0.8、1.2、2.0 分别代表效应值的水平达到极小、小、中等、大、极大、巨大[20]。

其中, 正的效应值 g 代表实验组的影响效果好于控制组, 负的效应值 g 代表实验组的影响效果不及控制组[23]。结果显示, 虚实结合实验教学相较于单独的真实或虚拟实验教学对中小生物理科学学习具有积极影响, 其中虚实结合实验教学对于学习绩效的影响效果最佳, Hedges's $g = 0.80$, 95% CI (0.55, 1.04),

$P < 0.0001$ 。元分析森林图见图 3。其次分别是学习兴趣 Hedges'g = 0.59, 95% CI (0.29, 0.89), $P = 0.0001$ 。任务能力 Hedges'g = 0.49, 95% CI (0.29, 0.89), $P = 0.04$ 。由于任务能力和学习兴趣纳入文献的样本量和效应量过低, 接下来主要对学习绩效的影响效果进行分析。

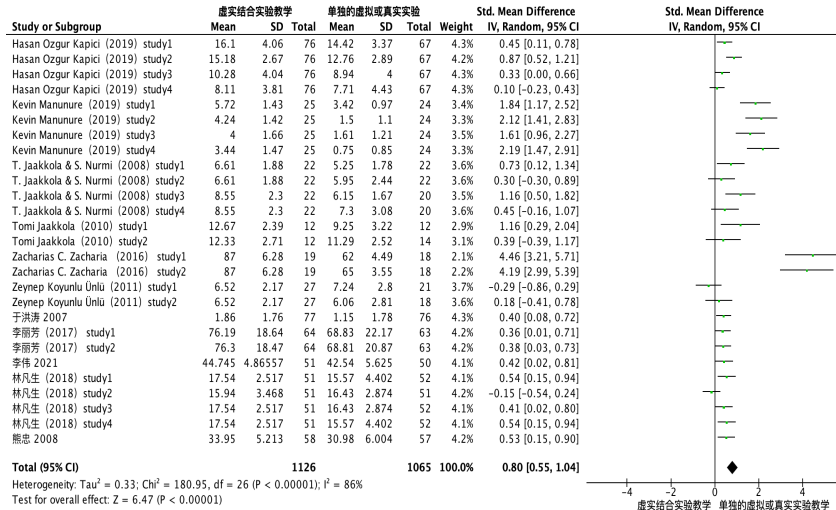


Figure 3. Effect of forest map virtual-reality combined experiment teaching on physical science learning performance in primary and secondary schools

图 3. 森林图虚实结合实验教学对中小学物理科学学习绩效的影响

3.6. 发表偏倚检验

由于系统综述和元分析是基于已经发表的研究结果, 可能会存在夸大效应量的情况, 这个时候就产生了发表偏倚。发表偏倚(Publication Bias)是指已经发表的研究文献不能够代表研究总体的实际状况而引发的偏差[21]。因为较大的发表偏倚将不利于元分析的结果的有效性, 对纳入的原始文献大于 10 篇时, 进行发表偏倚分析显得必要。研究人员使用定性的漏斗图法(Funnel Pot)和定量的 Egger 回归法检验发表偏倚。根据 Cochrane Handbook, 当纳入的原始文献不存在较大的发表偏倚时, 基于原始文献效应值绘制的漏斗图呈现为左右较为对称的倒立型漏斗形状, 见图 4。研究人员纳入 11 篇文献的效应值所形成的漏斗图以 $g = 0.800$ 为对称轴左右分布基本均匀, 证明纳入原始文献的发表偏倚处在可接受范围, 同时为了减少最终纳入论文样本的发表偏倚, 我们不仅考虑了本次审查的期刊文章, 还考虑了书籍章节、论文和同行评审的会议记录, 以此来确保最终纳入文献的稳定性。

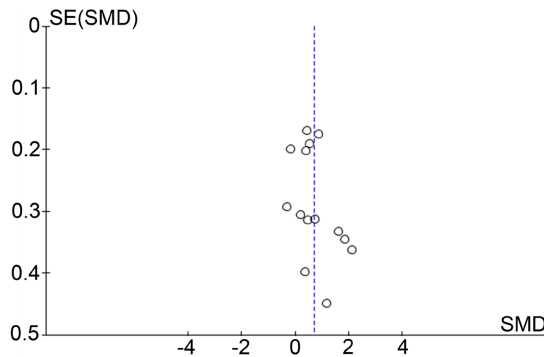


Figure 4. Shows a biased funnel diagram

图 4. 发表偏倚漏斗图

4. 研究分析

据元分析统计过程要求, 研究人员首先对影响学习绩效的 27 个效应值进行了合并, 然后在异质性检验的基础上开展了调节效应分析。

4.1. 敏感性与结果分析

27 个效应量中, 于洪涛(2007)所占权重最大, 为 4.3%, 因此选择该效应量作敏感性分析。剔除效应量前后的整体效应值介于 0.80 [0.55, 1.04]~0.82 [0.57, 1.08]之间, 显示极小的变化差异, 表明元分析估计结果未受极端值的影响, 具有较高的稳定性。

为了实现元分析的目标一, 即探究基于虚实结合的实验教学相较于单独的虚拟或真实实验教学在中小学科学教育环境中的整体有效性。采用随机效应模型将 27 个独立的效应值进行合并, 实验组和控制组的样本总数为 3367, 以此来比较虚实结合实验教学与单独的虚拟或真实实验教学方式在影响学生学习绩效上的差异。结果显示, 27 个独立的效应值当中, 有 25 个效应值具有显著的正向效应($P < 0.00001$), 表明在这部分研究中虚实结合实验教学方式影响学生学习绩效的程度显著优于单独的虚拟或真实实验教学方式。2 个效应值具有显著的负向效应($P < 0.00001$), 表明在这些研究当中虚实结合实验教学方式影响学生学习绩效的程度显著不及单独的虚拟或真实实验教学方式。合并后得到整体的效应值为 $g = 0.80$, $CI = [0.55, 1.04]$, $P < 0.00001$, 显示在总体上虚实结合实验教学方式影响学生学习绩效的程度显著优于单独的虚拟或真实实验教学方式。

研究人员可知结果中的 I^2 代表着由效应值的真实差异所造成的变异占总变异的比重, 若当 $I^2 \leq 24\%$ 时研究不存在异质性; 若当 $25\% \leq I^2 \leq 49\%$ 时研究异质性较低; 若当 $50\% \leq I^2 \leq 74\%$ 时研究具有轻度异质性; 当 $I^2 \geq 75\%$ 时研究显示高异质性水平(Higgins *et al.*, 2003)。 $I^2 = 86\%$ 具有较大的异质性, 即存在潜在的调节变量, 需进行调节效应分析。

4.2. 亚组分析

结合纳入文献特征值编码汇总表, 研究人员根据学段(年龄), 实验组教学方式, 控制组教学方式, 虚拟现实类型, 干预持续时间, 干预总时长, 以及科学领域这七类特征进行亚组分析, 结果见表 2。

Table 2. Summary of subgroup analysis results

表 2. 亚组分析结果汇总

分组	纳入效应数	I^2 值	P 值	Hedges'g 值	95%CI	
学段(年龄)	12 岁以上	15	84%	$P < 0.01$	0.70	[0.42, 0.97]
	12 岁及以下	12	88%	$P < 0.01$	1.00	[0.52, 1.48]
实验组顺序	先虚后实	6	93%	$P < 0.01$	1.33	[0.50, 2.15]
	先实后虚	2	0%	$P = 0.63$	0.48	[0.20, 0.75]
	虚实同时	12	85%	$P < 0.01$	0.92	[0.54, 1.30]
控制组方式	单独虚拟实验	17	86%	$P < 0.01$	0.84	[0.55, 1.14]
	单独真实实验	10	86%	$P < 0.01$	0.72	[0.28, 1.16]
设备类型	2D	8	54%	$P = 0.03$	0.47	[0.13, 0.81]
	3D	19	89%	$P < 0.01$	0.93	[0.63, 1.23]

Continued

干预总时长	10 小时以下	14	91%	$P < 0.01$	1.19	[0.76, 1.62]
	10 小时及以上	7	65%	$P < 0.01$	0.35	[0.10, 0.60]
干预持续时间	3 周以下	10	0%	$P = 0.47$	0.47	[0.32, 0.61]
	3 周及以上	11	88%	$P < 0.01$	0.85	[0.45, 1.25]
知识领域	电路	21	88%	$P < 0.01$	0.97	[0.65, 1.29]
	其他	6	45%	$P = 0.10$	0.38	[0.17, 0.59]

相较于 12 岁以上(Hedges'g = 0.70, $P < 0.01$)的学生, 12 岁及以下(Hedges'g = 1.0, $P < 0.01$)的学生进行虚实结合实验教学效果更佳。1) 虚实结合教学顺序方面, 先进行虚拟实验再进行真实实验(Hedges'g = 1.33, $P < 0.01$)的效果优于虚拟实验和真实实验同时进行(Hedges'g = 0.92, $P < 0.01$)的效果, 而先进行真实实验再进行虚拟实验(Hedges'g = 0.48, $P = 0.63$)的效果差异不具备统计学意义; 2) 单独的虚拟或真实实验方式方面, 单独的真实实验(Hedges'g = 0.84, $P < 0.01$)效果优于单独的虚拟实验(Hedges'g = 0.72, $P < 0.01$), 但差异不大; 3) 虚拟现实设备类型方面, 3D (Hedges'g = 0.93, $P < 0.01$)的计算机仿真实验效果优于 2D (Hedges'g = 0.47, $P = 0.03$)的计算机实验效果; 4) 干预持续时间方面的效果差异不具备统计学意义 ($P = 0.47$); 5) 干预总时长方面, 虚实结合教学 10 小时以下(Hedges'g = 1.19, $P < 0.01$)的学习效果优于虚实结合教学 10 小时及以上(Hedges'g = 0.35, $P < 0.01$)的学习效果; 6) 物理科学领域方面, 电路知识相较于其他知识的学习效果差异不具备统计学意义($P = 0.10$)。

5. 结论

整体上, 基于虚实结合的实验教学方式对中小学生学习科学教育的积极影响高于单独的虚拟或真实实验教学(总效应值: $g = 0.80$), 其有利于中小学生学习科学教育的有效性得到确认。调节效应分析结果表明, 虚实结合顺序和学习时长在虚实结合实验教学对中小学生学习科学教育影响中发挥着重要调节作用, 效应值分别为 $g = 1.33$ 和 $g = 1.19$, 而测量方式、学段、实验干预持续时间、控制组教学方式、效应值所属领域、沉浸式虚拟现实类型等变量均存在不同的调节效应。

这篇系统综述强调了现有研究机构的差距, 并为未来的研究提出了新的途径。除了强调需要更严格的数学方法研究之外, 还应该使用其他系统性方法, 比如 DeFT 框架进行多重表示学习来进一步研究虚拟实验与真实实验的融合, 以便更系统地确定它们如何影响中小学生的科学教育过程[22]。

这篇元分析为中小学科学教师提供了教育技术发展新周期下的科学教育方法, 可以帮助对相应的课程设计提供有用信息, 并提倡用虚拟和真实的实验来协调学习, 而不是简单的用虚拟的实验来代替真实的实验。

参考文献

- [1] 顾明远. 教育大辞典[M]. 上海: 上海教育出版社, 1998.
- [2] 翟雪松, 易龙珠, 王会军, 等. Web3.0 时代“互联网 + 教育”的发展机遇与挑战[J]. 开放教育研究, 2022, 28(6): 4-11.
- [3] 李公法, 陶波, 江都, 等. 精密机械设计实验教学改革的[J]. 中国冶金教育, 2023(2): 24-26+29.
- [4] 杨秋, 刘美连, 邵明霞, 等. 虚拟现实技术在国内外护理领域中应用的研究进展[J]. 护士进修杂志, 2023, 38(7): 620-623+635.
- [5] 李治, 谢丽. STEM 教育融入我国中学物理教育研究的现状——基于 5 种中学物理教育专业期刊的分析[J]. 物理教师, 2023, 44(3): 2-5.

- [6] Ismail, I., Permanasari, A. and Setiawan, W. (2016) Stem Virtual Lab: An Alternative Practical Media to Enhance Student's Scientific Literacy. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia: Indonesian Journal of Science Education*, **5**, 239-246.
- [7] 毛耀忠, 刘旭东, 宋晓琴. 沉浸式虚拟现实对学生学习绩效的影响——基于 54 项实验和准实验研究的元分析[J]. *现代远程教育研究*, 2023, 35(1): 93-102.
- [8] 熊忠. 计算机模拟实验在物理教学中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 首都师范大学, 2007.
- [9] 林凡生. 探讨虚拟实境融入动手操作导向课程对学生“物质受热变化”学习成就及概念理解的影响[D]: [硕士学位论文]. 台湾: 国立清华大学, 2019.
- [10] 李伟. 虚拟仿真在初中物理实验教学中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中央民族大学, 2021.
- [11] 李丽芳. 虚拟实验在初中物理实验教学中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [12] 于洪涛. 桌面虚拟实验在实验教学中的作用及其应用条件[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [13] Jaakkola, T. and Nurmi, S. (2008) Fostering Elementary School Students' Understanding of Simple Electricity by Combining Simulation and Laboratory Activities. *Journal of Computer Assisted Learning*, **24**, 271-283. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2007.00259.x>
- [14] Jaakkola, T., Nurmi, S. and Veermans, K. (2011) A Comparison of Students' Conceptual Understanding of Electric Circuits in Simulation Only and Simulation-Laboratory Contexts. *Journal of Research in Science Teaching*, **48**, 71-93. <https://doi.org/10.1002/tea.20386>
- [15] Manunure, K., Delserieys, A. and Delserieys, J. (2020) The Effects of Combining Simulations and Laboratory Experiments on Zimbabwean Students' Conceptual Understanding of Electric Circuits. *Research in Science & Technological Education*, **38**, 289-307. <https://doi.org/10.1080/02635143.2019.1629407>
- [16] Riopel, M. and Smyrniou, Z. (2016) New Developments in Science and Technology Education. In: *Innovations in Science Education and Technology*, Vol. 23, Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22933-1>
- [17] Ünlü, Z.K. and Dökme, İ. (2011) The Effect of Combining Analogy-Based Simulation and Laboratory Activities on Turkish Elementary School Students' Understanding of Simple Electric Circuits. *TOJET: The Turkish Online Journal of Educational Technology*, **10**, 320-329.
- [18] Kapıcı, H.O., Akçay, H. and de Jong, T. (2019) Using Hands-On and Virtual Laboratories Alone or Together—Which Works Better for Acquiring Knowledge and Skills? *Journal of Science Education and Technology*, **28**, 231-250. <https://doi.org/10.1007/s10956-018-9762-0>
- [19] Garzón, J. and Acevedo, J. (2019) Meta-Analysis of the Impact of Augmented Reality on Students' Learning Gains. *Educational Research Review*, **27**, 244-260. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001>
- [20] 王浩, 唐爱民. 虚拟现实更能引发学生共情?——基于 19 项随机对照实验的元分析[J]. *开放教育研究*, 2023, 29(1): 60-69.
- [21] 阿岩松. 虚拟现实(VR)技术在初中物理实验中的设计及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [22] 卫旭华, 张亮花, 李黎飞. 关系型资源分配与领导地位: 有中介的调节模型[J]. *管理评论*, 2021, 33(8): 185-195.
- [23] Wörner, S., Kuhn, J. and Scheiter, K. (2022) The Best of Two Worlds: A Systematic Review on Combining Real and Virtual Experiments in Science Education. *Review of Educational Research*, **92**, 911-952. <https://doi.org/10.3102/00346543221079417>