

生成式人工智能驱动化学创新教学的现状及展望

吴凌莉^{1,*}, 雷圣宾^{2,3,*}

¹西北民族大学医学部, 兰州 730000

²天津大学理学院化学系, 有机集成电路教育部重点实验室, 天津市分子光电科学重点实验室, 天津 300072

³兰州交通大学化学与化工学院, 兰州 730070

摘要: 化学是化工、材料、环境、生物、能源及药学等多个专业的基础课程, 生成式人工智能(Generative AI, GAI)的快速发展正在深刻改变化学教育的实践模式。本综述旨在聚焦生成式人工智能驱动化学创新教学这一领域, 通过分析现状探寻其发展趋势。首先从教学设计和课程建设、个性化学习路径设计、教学方法改革三大维度, 系统回顾了GAI在化学教学中的应用现状。随后, 从多模态可视化教学融合以及师生个性化学习的教学实践路径两大方面深入探讨了GAI在化学教学中的创新方法。最后, 我们客观分析了GAI驱动化学创新教学研究中的关键挑战并详细讨论了未来的发展方向, 为GAI在化学创新教学领域的深入应用提供参考。

关键词: 人工智能; 生成式人工智能; 化学教学; 教学创新

中图分类号: G64; O6

Generative AI-Driven Innovative Chemistry Teaching: Current Status and Future Prospects

Lingli Wu^{1,*}, Shengbin Lei^{2,3,*}

¹ Medical College, Northwest Minzu University, Lanzhou 730000, China.

² Department of Chemistry, School of Science, Tianjin University & Key Laboratory of Organic Integrated Circuit, Ministry of Education & Tianjin Key Laboratory of Molecular Optoelectronic Science, Tianjin 300072, China.

³ School of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China.

Abstract: Chemistry serves as a foundational discipline across multiple fields, including chemical engineering, materials science, environmental science, biology, energy, and pharmaceutical sciences. The rapid advancement of generative artificial intelligence (Generative AI, GAI) is significantly transforming the paradigm of chemistry education. This review focuses on the innovative application of GAI in chemistry teaching. We systematically examine the current status of GAI in chemistry education through three key dimensions: instructional design and curriculum development, personalized learning path design, and teaching method reform. Furthermore, we explore innovative approaches of GAI in chemistry teaching, particularly in the integration of multimodal visualization teaching and the implementation of personalized learning strategies for both teachers and students. Finally, we critically analyze the key challenges in GAI-driven innovative chemistry teaching and provide a detailed discussion on future directions, offering valuable insights for the deeper integration of GAI in chemistry education.

Key Words: Artificial intelligence; Generative artificial intelligence; Chemistry teaching; Pedagogical innovation

收稿: 2025-03-18; 录用: 2025-05-16; 网络发表: 2025-07-29

*通讯作者, Emails: wulingli19831106@163.com (吴凌莉); shengbin.lei@tju.edu.cn (雷圣宾)

基金资助: 甘肃省自然科学基金(24JRRA57)

化学是一门研究物质的组成、结构、性质及其变化规律的科学，是化工、材料、环境、生物、能源及药学等多个专业的基础课程，旨在帮助学生理解物质世界的基本原理，并掌握化学反应的机理与应用。作为众多理工科专业的核心课程，化学不仅关注理论知识的构建，还注重培养学生的实验能力、创新思维及跨学科应用能力，以推动其在材料科学、环境工程、能源化学及生物医药等领域的发展。然而，传统化学教学在实践中仍面临诸多挑战^[1]：(1) 教学资源有限，难以满足个性化需求；(2) 课程内容更新滞后，无法及时反映最新科研进展；(3) 抽象概念理解难度大，如化学反应机理、分子间相互作用等微观过程，难以通过传统教学手段直观呈现；(4) 教学方式单一，互动性不足；(5) 实验教学成本高，安全隐患大；(6) 评估方式单一，难以精准衡量学生的学习效果。

随着人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术的快速发展，特别是生成式人工智能(Generative AI, GAI)的崛起，化学教学正迎来智能化、可视化的变革^[2]。GAI基于深度神经网络(如Transformer架构)构建，代表性模型包括OpenAI的GPT (Generative Pre-trained Transformer)系列、Google的Bard、Meta的LLaMA，以及专门应用于化学领域的ChemGPT和MolGPT^[3]。这些模型能够生成文本、图像、音频、代码乃至分子结构，为化学教学提供了前所未有的智能支持，有望突破传统化学教学瓶颈^[4]。

在这一变革中，智能可视化成为推动化学教学创新的关键方向。在传统教学模式下，许多关键的化学概念，例如分子结构、化学键形成与断裂、电子轨道分布、催化反应机理等，通常依赖二维图示或理论讲解，难以呈现其真实的动态变化过程。相比于传统的教学方式，智能可视化技术结合GAI的强大生成能力，能够将抽象的化学概念转化为直观的动态模型，使学生更易理解和掌握复杂的化学过程。智能可视化不仅提供了更加生动的学习体验，还能够弥补传统课堂演示手段的局限性。目前，已有多种AI模型在化学智能可视化中发挥作用。例如：

三维动态分子建模——ChemGPT、MolGPT等AI模型能够基于分子数据生成高精度三维分子结构，帮助学生直观理解分子构型、化学键角度及空间排布等概念^[5]。

化学反应模拟与可视化——基于虚拟现实技术的沉浸式分子模拟工具(Manta)，可以精准预测化学反应的能量变化、过渡态及动力学路径，它使学生能够即时探索“真实”的分子结构和化学反应^[6]。

AI增强的沉浸式教学与实验仿真——通过增强现实(AR)与虚拟现实(VR)技术构建的虚拟实验环境，可作为传统化学实验教学的有益补充^[7,8]。这种技术手段能在确保安全性的前提下，帮助学生预习实验流程、理解反应原理，并为因设备或试剂限制而无法开展的实验提供替代方案。但需要强调的是，虚拟仿真不能完全替代实际操作，必须坚持“虚实结合”的教学原则，通过真实实验操作来强化学生的实践能力与安全意识培养。

1 人工智能在化学教学中的应用现状

近年来，AI技术在教育教学领域的不断进步促进了个性化学习、在线教育、作业辅导等方面的发展。不同于传统的基于规则或统计分析方法的AI，GAI凭借其强大的自主学习、内容生成、模式识别与交互能力，为化学教学提供了新的解决方案，催生了许多创新的探索与应用。特别是GAI能够深入挖掘化学反应数据，揭示潜在规律，优化实验条件，并在分子设计、逆合成路径分析、反应预测等方面表现出卓越能力。目前，GAI在化学教学中的应用已逐步渗透到教学设计及课程建设、个性化学习路径设计、教学方法改革等多个层面，结合当前研究与实践进展，其现状可总结如下：

在教学设计及课程建设方面，GAI作为智能备课助手，能够根据课程需求、学生背景及教育目标，定制化生成或优化教学大纲，进一步针对具体课程主题与核心教学要点自动生成或优化教案内容。如李阳等利用ChatGPT为有机化学、结构化学、计算化学和金属有机化学四门大学化学课程进行教学设计，分别生成芳香性内容的教学目标，有效提升了设计的创新性与针对性^[9]；张颖等探讨了GAI技术在生物化学教学改革中的应用，通过将GAI技术与传统生物化学理论和实验方法相结合，学生在课程中不仅加深了对基因突变及其对蛋白质结构与功能影响的理解，还通过实际科研任务培养了分析与解决问题的能力，显著提升了创新思维与实践应用能力。

在教学过程中, AI工具(如AlphaFold3和AlphaMissense)的引入, 使学生能够直观体验核酸化学与生物学相关知识在实际应用中的价值, 从而激发对学科前沿研究的浓厚兴趣^[10]。Mark Waller团队通过整合约1250万个化学反应数据, 运用深度神经网络和蒙特卡洛树搜索算法, 成功地规划出新的化学合成路线^[11]。该系统设计出一个分子的合成路线仅需5秒, 其效率远超人类化学家。该研究极大地提高了化学合成的速度, 被誉为“化学AlphaGo”^[12]; 此外, 现代化学科学的传播以数据可视化为中心, 但由于教师经验和时间限制等因素, 使得正式指导很难开展。Benjamin J. Lear^[13]报道了利用GAI克服数据可视化教学障碍的教学实践活动, 图1展示了使用ChatGPT-4创建和优化数据可视化的流程。教师上传数据后, ChatGPT-4通过自然语言指令分析数据并生成初始图表(左), 随后根据教师反馈调整设计(中), 甚至能执行高级分析任务(右)。图中示例为银纳米颗粒尺寸分布的直方图, 通过多次交互优化, 最终得到更清晰的可视化结果。该过程体现了ChatGPT-4在简化数据可视化设计中的潜力并表现出了较高的专业性。

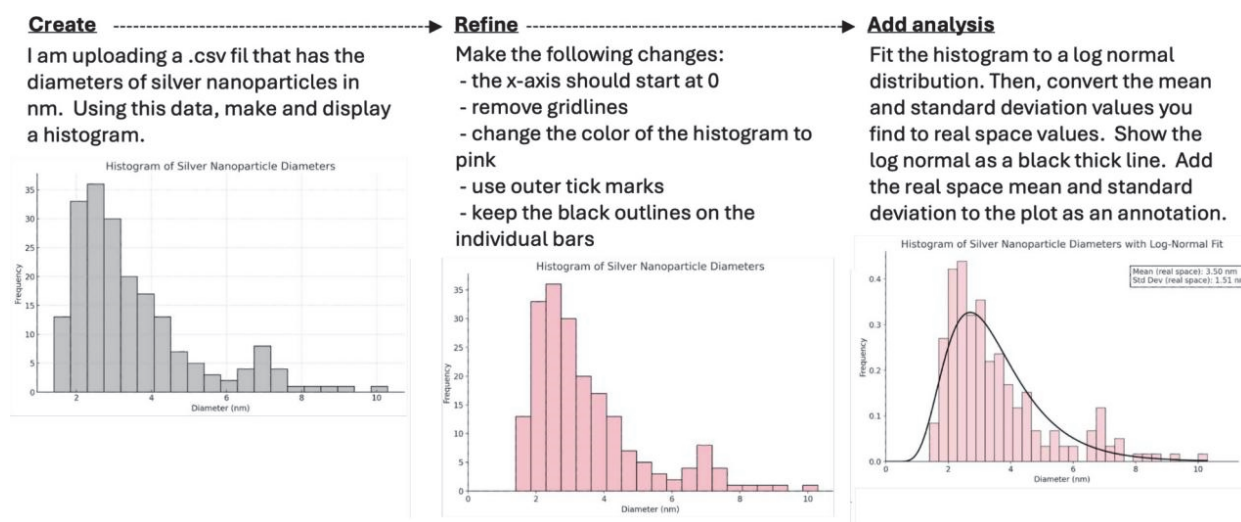


图1 通过与ChatGPT的交互来分析数据、创建并完善数据可视化的示例

其次, 在个性化学习路径设计方面, GAI作为个性化辅导工具, 可以基于学生作业反馈、课堂互动记录及测试成绩, 为教师提供详尽的学生学习状况分析报告, 帮助教师精准识别学生的学习难点与兴趣点, 从而设计出更加个性化的教学方案与辅导策略。Bruno Ramos等^[14]探讨了GAI辅助设计的项目式学习(PBL)在丰富化学工程和工业化学教育方面的应用潜力。如图2所示, 该研究构建了一个双环框架: 内环为核心活动要素(角色扮演、设备设计计算、市场调研等), 外环为培养的可迁移技能(团队合作、批判性思维等)。通过工业干燥器设计等分组任务, 该框架实现了专业技术学习与软技能发展的有机融合, 强调了学生分工协作和多样化成果(报告、演示), 突出了GAI辅助设计结构化任务对提升学生专业能力与职业素养的巨大潜力。ChatGPT辅助设计的活动大幅提升了教师的备课效率, 并且在学生欢迎度和考试得分情况上均显著高于纯人工设计的活动和常规教学实施的课程。因此, ChatGPT充当了“教学催化剂”, 促进了从传统课程到更具吸引力的主动学习环境的转变。对于学生而言, GAI不仅能够提供准确、详尽的解答, 提高学习效率, 还能根据学习进度与掌握情况, 智能推荐学习路径与资源。

此外, 在教学方法改革方面, 天津大学理学院化学系依托侯德榜化学拔尖基地, 构建了以“化学信息学与人工智能化学”课程为核心的完整教学体系。通过指导学生利用神经网络构建分子势能面(图3), 帮助他们深入理解分子内部原子间相互作用的核心原理及其实际应用价值。学生首先利用Gaussian进行量子化学计算, 获取分子几何构型及对应能量数据, 并进行标准化处理。随后, 使用

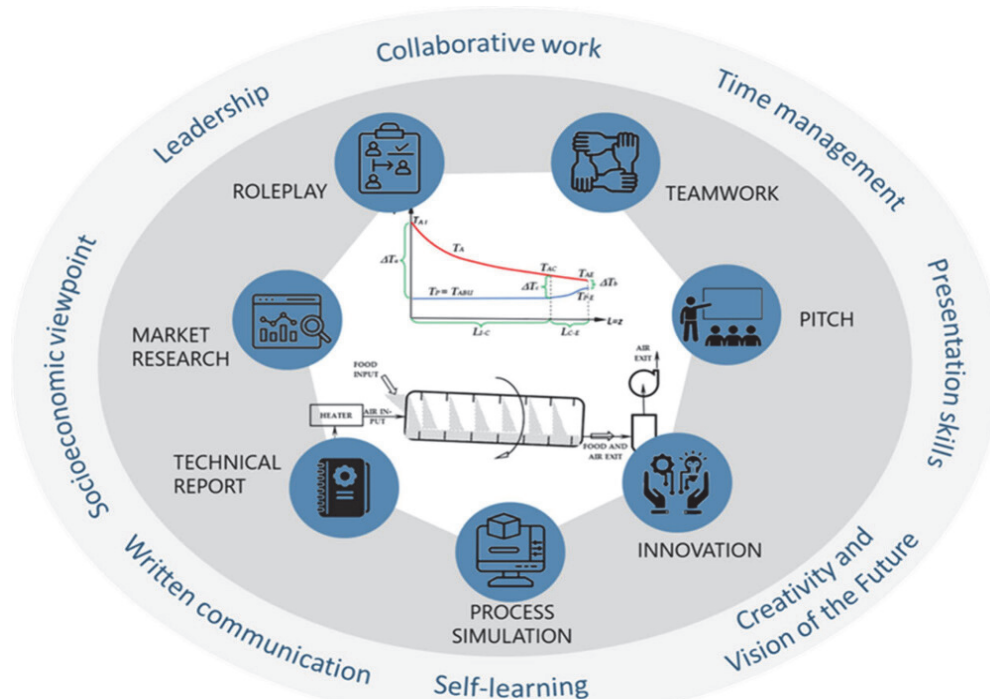


图2 ChatGPT-4辅助设计的项目式教学活动的要素(核心圈)和相关的可转移技能

PyTorch搭建神经网络模型，通过训练优化参数，并评估模型的泛化能力。最终，模型用于预测化学反应路径，验证其在复杂化学体系中的实用性。该流程帮助学生掌握从数据处理到模型应用的全过程，为量子化学研究奠定基础。此外，该课程不仅覆盖从AI基础理论到化学应用的全链条内容，还融入翻转课堂、案例分析和小组讨论等多种教学方法，全面提升学生的实践能力和跨学科思维，为GAI技术在化学教育中的综合应用提供了全新范式^[15]。另外，天津大学建立AI+化学化工平台旨在培养适应数智时代的新工科人才。探讨了人工智能与化学课程的建设方案，包括掌握机器学习原理、化学信息表示、Python编程及AI工具应用，如分子模拟和催化剂筛选，涵盖机器学习算法、分子指纹、数据库搭建及化学性质预测等内容。教学采用混合模式，结合线上资源和线下实践，依托AI+平台和高性能计算集群。初步成效显示学生积极性高，并在科研竞赛中取得成果。AI+化学化工平台的建立为学者提供了学习和交流平台，推动化学研究从传统模式向数据驱动模式转变^[16]。总之，GAI作为教学资源整合平台，搜索并筛选最新的科研成果、实验视频、3D模型等，能够帮助学生直观理解抽象概念，促进教学内容的更新与拓展。部分高校如清华大学、浙江大学开发了基于大模型的智能助教系统，支持自动出题、答疑、推理等功能，推动教学流程的智能化。

大学化学教育由于不同专业因其不同细分学科本质、特质对教学方式需求的差异性，使得人工智能技术对不同专业化学课程教学的改造和影响的形式和结果也不尽相同。在实际化学教育过程中，GAI通过精准生成个性化教学资源、整合优化优质教育资源、变革教学方法手段、设计个性化学习路径以及助力教师角色转变与专业发展等多方面的赋能，显著提升了教育教学的质量与效率。GAI驱动的化学可视化教学为学生提供了个性化学习支持，能够有效引导学生自主学习与探究性学习，更深层次地将GAI技术融入到教育中用于模拟科研场景，引导学生参与虚拟实验设计、数据分析与结果讨论，培养学生的科研思维与实践能力，这能够为未来科学研究奠定坚实基础。然而，尽管AI在教学中展现出诸多优势，但仍面临很多挑战，如误导信息的生成、过度依赖技术引发的学习惰性，以及如何更合理和深层次地将AI技术融入到教学中等问题。目前，化学教育研究者在探索将GAI融入化学教育的赛道上还处于起步状态，相关的研究较少，且其中不少研究还仅仅停留在理论论证阶

段, 仍然存在技能化、工具化、零碎化等问题^[7]。因此, 开发更全面、更实用、更智能可视化的GAI框架, 研究更有保障性的数据安全技术至关重要。未来, 随着GAI的不断发展, 它与化学教育之间的关系将变得更加可靠和亲密, 这将提高化学教学的效率、安全性和成本效益, 开创化学教育领域的新时代。

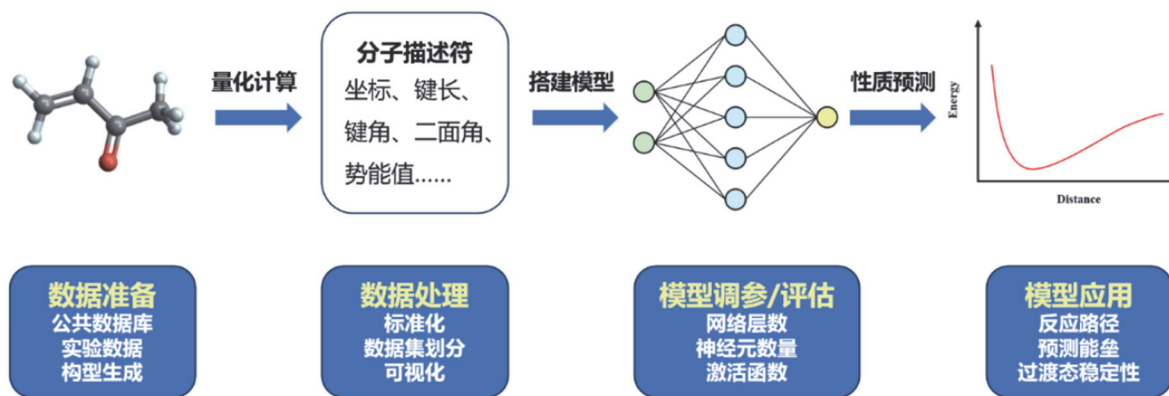


图3 基于神经网络的分子势能面构建流程

2 生成式人工智能在化学教学中的创新方法

GAI在化学教学中的创新方法主要体现在多模态可视化教学融合以及师生个性化学习的教学实践路径两大方面。多模态融合通过整合视觉、听觉等多种感官刺激, 为学生创造更加丰富和沉浸式的学习体验, 使抽象的化学概念变得直观易懂。个性化学习路径则根据学生的认知水平和知识掌握程度, 通过人工智能生成为其量身定制学习内容和策略, 满足不同学生的学习需求, 激发学生的学习积极性和使用人工智能的主动性。还可以在可视化教学过程中帮助教师优化教学方案, 提高教学效率和质量(图4)。这些创新方法共同推动了化学教学的现代化转型, 提升了教学效果和学生的化学素养。此部分主要选取GAI在化学教学中的典型案例进行介绍。

2.1 多模态可视化教学

多模态融合^[8]是指将多种信息呈现方式(如视觉、听觉、触觉等)与多种技术手段(如人工智能、增强现实(AR)和虚拟现实(VR)等)相结合, 以创造更加丰富、互动和个性化的学习体验。有研究考察了GPT-4的图像输入能力, 特别针对其在解释和解决需要图形信息的化学问题方面的功效, 重点关注其在解释化学图表、结构和表格数据方面的准确性, 以及它在化学教育中作为互动、对话教师的效用^[9]。在化学教育领域, 多模态融合正逐渐成为一种创新的教学模式, 它能够帮助学生更好地理解复杂的化学概念, 提高学习兴趣和效果, 同时也有助于教师优化教学策略, 精准把握学生的学习情况。

2.1.1 增强现实与虚拟现实在化学教学中的应用

随着增强现实(AR)和虚拟现实(VR)的进步不断重新定义教育范式, 了解它们对化学教育的独特贡献至关重要。AR和VR在多模态可视化化学教学中具有显著优势, 能够同时调动学生的视觉、听觉、触觉等多种感官, 创建高度逼真的虚拟环境, 提供个性化学习路径, 并模拟各种实验场景和操作, 避免真实实验中的安全风险, 尤其适用于高危或高成本实验的预训练。然而, AR在化学教学方面展现出优于虚拟现实的潜力。

有研究表明, 通过对比分析AR和VR在化学实验学习中的适应程度, 评估了测试前、测试后和交流三个阶段受试者的感受^[7]。这项研究共招募32名参与者进行受试者间评估。每个群体都完成了人口统计表格和知识测试, 以确保均衡的代表性。结果显示, AR和VR组在知识获取方面都有显著改善, AR和VR组在测试后阶段的知识得分都有显著提高。值得注意的是, 在测试后阶段, AR组的得

分高于VR组。此外，参与者对AR的满意度明显高于VR，这意味着对应用AR技术进行化学实验的舒适度和满意度更高(图5)。尽管如此，AR仍应作为真实实验的辅助手段，而非替代方案，化学实验教学必须坚持“虚实结合”的原则，以确保学生既能掌握实验操作技能，又能培养实际操作中的安全意识。

以南开大学有机化学实验课程为例，研究团队引入AR技术构建“分子结构-反应机理可视化平台”该平台通过Kinect体感设备与Unity 3D引擎，将有机反应中间体的三维动态模型实时投射至真实实验台，学生可手持平板设备观察亲核加成反应中电子云的迁移轨迹。这类AR技术的创新性体现在时空解耦教学，可以突破传统实验中“现象-机理分离”的困境，学生在操作实验的同时可直观看到微观反应过程，将宏观操作与微观机制实时关联。并且此平台还会进行错误预测干预：系统预设常见操作失误场景(如过量加料导致副反应)，当学生模拟错误操作时，AR界面即时弹出警示动画并解析偏差成因，错误率较传统教学降低47% ($N = 120$)。

AR技术引入有机化学实验教学中也取得不错的实际效果，学生在傅-克反应机理试题中的平均分从62%提升至89% ($p < 0.01$)且实验报告中创新性合成路线提案数量增加3.2倍。这些尖端技术的应用为化学教学方法带来诸多创新与便捷，包括提高学习成果、增强学习兴趣和动机、培养创新思维和实践能力、推动教学模式变革以及促进教育公平和资源优化。通过AR和VR技术，学生能够在更加丰富和立体的体验中深入理解化学知识，教师也能设计更多互动和个性化的教学活动，从而推动化学教学的创新和发展。

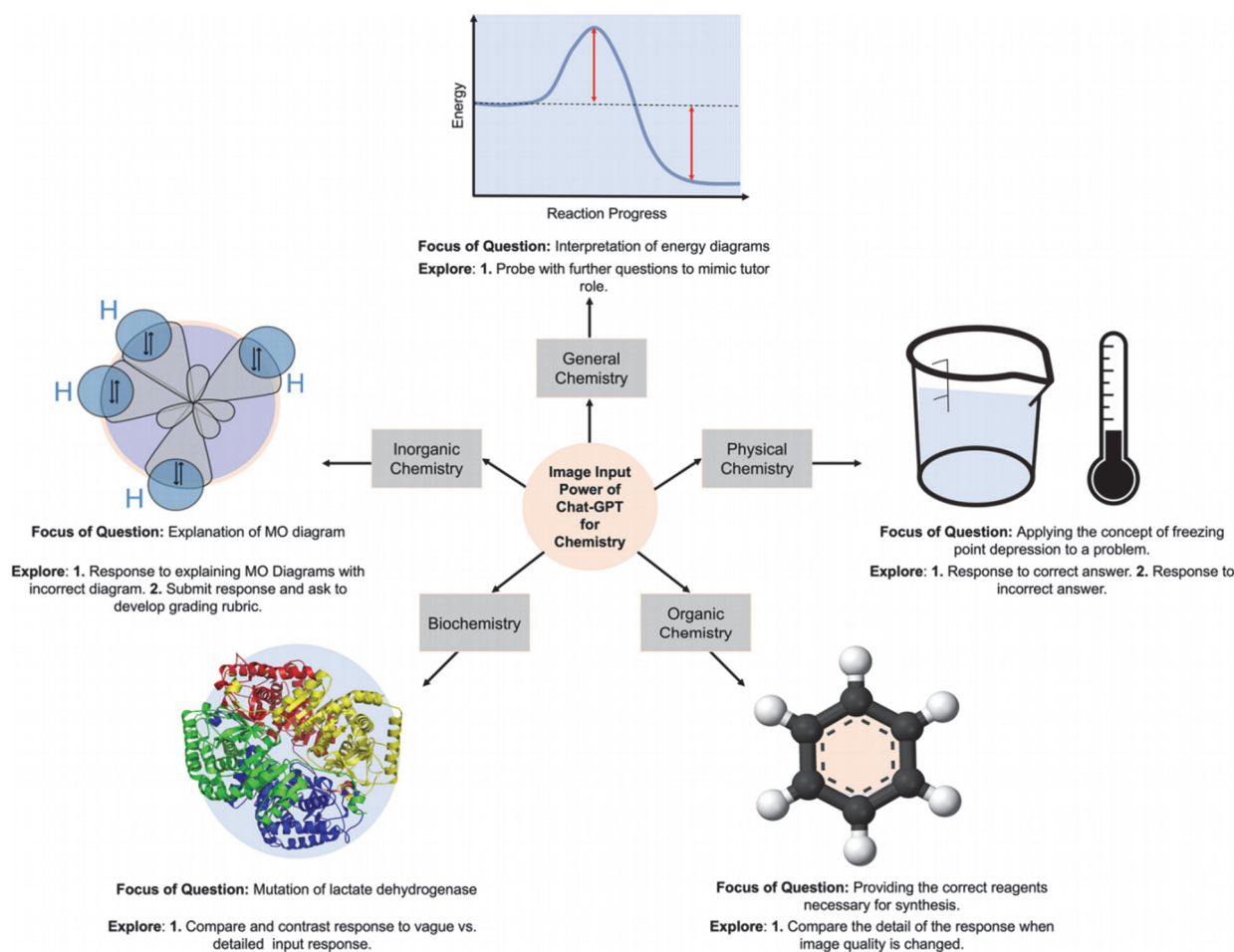


图4 GPT-4通过其视觉功能解决不同化学子领域的相关问题

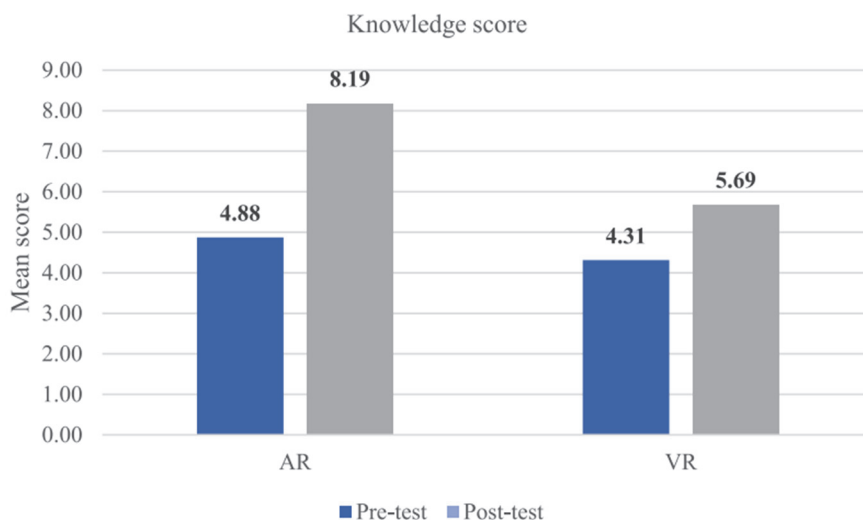


图5 AR和VR知识评分结果

AR技术能够在真实实验环境中叠加虚拟信息，使学生在熟悉的现实背景下更自然地学习和操作，减少了因完全沉浸于虚拟环境可能带来的不适感和学习曲线。因此，在未来化学教育技术的选择和应用中，应充分考虑AR技术的独特优势，探索其在更多教学场景中的应用潜力，以进一步提升化学教学的质量和效果。

2.1.2 人工智能对四大化学教学模式的创新

以有机化学实验教学为具体案例，南开大学周成卓等人，将人工智能预测模型引入教学中，选取ASKCOS模型进行正向合成预测和逆合成预测^[20]。学生可以通过输入反应物、反应试剂和溶剂等信息，利用正向预测模型来预测可能的生成物，也可通过输入合成的目标化合物，利用逆合成模型预测反应物(如图6、图7所示)。

对目标化合物进行正逆反应合成分析，可让学生知晓合成该化合物不止现有的实验方法，还能启发他们思考其他潜在的合成途径，并对不同合成方式的可行性和效率进行评估，这无疑有助于拓宽学生的思维。逆合成分析这一思路，在当前的教学实践中，已被广泛运用于探索和设计化合物的合成路径，例如在氯乙酰苯胺^[21]以及肉桂酸^[22,23]合成路线的研究中就曾得到应用。

GAI在无机化学、分析化学、物理化学教学发展中也具有诸多应用，例如AI助教助力无机化学教学^[24]，将知识图谱与AI助教应用于无机化学教学中，构建AI赋能的无机化学教学模式，对无机化学教学进行“数智化”改造，建设知识图谱，关联课程学习资源，将碎片化的资源进行重构、整合，形成清晰的课程知识点脉络及资源归纳。分析化学中利用GAI技术编写了酸碱中和滴定动态图像的代码，并据此建立了一个“实验图像代码生成+调优”的范式^[25]，深入探讨了GAI技术在酸碱中和滴定图像模拟领域的创新应用，同时为学生在化学学习过程中构建智能、交互式的学习场景等等。目前，物理化学教学模式基本是以教师PPT为主，板书为辅。通过人工智能可以实现自动生成PPT，把PPT的制作交给已经经过机器学习的人工智能。人工智能无需专门编程就能自主学习，通过“训练”，即向模型中载入大量数据，能够自动调整和改进算法，学习完成物理化学课程的教学准备工作^[26]。

除以上介绍的典型案例之外，GAI在化学学科教育各领域均有涉及并具备不错的发展前景。清华大学卢滇楠等^[27]以清华大学“化工热力学”课程人工智能助教的建设与应用为例，创新了GAI赋能特定学科课程教学的垂直模型训练与校准的方法，并以实际课堂案例验证所开发模型赋能教师教学和学生学习的的有效性。人工智能助教框架流程如图8所示，结果发现人工智能助教能够显著提高教师的备课效率与教学灵活性，并支持学生及时补齐知识短板、提出复杂问题的创造性解决方案。

2.2 生成式人工智能的教学实践路径

在化学教学中，应用GAI时，关键在于清晰地确定学习任务的要求。这不仅包括准确地界定智能模型所需解决的具体问题，还涉及明确期望的输出形式及任何适用的限制条件，确保最终输出高度符合预定目标，并能在实际教学中有效应用。例如，四川师范大学邓淞和伍晓春^[28]探讨了GAI在化学教育中的潜力，强调其能够为学生提供个性化的学习体验，增强教学效果。此外，上海交通大学发布的《上海交通大学关于在教育教学中使用AI的规范》(试行版)也指出，教师应积极探索AI赋能教育的可能性，并合理使用AI技术以提高教学质量。

在此，我们主要从学生和教师两端来探讨GAI在化学教学方面的应用与个性化课程的设计。

2.2.1 学生端：个性化学习体验的提升

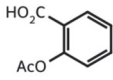
对于学生而言，GAI在化学教学中的应用主要体现在个性化学习体验的提升上。GAI能够根据学生的学习数据，如学习成绩、学习时长、答题错误类型等，绘制学生画像，精准识别学习需求。基于此，GAI可以为学生智能生成个性化的学习资源，如专项练习题、知识点讲解视频脚本或动画制作方案等，以多种形式呈现，满足不同学生的学习风格和需求。这种个性化的学习方式有助于提高学生的学习和主动性，使他们能够按照自己的节奏和方式掌握化学知识。

Rank	Product	Probability	Max. Score	Molecular Weight	Predict impurities	Predict regio-selectivities
1		0.8822	-25.943	180.0	→	→
2		0.0403	-29.030	180.0	→	→
3		0.0357	-29.150	222.1	→	→
4		0.0252	-29.497	180.0	→	→
5		0.0108	-30.350	60.0	→	→
6		0.0033	-31.528	180.0	→	→

图6 正向预测模型输入界面及正向合成结果的输出界面

INTERACTIVE PATH PLANNER ONE-STEP RETROSYNTHESIS TREE EXPLORER


Target: CC(OC1=C(C(=O)O)C=CC=C1)=O Draw



Model: template_relevance

Training Set: pistachio

SUBMIT ADVANCED



No Predictions
Begin by running a new prediction on the left!


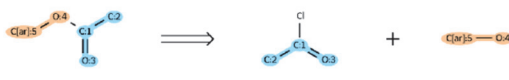



Precursor	Prediction #1	
 Plausibility 0.99 SCScore 1.5	Precursor Rank 1 Precursor Score -0.50 Template Rank 8 Template Score 0.0024 Templates: [c87ce6a7a31e63e1a50b74c1e2799e1 415f637469a320972ae1296f11f8b38b	Template: <code>[C:D1]C(=O)C(=O)C1=CC=C(C=C1)O</code> Template set: pistachio Total references: 227 
 Plausibility 1.00 SCScore 1.5	Precursor Rank 2 Precursor Score -0.71 Template Rank 9 Template Score 0.0017 Templates: 1ea821f5023d25492f9a942cd62e2615	(COPY ALL REACTION IDS)
 Plausibility 0.98 SCScore 1.5	Precursor Rank 3 Precursor Score -1.1 Template Rank 10 Template Score 0.0011 Templates: 1fd43c1df156b2bbee36dc17a7924bee e02349185fa1344c76d63e07a7078c71	
 Plausibility 0.78 SCScore 1.7	Precursor Rank 4 Precursor Score -1.7 Template Rank 11 Template Score 7.9e-4 Templates: 414a62a31b135adbfb9d0f6fb58e12e	

图7 逆合成预测模型的输入界面及逆合成结果的输出界面

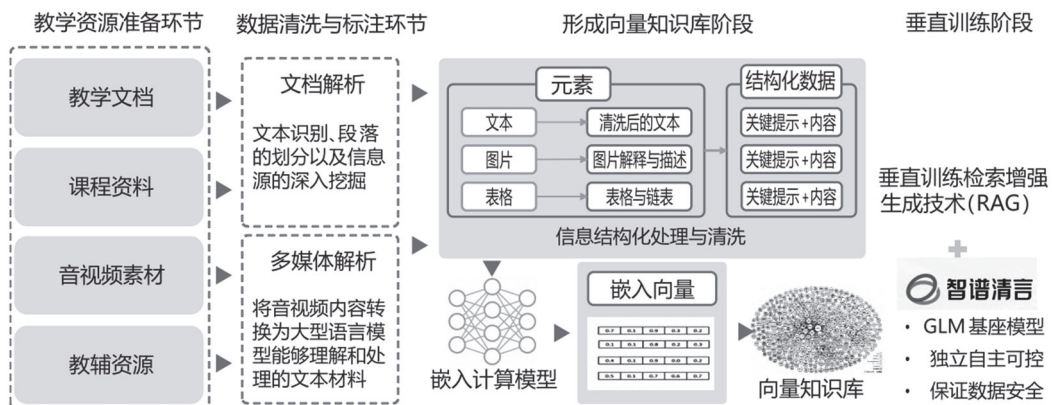


图8 化工热力学课程人工智能助教框架

GAI在化学教学中的个性化学习路径设计, 不仅依赖于初始的学习画像构建, 更需要通过持续的学习数据分析实现动态调整。以下是基于学习数据分析的动态路径调整的实现机制:

(1) 多维度学习数据的实时采集。

行为数据追踪: 通过化学学习平台嵌入的事件监听模块, 实时记录学生在虚拟实验操作中的每一步动作(如试剂添加顺序、反应条件设置)、在线测试的答题时长与修改频率, 以及资源观看的停留时间。例如, 在酸碱滴定虚拟实验中, 系统记录学生调整滴定管流速的操作频率和精准度。

社交互动数据挖掘: 分析学生在在线讨论区的发言频率、问题类型和点赞行为, 识别知识盲点。例如, 若某学生多次询问“为什么酯化反应需要浓硫酸作催化剂”, 系统标记该知识点为强化对象。

(2) 基于机器学习的路径优化算法。

知识掌握度预测模型: 基于LSTM神经网络构建知识点掌握度预测模型, 输入维度包括历史测试成绩、学习时长、资源互动深度等。当模型预测学生对化学平衡常数的理解将在下次评估中下降时, 系统自动插入强化练习模块。

学习路径的强化学习优化: 将学习路径规划视为马尔可夫决策过程, 通过Q-learning算法不断优化路径选择。例如, 当学生在有机反应机理模块的学习效率低于阈值时, 系统尝试切换教学方法(如从文本讲解转为3D反应动画), 并根据后续学习效果更新策略。

此外, GAI还可以在学习过程中为学生提供实时的答疑和指导。例如, 学生在完成作业或进行实验时, 可以通过与GAI的互动, 获得关于化学概念、实验步骤等方面的帮助。这种即时的反馈和支持能够帮助学生及时解决学习中遇到的问题, 提高学习效率。

2.2.2 教师端: 教学设计与实施的优化

对于教师而言, GAI在化学教学中的应用主要体现在教学设计与实施的优化上。GAI可以辅助教师进行教学设计, 通过分析学生的学习数据, 识别出学生在实验操作和理论知识方面的薄弱环节, 从而有针对性地设计教学内容。此外, GAI还可以帮助教师设计互动式和探究式的教学活动, 根据学生学习的反馈和互动情况, 为教师提供合适的资源和案例, 使教学活动更加贴合学生的实际需求。

在教学实施方面, GAI可以协助教师进行作业布置和评价, 根据学生的学习水平和需求, 动态生成不同层次、难度的作业, 帮助教师实现因材施教。同时, GAI还可以对学生的作业和考试进行自动批改和分析, 为教师提供详细的反馈报告, 帮助教师更好地了解学生的学习情况, 及时调整教学策略。

例如南华大学龙双双等^[29]以分析化学中“酸碱指示剂”的部分为例, 选择ChatGPT作为模型, 生成一份既侧重于知识点的阐述和实验技能的培养又强调思政元素重要性及本专业特定需求的教案。抑或是基于人工智能的化学教学设计, 以金属钠的性质为例^[30], 利用人工智能生成钠性质结构图, 围绕该结构图制定教学目标和任务。在构建钠的化学性质模块时, 根据教学目标建立相应的学习模块, 让学生参与实验过程。在实验过程中, 学生不仅能学习知识, 还能掌握操作技能。虽然这些操作技能较为基础, 但能帮助学生了解实验的程序性步骤和真实实验中的注意事项。以电解质溶液导电性为例^[31], 进行背景调研和学情分析, 通过nobook软件, 模拟电解质溶液导电性测试的实验过程, 实验结束让学生通过平台上传学习成果后, 后台自动生成学习记录、学习报告等, 帮助教师和学生更方便地评估学习效果。类似这样的GAI在化学教学中的应用实例还有很多, 不胜枚举。

2.3 总结

GAI在化学教学中展现出多方面的创新方法。它通过多模态可视化教学融合, 整合多种感官刺激和技术手段, 使抽象的化学概念变得直观易懂, 提升了学生的学习体验和效果, 同时帮助教师优化教学策略。在教学实践路径上, 它能够根据学生的学习数据提供个性化的学习资源和实时指导, 提升学生的学习体验; 还能辅助教师进行教学设计和实施的优化, 实现因材施教。例如, 人工智能预测模型引入有机化学实验教学、利用ChatGPT生成融合知识、实验与思政元素的教案, 以及通过

nobook软件模拟实验过程等应用实例，都充分展现了GAI在化学教学中的巨大潜力和多元化的创新应用。

3 生成式人工智能在化学教学发展中面临的挑战

尽管GAI在化学教学中展现出诸多优势，但其发展也面临一些挑战，主要体现在技术局限性、数据隐私安全和师生接受度三个方面。

3.1 技术局限性

(一) 模型的准确性和适应性。

GAI模型的准确性和适应性仍存在局限。例如，在预测复杂的化学反应或分子结构时，可能会出现错误或不准确的情况，这需要教师和学生具备一定的专业知识来判断和纠正。

(二) 多模态融合的深度和效果。

多模态可视化教学是GAI在化学教学中的重要应用，但目前多模态融合的深度和效果仍有待提高。不同模态之间的信息整合不够紧密，可能导致学生在学习过程中对信息的理解不够全面和准确，影响教学效果。

3.2 数据隐私安全

(一) 学生数据的保护。

在使用GAI进行个性化学习时，需要收集和分析学生的大量学习数据，如学习成绩、学习习惯等^[32,33]。这些数据涉及学生的隐私，一旦泄露可能会对学生的个人权益造成损害。例如，数据泄露可能导致身份盗用、学业歧视，甚至影响学生未来的升学或就业机会。因此，必须高度重视学生数据的收集、存储和传输过程中的安全性。为降低这些风险，可采取以下措施：(1) 端到端加密与访问控制。采用加密技术保护数据传输与存储安全，并通过严格的权限控制限制对数据的访问；(2) 本地化模型部署。将部分数据处理任务放在本地客户端完成，减少数据传输频率，从根本上降低泄露风险。

(二) 数据的合法使用和管理。

除了技术层面的安全保障，还需要规范数据的合法使用和管理。教育机构或相关技术提供商应遵循最小必要原则，明确数据采集的目的、范围、时限及使用场景，避免数据被滥用或用于其他非教育目的，确保数据的使用符合法律法规和伦理道德。为此，可从以下几个方面加强管理：(1) 建立数据使用政策和审查机制。确保所有数据使用行为都有明确记录、审计和审批流程，并可接受监管部门监督；(2) 用户知情与同意机制完善。通过清晰、易懂的隐私政策向学生及其家长说明数据使用的方式和用途，保障其选择权；(3) 制定与遵守教育数据伦理准则。如参考《人工智能伦理指南》《青少年在线保护法案》等国内外规范，制定本地适用的数据伦理规范。

3.3 师生使用和接受度

(一) 教师的技术素养和教学观念。

部分教师可能对GAI的技术操作不够熟悉，缺乏相关的技术素养，这会影响其在教学中的有效应用。此外，一些教师可能对新技术持有保守态度，更倾向于传统的教学方法，不愿意尝试和接受GAI带来的教学变革。为解决这一问题，建议从以下方面提升教师的GAI素养。

(1) 开发低门槛高适配的GAI教学工具。

构建“化学教学AI助手”网页端工具，教师只需输入课程主题(如配位化学)，系统自动整合ChemGPT、PubMed、ACS数据库资源，生成包含概念讲解动画、虚拟实验脚本、课后习题的完整教学包。例如，输入“过渡金属配合物稳定性”后，平台输出包含八面体场分裂能动画、配位场理论PPT和虚拟紫外-可见光谱模拟实验的资源包。

(2) 建立GAI教学应用的教师社区。

构建AI化学教学案例库，教师可上传基于GAI的教学创新案例，社区成员可进行评分、评论和

改编。例如，某教师上传的“利用ChatGPT设计催化反应机理辩论活动”案例，经其他教师改进后新增了基于反应能垒计算的量化评估模块。

(二) 学生的使用习惯和接受意愿。

虽然许多学生对GAI表现出积极的态度，但仍有部分学生可能对其存在抵触情绪或使用障碍。一些学生可能习惯于传统的学习方式，对与人工智能互动的学习模式不够适应，或者担心过度依赖人工智能会影响自身学习能力的培养。

人工智能的评价系统一般具有局限性。在教学中，学生的学习进展并不只是单纯地依靠对知识的掌握，还涉及情感因素和学习动机等诸多因素，在这一过程中，教师的职业判断和人文关怀是不可替代的。因此，教师仍需要结合教学经验和专业知识，持续给予学生个性化的指导与支援。

4 AI在化学教育领域的未来发展方向

随着GAI的快速发展，化学教学的可视化模式正经历深刻变革。未来的教学体系将更加智能化、个性化，并实现跨学科融合。通过优化AI算法、提升其可解释性，以及加强教师的AI素养培训，化学教育将实现更高效的知识传播与科研能力培养。

4.1 精确性与可靠性挑战

当前，GAI在化学教学中的应用仍面临一定的准确性问题，常见的“错误”类型主要包括：(1) 虚构化学物质——生成不存在的化合物名称、结构或性质数据；(2) 虚构文献与作者——在学术背景问题中，编造不存在的期刊论文、DOI、作者等；(3) 错误的反应条件或机制——给出化学反应过程或产物，但步骤不符合基本化学原理或反应热力学、动力学规律；(4) 概念混淆——混淆不同的化学原理。这些问题可能给化学教学带来潜在的不良影响，例如，削弱教师权威与教学严谨性，教师可能在不自知情况下传播错误知识；误导学生和科研人员，尤其初学者可能难以判断AI内容的真伪，形成错误的知识框架；带来学术诚信风险，虚假信息可能被学生误用于论文、实验报告，触犯学术不端红线；“工具依赖”倾向增强，学生过度依赖AI解题或完成作业，降低自主思考和查证能力。

为减轻上述风险，GAI在未来在化学教学中可以采取以下改进方向：(1) 引入权威数据库支持(如PubChem、SciFinder等)，作为内容验证的后端支持；(2) 加强模型的知识更新机制，避免使用过时或错误资料；(3) 开发化学教学专用版本GAI，设置事实校验模块，鼓励用户对AI输出进行二次验证。

建立有效的内容审核机制是保障教学质量的关键。除了依靠PubChem、SciFinder等化学数据库实时校验生成信息的准确性以外，人工审核仍是目前最直接且可靠的方式，尤其在AI生成复杂化学反应、结构式分析或学术性较强内容时，需由具备专业背景的教师或教研人员进行校对，确保内容科学性和逻辑性。因此，未来GAI在化学教育中的规范化发展应强调“AI初步生成+权威比对+人工审核”的三重机制，可以大幅降低虚构信息传播的风险，才能有效保障教学内容的正确性与学术严谨性。

4.2 AI赋能的跨学科化学教育

跨学科融合是未来化学教育的重要发展方向，而GAI将在这一过程中发挥关键作用。随着人工智能技术和教育方法的快速进步，传统的“学-研-辩-践-悟”教学模式已难以满足跨学科知识整合和快速更新的需求。因此，有必要构建跨学科智能融合创新教学模式，以培养学生的创新思维和解决复杂科研问题的能力。该教学模式强调AI与多学科知识的深度融合，构建系统化、实践性强的教学框架。例如，在基因突变研究领域，学生可结合计算机科学、生物化学和生物信息学，通过虚拟实验室和数据共享平台，探索基因突变对生物功能的影响。这一模式不仅提升了学生的跨学科思维能力，还促进了个性化和智能化教学的发展。

4.3 生成式AI与化学教学可视化的深度融合

AI的可视化能力将极大增强化学教学的直观性和互动性，推动课堂教学向更加沉浸式和智能化

的方向发展。智能可视化工具优化：AI可自动生成高精度的三维分子结构、电子云分布图以及反应动力学模拟，使抽象的化学概念更加直观可感。个性化教学支持：AI可根据学生的学习进度和理解能力，提供针对性的可视化讲解，并动态调整教学内容，以适应不同学习者的需求。

5 结语

GAI展现出的智能交互深度、个性化学习支持以及高效内容生成能力正在重构化学教学的设计逻辑与课程资源体系。本综述基于GAI驱动化学创新教学这一领域，首先概括总结了GAI在化学教育领域的研究进展。GAI通过精准生成个性化教学资源、整合优化优质教育资源、变革教学方法手段、设计个性化学习路径以及助力教师角色转变与专业发展等多方面的赋能，显著提升了教育教学的质量与效率。随后，深入探讨了GAI在化学教学中的创新方法，包括多模态可视化教学融合以及师生个性化学习的教学实践路径两大维度。GAI通过多模态可视化教学融合，整合多种感官刺激和技术手段，极大增强了化学教学的直观性和互动性，推动课堂教学向更加沉浸式和智能化的方向发展。在教学实践路径上，GAI不仅能够根据学生的学习数据提供个性化的学习资源和实时指导，提升学生的学习体验；还能辅助教师设计更加个性化的教学方案与辅导策略，实现因材施教，极大地提高了教师的教学效率。GAI的应用表现出从关注技术性能向关注学生使用的发展趋势，实现了从技术本位向学生中心的逐渐转变，反映了GAI在化学教育中的角色逐渐由单一的教学辅助工具发展为高耦合认知伙伴，其作为教师和学生的效率促进者和思维开拓者的身份日益凸显，助推教育教学场景的提质增效。尽管GAI作为一种新质生产力，在化学教育的各个领域展现出广阔的应用潜力，但化学教学因其复杂的概念结构和实验性的学习内容，要求GAI能够在更高层次上支持模型构建和实验设计的反馈，因此迫切需要针对具体学科进行深入研究和实践，深化GAI的研究层次，开发出适用于该学科的具体应用案例，积极地将最新的优质研究成果转化为实际的教育实践。这不仅有助于丰富教学资源，还能确保技术的有效性和针对性，更精准地满足不同学科的独特需求。长期而言，未来的教学体系将更加智能化、个性化，并实现跨学科融合，GAI有望彻底改变师生的教学与认知方式，最终迈向和谐共生的教育命运共同体。

参 考 文 献

- [1] 陈兰芳. 化学工程与装备, **2024**, No. 12, 169.
- [2] 吴俊明. 化学教学, **2017**, No.11, 3.
- [3] Bagal, V.; Aggarwal, R.; Vinod, P. K.; Priyakumar, U. D. *J. Chem. Inf. Model.* **2022**, *62*, 2064.
- [4] Yuriev, E.; Wink, D. J.; Holme, T. A. *J. Chem. Educ.* **2024**, *101*, 2957.
- [5] Frey, N. C.; Soklaski, R.; Axelrod, S.; Samsi, S.; Gómez-Bombarelli, R.; Coley, C. W.; Gadepally, V. *Nat Mach Intell.* **2023**, *5*, 1297.
- [6] Zhao, R.; Chu, Q.; Chen, D. *J. Chem. Educ.* **2022**, *99*, 1635.
- [7] Lam, M. C.; Majid, N. A. A.; Hassan, N. I.; Mobarak, N. N.; Tan, S. Y.; Hashim, H.; Liew, S. Y.; Soon, D.; Abidin, R. Z.; Suwadi, N. A. *Multimed Tools Appl.* **2024**, doi: 10.1007/s11042-024-20490-7
- [8] Aw, J. K.; Boellaard, K. C.; Tan, T. K.; Yap, J.; Loh, Y. P.; Colasson, B.; Blanc, É.; Lam, Y.; Fung, F. M. *J. Chem. Educ.* **2020**, *97*, 3877.
- [9] 李阳, 常富杰, 吴雪梅, 高立国. 化工高等教育, **2024**, *41* (2), 2.
- [10] 张颖, 葛芳, 罗志敏. 大学化学, **2025**, *40* (3), 278.
- [11] Segler, M. H. S.; Preuss, M.; Waller, M. P. *Nature* **2018**, *555* (7698), 604.
- [12] Burger, B.; Maffettone, P. M.; Gusev, V. V.; Aitchison, C. M.; Bai, Y.; Wang, X. Y.; Li, X. B.; Alston, B.; Li, B. Y.; Clowes, R. *Nature* **2020**, *583* (7815), 237.
- [13] Lear, B. J. *J. Chem. Educ.* **2024**, *101*, 2749.
- [14] Ramos, B.; Condotta, R. *J. Chem. Educ.* **2024**, *101*, 3246.

- [15] 朱伟钢, 王建凤, 齐强, 李婧, 张志成, 于曦. 大学化学, **2025**, *40* (9), 34.
- [16] 杜静, 于曦, 马骁飞, 赵温涛. 大学化学, **2024**, *39* (11), 66.
- [17] 钟柏昌, 刘晓凡, 杨明欢. 华东师范大学学报(教育科学版), **2024**, *42* (1), 71.
- [18] 余波, 彭琛, 刘翠. 计算机教育, **2024**, No. 4, 38.
- [19] Alasadi, E. A.; Baiz, C. R. *J. Chem. Educ.* **2024**, *101*, 2716.
- [20] 周成卓, 谢召军. 大学化学, **2025**, *40* (2), 320.
- [21] 杜欣, 姜文凤. 实验室科学, **2022**, *25* (5), 41.
- [22] 郑媛, 兰泉, 查正根. 大学化学, **2019**, *34* (6), 53.
- [23] 郑媛, 兰泉, 查正根, 李玲玲, 蒋俊, 朱平平. 大学化学, **2024**, *39* (6), 207.
- [24] 李玲, 王国成. 大学化学, **2025**, *40* (6), 1.
- [25] 秦磊, 郭凯. 大学化学, **2025**, *40* (9), 11.
- [26] 陈钰, 卢艳红, 李迪, 李桐, 匡玉彬. 中国冶金教育, **2022**, No. 1, 41.
- [27] 卢滇楠, 党漾, 王宏宁, 黎叙锐. 清华大学教育研究, **2024**, *45* (5), 89.
- [28] 邓淞, 伍晓春. 化学教育(中英文), **2024**, *45* (18), 14.
- [29] 龙双双, 刘婧靖, 王晓娟. 大学化学, **2025**, *40* (9), 25.
- [30] 黄翦. 软件导刊(教育技术), **2009**, *8* (3), 31.
- [31] 夏枫. 大学, **2024**, No. 32, 3.
- [32] 苏英慧. 化学教学, **2025**, No. 2, 94.
- [33] 黄郁郁, 王后雄. 教学与管理, **2024**, No.19, 53.