

融合生成式人工智能驱动的教学代理与游戏化虚拟科学探究学习环境：对科学学习成就及自我效能感的影响

Integration of GenAI-Driven Pedagogical Agents and Gamified Virtual Science Inquiry

Learning Environments: Impact on Science Learning Achievement and Self-Efficacy

张鹏^{1,2*}, 殷沛宇^{1,2}, 刘德建³, 尚俊杰^{1,2*}

¹ 北京大学教育学院学习科学实验室

² 北京大学教育学院教育技术系

³ 北京师范大学智慧学习研究院

* zhangpeng@stu.pku.edu.cn

【摘要】本研究旨在探究融合生成式人工智能(GenAI)驱动的教学代理与游戏化虚拟科学探究学习环境(GVISE)对小学生科学学习的影响。针对传统科学探究教学中个性化指导缺失与学生畏难的问题,研究设计开发《地球侦探笔记》平台,采用准实验研究法在156名五年级学生中开展课堂教学。结果显示,干预后学生的科学学习成就($t=9.673, p<.001$)与科学学习自我效能感($t=4.834, p<.001$)均呈现显著提升。研究表明,GenAI教学代理提供的适应性支持与游戏化探究环境相融合,能有效促进科学知识的习得并增强学习者的探究自信,为智能时代的科学教育提供实证支持与案例示范。

【关键词】生成式人工智能;教学代理;虚拟学习环境;探究学习;游戏化学习

Abstract: This study examines the impact of integrating a Generative AI (GenAI)-driven pedagogical agent with a Gamified Virtual Inquiry-based Science Learning Environment (GVISE) on elementary science learning. Addressing the lack of personalized guidance in traditional instruction, the "Geo-Detective Journal" platform was developed. A quasi-experimental study involving 156 fifth-graders revealed significant improvements in scientific learning achievement ($t = 9.673, p < .001$) and science learning self-efficacy ($t = 4.834, p < .001$) following the intervention. Findings suggest that combining GenAI's adaptive support with gamified inquiry effectively enhances scientific knowledge acquisition and learner self-efficacy, providing empirical support for science education in the intelligent era.

Keywords: Generative AI; Pedagogical Agent; Virtual Learning Environment; Inquiry Learning; Gamified Learning

1. 前言

探究学习是学生构建科学知识、习得科学方法并形成核心素养的关键途径(Pedaste et al., 2015; 郑永和等, 2023)。各国科学教育标准均强调,学生不应仅作为科学事实的被动接收者,而应像科学家一样经历“提出问题、收集证据、构建解释”的主动探究过程。然而,尽管探究学习在理论上具有无可比拟的优势,但在真实的小学科学课堂中,其有效实施却面临着严峻的现实挑战。首先,科学内容的抽象性与不可见性阻碍知识的深度建构。小学科学课程中包含大量如“地球内部结构”等不可见或大尺度的抽象概念。由于缺乏直观的感性经验支撑,

学生往往难以建立正确的心理模型,导致科学概念理解停留在表层,直接影响科学学习成就。其次,个性化指导的缺失容易引发学生的畏难情绪。探究是复杂的认知过程,对学生的探究能力要求极高。在大班额教学环境下,教师难以对每位学生的探究困境提供即时的诊断与支持。当学生在探究中屡受挫折且得不到及时帮助时,极易导致学生科学学习自我效能感的降低,使其对复杂的探究任务产生退缩与回避行为。

为解决上述困境,技术增强的学习环境应运而生。游戏化虚拟科学探究学习环境(GVISE)利用3D仿真与游戏化机制,为学生提供了具身化、沉浸式的探究情境,能够有效降低抽象概念的认知门槛(Lei et al., 2022)。然而,传统的虚拟环境往往缺乏智能化的交互指导,难以解决“个性化指导缺失”的问题。近年来,生成式人工智能(GenAI)的爆发,尤其是大语言模型的应用,为突破这一瓶颈提供了新契机(Liang et al., 2023)。具备自然语言理解与生成能力的“教学代理”(Pedagogical Agent)能够扮演“智能导师”角色,提供适应性的概念引导与情感支持,实现从“预设反馈”向“生成式对话”的跨越。

尽管已有研究分别关注了游戏化或AI在教育中的应用,但关于将GenAI驱动的教学代理深度嵌入游戏化探究全流程,并系统考察其对小学生科学学习成就(认知结果)与自我效能感(非认知结果)综合影响的实证研究仍相对匮乏。基于此,本研究开发《地球侦探笔记》平台,通过准实验研究,旨在回答:融合GenAI教学代理的游戏化虚拟探究环境能否有效促进小学生科学知识习得,并提升其科学学习的自我效能感?

2. 文献综述

2.1 游戏化虚拟科学探究学习环境

游戏化虚拟科学探究学习环境是指整合游戏化设计元素(如叙事、挑战、即时反馈)的计算机辅助探究系统。依据情境认知理论,知识是情境化活动的产物。GVISE通过构建高逼真的虚拟情境,使学生能够以“科学家”的身份经历完整的探究循环。Pedaste等人(2015)提出的探究阶段模型(定向、概念化、调查、结论、讨论)常被用作此类环境设计的理论框架。相关元分析表明,相较于传统教学,游戏化探究能显著提升学生的学习投入,但若缺乏有效的认知引导,丰富的游戏元素也可能导致“迷航”现象,分散学生的注意力,从而影响知识的建构效率(Lei et al., 2022)。

2.2 GenAI 教学代理

教学代理是虚拟学习环境中具有拟人化形象与教学功能的数字化角色。在传统的智能辅导系统中,代理的反应通常基于有限状态机,难以应对学生非预设的提问。GenAI的引入有益于这一问题的改善,基于大语言模型的教学代理能够理解复杂的语义输入,并生成连贯、情境化的反馈。根据Vygotsky(1978)的最近发展区理论,有效的教学支架应动态适应学生的能力水平。GenAI代理为学习者提供适应性的支架,在维持探究挑战性的同时提供必要的认知支持。正如Liang等人(2023)的研究指出,与GenAI的高质量互动能够正向预测学生的认知参与,进而提升学习成就。

2.3 科学学习自我效能感

自我效能感是指个体对自己组织和执行特定行动过程以实现预期结果的能力的信念(Bandura, 1997)。在科学教育情境中,它特指学生对自己完成探究任务、掌握科学概念的信心。Bandura指出,自我效能感主要来源于亲历的掌握经验、替代性经验、言语劝说与生理状态。其中,亲历的掌握经验是最具影响力的来源。虚拟探究环境为学生提供低风险的试错空间,学生在不断克服困难完成任务的过程中积累成功经验;同时,拟人化教学代理所提供的鼓励与肯定(社会劝说),也被认为是缓解畏难情绪、提升自我效能感的重要因素。

3. 研究方法

本研究采用准实验研究法，旨在探究融合 GenAI 教学代理的游戏化虚拟探究环境对小学生科学学习的影响。

3.1 研究对象

本研究在山东省一所公办小学开展，采用整班群体抽样方式，选取五年级 4 个自然班共 159 名学生参与。剔除无效数据后，最终有效样本为 156 人。所有班级均由同一名经验丰富的科学教师授课，每位学生配备一台平板电脑独立登录系统学习。

3.2 实验平台与材料：GVISE 与 GenAI 教学代理

实验基于游戏化虚拟科学探究学习环境《地球侦探笔记》开展。该平台以五年级小学科学“地球内部结构”为探究主题，遵循 Pedaste 等人（2015）的探究循环模型，将学习流程结构化为“定向—概念化—调查—结论—讨论”五个阶段。在该环境中，学生扮演地质博物馆志愿者，完成线索收集任务、分析地震波数据并使用线索推理构建地球模型。在游戏化设计上，系统内置积分、勋章与即时反馈机制。



图 1 游戏化虚拟科学探究环境《地球侦探笔记》地球模型构建界面

系统中内置“馆长”作为 GenAI 教学代理。该教学代理后端接入经过微调的大语言模型 API，前端以拟人化的卡通形象呈现，能够通过自然语言与学生进行多轮对话。针对小学生在探究中常遇到的认知障碍与情感困扰，基于学生的探究操作与提问内容，“馆长”被设计具备以下三项核心适应性支持功能：（1）**学习引导**：当学生在“调查”阶段面对复杂的地震波速度图谱受阻时，馆长不会直接告知答案，而是基于苏格拉底式提问策略，提示学生观察关键数据变化（如“注意纵波在地下 2900 千米处的速度发生了什么变化？”），引导其自主发现规律。（2）**概念解释**：针对学生对“岩石圈”、“软流层”等专业术语的提问，馆长能生成符合五年级学生认知水平的类比解释，辅助学生建立准确的科学概念。（3）**情感支持**：当系统检测到学生任务失败时，馆长会提供共情性的鼓励（如“这是一个很棒的问题，小探险家！”），旨在缓解学生的畏难情绪，维护其效能感。上述功能通过实验室自研的 HAPPY 提示词框架进行实现，要求馆长根据学生的探究状态与对话请求进行回答。

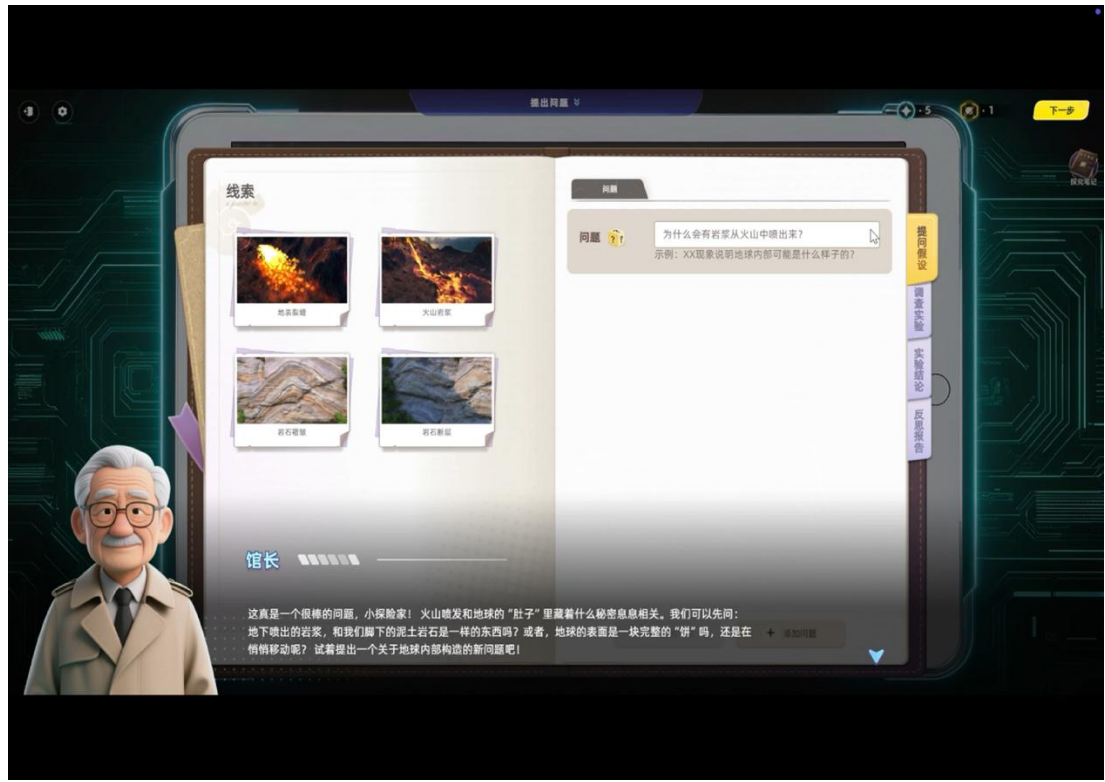


图 2 GenAI 教学代理对学生提出的研究问题进行反馈

3.3 实验程序

整体实验流程共计两课时（约 90 分钟），包括前测、干预阶段、后测三个阶段。（1）前测阶段（15 分钟）：学生完成科学探究学习问卷，获取科学学习成就与自我效能感的基线数据。（2）干预阶段（40 分钟）：学生进入《地球侦探笔记》平台。在这一阶段，学生由馆长辅助进行自主探究，经历定向、概念化、调查、结论、讨论全流程；教师主要负责维持课堂秩序与处理设备故障，不提供额外的知识讲授，以确保实验结果主要反映平台的效用。（3）后测阶段（15 分钟）：探究任务结束后，学生完成后测问卷。

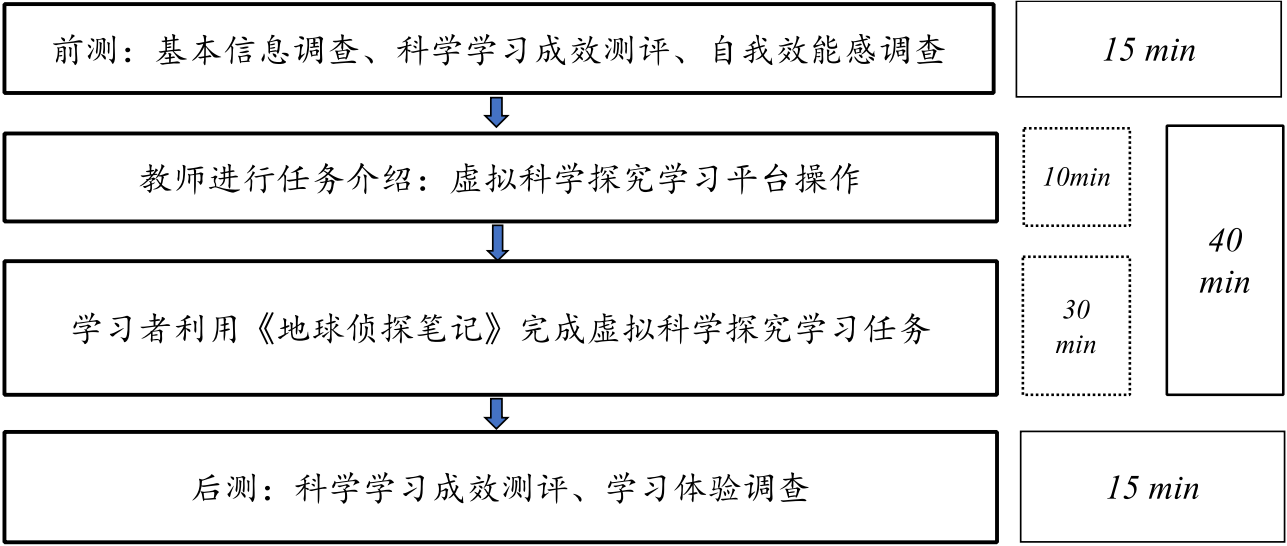


图 3 实验程序

3.4 测量工具

研究使用自制的科学学习成就试卷、改编的科学学习自我效能感量表作为测量工具。**(1) 科学学习成就测试：**该测试由 1 名具有丰富小学生科学学习研究经验的科学教育专家以及来自两所小学的 6 名一线科学教师编制，包含知识记忆、模型理解、模型创建与评价四个维度 20 道题目（选择、简答、绘图），满分 21 分。**(2) 科学学习自我效能感量表：**该量表参照 Glynn 等（2009）、Pintrich 等（1991）以及 Wang 等（2010）的经典工具编制，包含“我对掌握本课科学知识充满信心”、“我相信自己能解决探究中的难题”等 9 道题项，采用 5 点李克特计分。内部一致性分析显示，该维度在前测（Cronbach’s $\alpha = 0.909$ ）与后测（Cronbach’s $\alpha = 0.936$ ）中均表现出极高的信度。

4. 研究结果

研究数据满足正态分布假设，主要采用配对样本 t 检验来考查干预前后学生在科学学习成就与自我效能感上的差异，以探明游戏化虚拟科学探究学习环境与教学代理融合的影响。如表 1 所示，配对样本 t 检验的结果揭示了学生在实验前后的显著变化。

在科学学习成就方面，学生的后测得分显著高于前测得分。均值差异为 2.256 分（SD = 2.914），差异达到统计学高度显著水平（ $t(155) = 9.673, p < .001$ ）。说明该学习环境有益于学生开展科学探究学习，掌握地球内部圈层结构。

在科学学习自我效能感方面，数据同样显示出显著的积极变化。学生的前测平均分为 3.80（SD=0.68），后测平均分提升至 4.00（SD=0.70）。前后测均值差异为 0.200，差异具有统计学意义（ $t(155) = 4.834, p < .001$ ）。这表明，通过参与融合 GenAI 教学代理的游戏化虚拟科学探究学习，学生能够有效克服对复杂探究任务的畏难心理，显著增强自身完成科学探究任务的信念。

表 1
科学学习成就、科学学习自我效能感的前后测差异分析：配对样本 t 检验 (N = 156)

变量	前 测 M(SD)	后 测 M(SD)	t	df	Sig. (2-tailed)
科学学习成就	14.71 (4.25)	16.97 (3.89)	9.673	155	<.001***
科学学习自我效能感	3.80 (0.68)	4.00 (0.70)	4.834	155	<.001***

5. 结论

本研究旨在探讨融合 GenAI 教学代理与游戏化虚拟科学探究学习环境对小学生科学学习的影响。在本研究设计的探究活动中，学生进入《地球侦探笔记》虚拟平台，扮演科学侦探的角色，并基于 Pedaste 的探究循环模型，在 GenAI 教学代理“馆长”的引导下，经历定向、概念化、调查、结论与讨论的完整流程。有别于传统科学课堂中因缺乏个性化指导而导致的“探究迷航”或因任务难度过高而引发的“畏难情绪”，本研究通过教学代理提供适应性的认知支架与情感支持，并结合游戏化的任务奖励机制，支持学生循序渐进地建构“地球内部结构”这一抽象科学模型。

研究构建了一种整合人工智能与虚拟仿真技术的增强型科学探究机制，即通过游戏化虚拟环境提供可视化探究资源，并依托 GenAI 教学代理支持深度的认知参与。系统的设计有效融合了情境认知与最近发展区理论：一方面，利用 Web 3D 技术将不可见的地球内部构造可视化；另一方面，利用大语言模型的生成能力，实现了从“预设规则反馈”向“自然语言生成式对话”的跨越，为学生提供适应性的认知支架。这种环境设计不仅帮助教师缓解了大班额教学中无法兼顾个体差异的现实困境，更让学生在与教学代理的互动中，获得了类似专家一对一辅导的学习体验。根据 Liang 等人（2023）的研究，学生与生成式 AI 的高质量互动能正向预测其认知投入，本研究将此理论转化为具体的系统功能，促使学生从被动的知识接收者转变为主动的知识建构者。

通过对科学学习成就测试与科学学习动机量表的分析，初步验证了该学习环境的有效性。在科学学习成就方面，后测成绩显著高于前测成绩，显示融合 GenAI 教学代理的游戏化虚拟科学探究学习能有效促进学生对科学概念的理解与模型建构，这与 Lei 等人（2022）关于游戏化学习促进科学学习成就的元分析结果相符。在科学学习自我效能感方面，后测同样显著高于前测。数据表明，学生在“完成复杂探究任务的信心”与“面对困难的信念”上表现出显著提升。这一结果印证了 Bandura（1997）的自我效能感理论：游戏化探究提供的“亲历掌握经验”与教学代理“馆长”提供的“社会劝说”（及时的鼓励与肯定），共同提升学生自信心，有益于化解学生对复杂科学探究任务的畏难心理。

尽管本研究证实了融合 GenAI 教学代理的游戏化虚拟科学探究学习环境在提升科学学习成就与自我效能感方面的潜力，但仍存在部分限制。首先，本研究采用单组前后测的准实验设计，缺乏控制组的对比，且研究对象仅限于一所小学的五年级学生，样本代表性与结果推论性受限；其次，本次实验为短期干预，虽然即时效果显著，但难以评估学生知识的长期保持与迁移能力；此外，本研究主要依赖量化数据，对于教学代理如何具体影响学生认知路径的过程性机制尚缺乏细致的质性刻画。未来研究建议扩大样本规模并设置对照组，结合多模态数据（如学生与教学代理的对话日志、操作轨迹）进行学习分析，深入探讨不同先验能力的学生与 GenAI 教学代理的交互模式，以优化教学代理的适应性支持策略，从而推动生成式人工智能在基础科学教育中的精准化应用。

致谢

感谢全国教育科学规划领导小组办公室 2025 年度全国教育科学规划博士生项目“基于智能体的虚拟科学探究学习有效性与支持机制研究”（批准号：FCA250470）。

参考文献

- 郑永和, 张登博, 王莹莹, 等. (2023). 基础教育阶段的科学教育改革：需求、问题与对策. *自然辩证法研究*, 39(10), 11–17.
- Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. W.H. Freeman.
- Glynn, S. M., Taasooobshirazi, G., & Brickman, P. (2009). Science motivation questionnaire: Construct validation with nonscience majors. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(2), 127–146.
- Lei, H., Chiu, M. M., Wang, D., Wang, C., & Xie, T. (2022). Effects of game-based learning on students achievement in science: A meta-analysis. *Journal of Educational Computing Research*, 60(6), 1373–1398.

- Liang, J., Wang, L., Luo, J., Yan, Y., & Fan, C. (2023). The relationship between student interaction with generative artificial intelligence and learning achievement: Serial mediating roles of self-efficacy and cognitive engagement. *Frontiers in Psychology, 14*, 1285392.
- Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., de Jong, T., van Riesen, S. A., Kamp, E. T., ... & Tsourlidaki, E. (2015). Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational Research Review, 14*, 47–61.
- Pintrich, P. R., Smith, D. A. F., Garcia, T., & McKeachie, W. J. (1991). *A Manual for the Use of the Motivated Strategies for Learning Questionnaire (MSLQ)*. National Center for Research to Improve Postsecondary Teaching and Learning.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.
- Wang, L., & Chen, M. (2010). The effects of game strategy and preference-matching on flow experience and programming performance in game-based learning. *Innovations in Education and Teaching International, 47*(1), 39–52.