

AI 虚拟实验室在科学教育中的应用路径与理论支撑：一项系统性文献综述

A Systematic Literature Review on Application and Theoretical Foundations of AI Virtual Laboratories in Science Education

陈田宇^{1*}, 蓝敏²

^{1, 2} 浙江师范大学教育学院

*chentianyu@zjnu.edu.cn

【摘要】 本研究聚焦于科学教育背景下, 人工智能 (AI) 与虚拟实验室的交叉领域。通过遵循 PRISMA 指南的筛选流程, 我们筛选出 8 项将 AI 融入虚拟实验室并应用于科学教育中的研究, 以探究 AI 在科学教育的虚拟实验中的应用方式及相关理论影响。研究发现 AI 在虚拟实验室中以虚拟助手、自适应评估及严肃游戏的方式出现, 对提升学生的认知水平、课堂参与程度和交互感有明显帮助。此外, 包括认知负荷理论、认知架构理论在内的认知心理类理论占据主导地位, 对相关研究有着重要影响。研究启示表明, AI 虚拟实验室有着广泛的融合空间, 教师应结合相关理论合理使用。

【关键词】 人工智能; 虚拟实验室; 科学教育; 智慧教育环境

[Abstract] This study examines the integration of artificial intelligence (AI) within virtual laboratories for science education. Through a PRISMA-guided review of eight studies, it explores how AI is applied and its theoretical impacts. Findings show AI serves as virtual assistants, adaptive assessments, and serious games, effectively enhancing students' cognition, engagement, and interaction. Cognitive psychology theories, particularly cognitive load theory and cognitive architecture theory, dominate the theoretical framework. The study suggests significant potential for further AI-virtual lab integration, recommending that educators apply these tools in theoretically informed ways.

[Keywords] Artificial Intelligence, Virtual Laboratory, Science Education, Smart Educational Environment

该项目获全国教育科学规划课题青年课题“从调节理论视角优化教师在线教学设计的行动研究”【项目号: CCA220320】资助

1. 背景

实验是科学教育重要的组成部分, 但由于实施成本高昂以及特殊学科中存在的特定问题 (Preim, B., & Saalfeld, P. (2018). A survey of virtual human anatomy education systems. *Computers & Graphics*, 71, 132-153. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2018.01.005>), 许多实验教学不便于线下开展。虚拟实验室在一定程度上改变了科学教育中实验教学的方式。区别于虚拟现实技术, 虚拟实验室是一种由技术介导的二维或三维体验, 它将学生置仿真环境中, 使学生能够通过键盘或手持控制器操控虚拟设备与材料进行实验 Reeves, S. M., & Crippen, K. J. (2021). Virtual laboratories in undergraduate science and engineering courses: a systematic review, 2009–2019. *Journal of Science Education and Technology*, 30, 16–30.。相较于传统实验室而言, 虚拟实验室访问便捷、使用成本低且环境安全有保障 (Ali et al., 2020)。Hassan, H., Martinez-Rubio, J., Perles, A., Capella, J. V., Domínguez, C. & Albaladejo, J. (2013). Smartphone-

Based Industrial Informatics Projects and Laboratories. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 和 Kozma, R. (1994). Will media influence learning? Reframing the debate. *Educational Technology Research and Development*, 42(2), 7-19. 认为, 交互式模拟或在线实验室等数字工具可以对学习者的知识、技能和态度产生积极影响 Santos, M. L. and Prudente, M. (2022). Effectiveness of Virtual Laboratories in Science Education: A Meta-Analysis. *International Journal of Information and Education Technology*. 但虚拟实验室并非总能提供一致的学习环境, 也无法保障同等程度的学生互动机会 Lynch, T., & Ghergulescu, I. (2017). Review of Virtual Labs As the Emerging Technologies for Teaching Stem Subjects. In: *INTED2017 Proceedings*, 1, 6082–6091. <https://doi.org/10.21125/inted.2017.1422>。

随着人工智能技术的兴起, 有研究者尝试将人工智能融入到科学教育的虚拟实验室中, 有效的促进了教师精力有限、无法与所有学生互动等问题的解决 Groenewald, D. E. S., Kumar, D. N., Irfan, D. S. & Yerasuri, S. (2024). Virtual Laboratories Enhanced by AI for hands-on Informatics Learning. *Journal of Informatics Education and Research*, 4(1)。但是, 这类探索尚处于初步阶段, AI 在虚拟实验室中系统性的应用方式尚待深入研究。

现有综述类研究已揭露了人工智能与虚拟实验室各自都对科学教育有着一定的影响。例如 Almasri, F. (2024). Exploring the impact of artificial intelligence in teaching and learning of science: A systematic review of empirical research. *Research in Science Education*, 54, 977–997. <https://doi.org/10.1007/s11165-024-10176-3> 的系统综述探究了人工智能在科学教育中的应用与影响, 发现 AI 工具总体上能提升学生的学习成效与参与度, 师生对其持积极态度, 但也面临技术适应性不足、表现不稳定及伦理问题等挑战。而 Reyes, R. L., Isleta, K. P., Regala, J. D., & Bialba, D. M. R. (2024). Enhancing experiential science learning with virtual labs: A narrative account of merits, challenges, and implementation strategies. *Journal of Computer Assisted Learning*, 40(6), 3167-3186. <https://doi.org/10.1111/jcal.13061> 则在一篇关于虚拟实验室赋能科学学习的综述中讨论了虚拟实验室在提升体验式科学学习方面的优势和挑战, 并得出虚拟实验室可作为传统实体实验的有效补充, 不过需通过针对性策略来克服实施障碍, 以实现其教育潜力的最大化。但这些研究只聚焦于人工智能或虚拟实验室单一技术在教育中的使用, 而对于人工智能融合虚拟实验室对科学教育的研究并未有系统的梳理 Juandi, T., Kaniawati, I., Samsudin, A. & Riza, L. S. (2024). Virtual Laboratory and Artificial Intelligence in Science Education: Bibliometric Analysis Based on Scopus Source. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*。现有研究未能清晰回答 AI 如何与虚拟实验室的教学实验环节紧紧相扣及其理论逻辑。

综上所述, 本研究旨在通过系统性文献梳理的方式将现有人工智能与虚拟实验室融合应用于科学教育的研究进行综述。本研究关注现有融合人工智能的虚拟实验室的应用层面 (即, 是什么? 怎么用?) 及其应用的理论基础 (即, 为什么这么设计?)。本研究聚焦科学教育而非广义 STEM 教育, 核心在于科学教育是 STEM 教育的核心基底与实验教学的核心载体, 且涵盖范围也比 STEM 教育更为宽泛, 研究结果的普适性更强。另外, 本研究重点关注的 AI 虚拟实验室指的是将 AI 融入虚拟实验室, 例如利用 AI 参与虚拟实验室的交互、代理、监控等功能, 而并非将二者割裂开来使用。基于此, 我们提出以下两个问题:

Q1: 在科学教育中人工智能如何应用于虚拟实验室?

Q2: 现有 AI 虚拟实验室在科学教育应用的理论基础是什么?

2. 研究设计

PRISMA 方法为研究综述提供了重要的报告指南, 我们根据该方法将本小节分为如下四个步骤: (1) 资格标准 (2) 信息来源 (3) 搜索策略及相关说明 (4) 文献筛选具体流程。

2.1 资格标准

纳入的研究聚焦中小学科学教育场景、探究 AI 与虚拟实验室融合应用的实证或设计类研究,排除仅单一探讨 AI 或虚拟实验室、非科学教育领域及无明确理论支撑的文献。

2.2 信息来源

文献相关信息主要通过 WOS、EBSCO、ProQuest 和 Scopus 四个权威数据库筛选得来。

2.3 搜索策略及相关说明

为了更高效检索出与研究有关的文献,我们将所有文献的搜索字段限制为标题和摘要。在 WOS 中由于没有“摘要”这一检索标签,我们将其搜索字段限制为“主题”。为了搜索相关文章,我们使用了三组检索词:(1)“AI”or “artificial intelligence”(2)“virtual laboratory”or“virtual labs”or“simulation laboratory”(3)“science education”。

2.4 文献筛选具体流程

基于 PRISMA 方法,本研究的论文筛选流程包括文献识别、文献筛查、纳入资格判定、最终纳入几个步骤。研究初步得到共 123 篇相关文献。通过阅读所有文献的标题和摘要部分,排除掉重复文章,并收集了文献的基本信息后对文献进行了初步筛选,共剔除了 109 篇文献,得到了 14 篇候选文章。此后我们对这 14 篇文献进行了精读,并按照二次筛选的标准,剔除 6 篇文章并最终保留了 8 篇与研究主题高度相关的文献纳入研究。

3.研究结果及讨论

文献基本信息

文献类型方面,在筛选出的 8 篇文献中,有 2 篇是设计导向的实证研究,搭建了一个高保真虚拟实验室,融入 AI 驱动的实时反馈机制并在实验中确定了虚拟平台能够增强学生的参与感。有 4 篇则是在虚拟实验室平台中加入人工智能后探索其在虚拟实验室中不同维度的有效性。在研究方法方面,有 4 篇研究是采用混合研究方法,有 2 篇研究进行了对比研究,剩余 2 篇设计导向类文章则进行了描述性研究,同样凸显了 AI 虚拟实验平台的有效性。

AI 的研究方法方面,每篇研究都包含着多种应用方式,我们的归类和编码主要依据在这篇研究中人工智能的主要或符合研究目的的表现形式,并将其表现形式基于应用类型的不同进行了分类。在筛选出的 8 篇文献中,有 3 篇文献 AI 是作为虚拟导师的角色融入虚拟实验室的。这类研究中 AI 会实时以学生进行交互,及时的回答学生的问题,同时监控学生的学习行为。有 3 篇文献 AI 是作为评估和自适应系统来使用的,这类应用的主要目标是平衡学生的学习能力和知识点及试题难度,为学生提供最适合其当前学习能力的教学。有 1 篇研究利用 AI 打造了一个虚拟游戏实验室,在这篇研究中 AI 作为纯粹的代理智能体出现与玩家角色进行对比以探究不同类型的智能体的功能。此外,有一篇研究中并未详细说明 AI 的具体用法,而是单纯将其与传统教学法进行比较来强调 AI 虚拟实验室这种新型工具的优势。

理论分析方面,本研究系统梳理分类了纳入文献的核心理论,将其归为教学法理论与原理性理论两大范畴,其中原理性理论占主导,这也反映出当前 AI 虚拟实验室领域研究更倾向于从基础认知规律层面探索其教育应用的内在逻辑。具体而言,认知心理导向理论在所有理论中占核心地位,涵盖多媒体认知理论、Atkinson-Shiffrin 记忆模型理论、最近发展区理论等,其中多媒体认知理论是 AI 虚拟实验室应用的底层支撑,因 AI 虚拟实验室均以视听觉的形式作用于学生。此外,8 篇文献中有 5 篇提及自适应学习理论,可见其对 AI 虚拟实验室的应用导向影响显著。相较之下,学科类教学理论占比最少,仅涉及 STEM 教育理论。

3.2 关于人工智能与虚拟实验室的融合

本文首先探讨了在科学教育背景下,人工智能是以何种形式融入到虚拟实验室中的。在过往的研究中,关于人工智能驱动的虚拟实验室在科学教育中的应用鲜有提及,但这更是说明了

其未来进一步融合有着无限可能。当前的人工智能已经不仅仅局限于以辅助的方式参与到虚拟实验室中了，最初，虚拟实验室被设计为物理实验室的数字复制品，但随着时间的推移，它们已经发展成为由 AI 功能增强的多方面生态系统 Groenewald, D. E. S., Kumar, D. N., Irfan, D. S. & Yerasuri, S. (2024). Virtual Laboratories Enhanced by AI for hands-on Informatics Learning. *Journal of Informatics Education and Research*, 4(1)。这也就是说，虚拟实验室和人工智能已经逐渐趋于完全融合，整个虚拟实验室都有可能成为由人工智能驱动的复杂平台，我们或许将不会在虚拟实验室中看到人工智能的痕迹，但人工智能却又始终贯穿其中，作为虚拟实验室发展的基础而存在着。

然而，如果从自我调节领域出发，纳入研究的文献中有 3 篇重视通过虚拟助手对学生的表现阶段进行监管和帮助，另有 3 篇则强调在事后反思阶段对学生的评估与调节从而对学生进行引导，综合来看缺少了对于学习开始前预思阶段的关注。换句话说，目前的 AI 虚拟实验室应用似乎在学生的学习预思阶段存在着一定程度上的技术空白与实践困难，尚未形成能够有效引导学生明确学习目标、规划探究路径、预判潜在问题的成熟解决方案。

3.2 关于 AI 虚拟实验室教学的相关理论

在目前的研究中发现，技术工具可以被视为教学工具以在不同环境中组织个人的认知和学习功能 Hassan, J., Devi, A. & Ray, B. (2022). Virtual Laboratories in Tertiary Education: Case Study Analysis by Learning Theories. *Education sciences*。例如虚拟实验室就是一种工具，想要这种工具发挥其作用，只能通过教师有目的的设计和引导学生的学习过程从而完成其学习目标。在对纳入研究的文章进行了分析后，支架式教学理论、认知负荷理论等理论的使用使得这种观点再次得到了印证。此外，建构主义理论同样为 AI 应用于科学教育中的虚拟实验室提供了可能，这要求我们以 PBL (Problem based learning 基于问题的学习) 作为基础，让教师利用包含人工智能的虚拟实验室作为客观需要来满足学生的主观发展，虚拟实验室非常适合以这种形式展开。

值得注意的是，正如前文所说绝大多数理论都是认知类理论，这的确在一定程度上证明了认知类理论在 AI 虚拟实验室教育中有着积极影响，但从另一方面来说这也意味着非认知领域的理论正在被忽视，这种理论上的失衡不仅可能限制 AI 教育环境的全面发展，也可能影响学生在真实情境中综合素养的养成。因此，在后续研究中我们有必要在推动认知类理论发展的同时聚焦其与其他理论的协同发展，以期收获更全面、更平衡的 AI 虚拟实验环境。

科学教育背景下还有更多理论影响着 AI 虚拟实验室的使用，但毫无疑问的是如果仅仅将包含人工智能的虚拟实验室作为单一工具而言基本上不会有成效，虚拟实验室通常都是要与不同的理论或模型结合才会最大限度的发挥其作用。教师可以考虑将虚拟实验室与其他著名的科学教育教学原则结合起来，以进一步最大化学生的学习收益 Santos, M. L. and Prudente, M.(2022). Effectiveness of Virtual Laboratories in Science Education: A Meta-Analysis. *International Journal of Information and Education Technology*。

4.研究局限与展望

首先，由于本研究涉及主题较为新颖，因此检索到的样本文献相对较少，但对这些文章进行了深入剖析后我们认为这些样本文献基本上已能代表该领域较为前沿的研究成果。其次，本研究聚焦于的主要场景是科学教育中的虚拟实验室，一个重要的原因是实验大多发生在科学教育中。但在研究过程中我们发现似乎在非科学教育领域也逐渐出现虚拟实验室例如考古学的虚拟考古实验室、艺术类的虚拟写生实验室等。

未来的研究中，可以将 AI 虚拟实验室的研究拓展到科学教育以外的更多领域，并尝试结合不同领域的实践特性优化 AI 交互逻辑，提升虚拟实验室的适配性与实训效能。

参考文献

- [1] Hassan, H., Martinez-Rubio, J., Perles, A., Capella, J. V., Domínguez, C. & Albaladejo, J. (2013). Smartphone-Based Industrial Informatics Projects and Laboratories. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*,9(1).
- [2] Kozma, R. (1994). Will media influence learning? Reframing the debate. *Educational Technology Research and Development*, 42(2),7-19.<https://doi.org/10.1007/bf02299087>
- [3] Juandi, T., Kaniawati, I., Samsudin, A. & Riza, L. S. (2024). Virtual Laboratory and Artificial Intelligence in Science Education: Bibliometric Analysis Based on Scopus Source. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*,59(3),129-149.<https://doi.org/10.37934/araset.60.2.103123>
- [4] Santos, M. L. and Prudente, M.(2022). Effectiveness of Virtual Laboratories in Science Education: A Meta-Analysis. *International Journal of Information and Education Technology*,12(2),150-156.<https://doi.org/10.18178/ijiet.2022.12.2.1598>
- [5] Groenewald, D. E. S., Kumar, D. N., Irfan, D. S. & Yerasuri, S. (2024). Virtual Laboratories Enhanced by AI for hands-on Informatics Learning. *Journal of Informatics Education and Research*, 4(1).<https://doi.org/10.52783/jier.v4i1.600>
- [6] Hassan, J., Devi, A. & Ray, B. (2022). Virtual Laboratories in Tertiary Education: Case Study Analysis by Learning Theories. *Education sciences*,12(8), 554. <https://doi.org/10.3390/educsci12080554>
- [7] Preim, B., & Saalfeld, P. (2018). A survey of virtual human anatomy education systems. *Computers & Graphics*, 71, 132-153. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2018.01.005>
- [8] Reeves, S. M., & Crippen, K. J. (2021). Virtual laboratories in undergraduate science and engineering courses: a systematic review, 2009–2019. *Journal of Science Education and Technology*, 30, 16–30.
- [9] Ali, N. and Ullah, S. (2020). Review to Analyze and Compare Virtual Chemistry Laboratories for Their Use in Education. *Journal of Chemical Education*, 97(10), 3563-3574. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00185>
- [10] Lynch, T., & Ghergulescu, I. (2017). Review of Virtual Labs As the Emerging Technologies for Teaching Stem Subjects. In: *INTED2017 Proceedings*, 1, 6082–6091. <https://doi.org/10.21125/inted.2017.1422>
- [11] Almasri, F. (2024). Exploring the impact of artificial intelligence in teaching and learning of science: A systematic review of empirical research. *Research in Science Education*, 54, 977–997. <https://doi.org/10.1007/s11165-024-10176-3>
- [12] Reyes, R. L., Isleta, K. P., Regala, J. D., & Bialba, D. M. R. (2024). Enhancing experiential science learning with virtual labs: A narrative account of merits, challenges, and implementation strategies. *Journal of Computer Assisted Learning*, 40(6), 3167-3186. <https://doi.org/10.1111/jcal.13061>