

•教学研究与改革•

“人工智能+大学化学教学”的研究图景与未来进路 ——基于CiteSpace的文献计量分析

薛家炜, 樊彦青, 李小娟, 李佳佳, 曾竞*
新疆师范大学化学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830054

摘要: 基于CiteSpace的计量分析发现, 国内“人工智能+大学化学教学”研究已形成以教学改革为核心、覆盖教学全流程的体系, 学科差异化实践进展显著; 国外研究则侧重认知建构与探究设计, 在实验室翻转教学、数据科学嵌入等方面特色鲜明。未来应加强跨学科对话, 借鉴国外经验, 构建学科适配的智能教学模型, 并开展长效实证研究, 促进学生视角下的深度融合。

关键词: 数字化转型; 高等教育; 人工智能; 化学教育; 教学改革
中图分类号: G64; O6
doi: 10.12461/PKU.DXHX202602099

Research landscape and future pathways of “artificial intelligence + university chemistry education”: a CiteSpace-based bibliometric analysis

Jiawei Xue, Yanqing Fan, Xiaojuan Li, Jiajia Li, Jing Zeng*
College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China.

Abstract: A CiteSpace-based bibliometric analysis reveals that domestic research on “artificial intelligence + university chemistry education” has established a teaching-reform-centered framework encompassing the entire instructional process, with significant advancements in discipline-specific applications. In contrast, international research prioritizes cognitive construction and inquiry design, incorporating flipped laboratories and data science integration. Future research directions should enhance interdisciplinary collaboration, leverage international insights to develop discipline-specific intelligent teaching models, conduct longitudinal empirical studies, and foster deeper educational integration from the student perspective.

Key Words: Digital transformation; Higher education; Artificial intelligence;
Chemistry education; Teaching reform

1 引言

2025年《国务院关于深入实施“人工智能+”行动的意见》明确要求将人工智能深度融入教育教

收稿: 2026-02-27; 录用: 2026-04-14

*通讯作者, Email: zengjing800111@163.com

基金资助: 新疆维吾尔自治区高校本科教学研究与改革项目(XJGXJGPTB-2024148); 第三批国家级一流本科线上线下混合式课程和新疆维吾尔自治区一流本科课程项目资助

学全要素、全过程，标志着“人工智能+教育”从理念倡导迈向规模化融合的新阶段^[1]。在战略引领与技术浪潮的双重驱动下，高等教育正经历系统性重塑，迈向人机协同、智慧赋能的新形态^[2]。

化学教育因其学科知识固有的微观性、抽象性与实践性，成为这场变革的前沿领域。人工智能不仅革新了教学工具，重构了知识呈现、传递与内化的方式，同时也为传统教学伦理与认知模式带来新挑战^[3,4]。因此，系统梳理人工智能在大学化学教学中的应用现状与实践路径，已超越单纯的技术探讨，成为智能时代创新化学育人模式、守护学科教育本质的重要课题。

以“人工智能”“教育”为主题在中国知网(CNKI)学术期刊数据库进行检索，可得到该主题下年度发文量趋势如图1所示。国内“人工智能+教育”领域研究自2016年起迅速增长，尤其在2025年后进入深度融合与本土化探索的高峰期。然而，伴随研究数量的快速扩张，该领域也呈现出明显的碎片化与表层化倾向：研究主题虽覆盖课程设计、实验模拟、评估反馈等多维度，却缺乏系统性整合与脉络梳理，难以形成清晰的发展图景^[5]；多数成果仍停留在技术介绍与案例描述层面，与实现人工智能全要素、全过程深度融合的宏观目标之间存在显著落差^[6]。

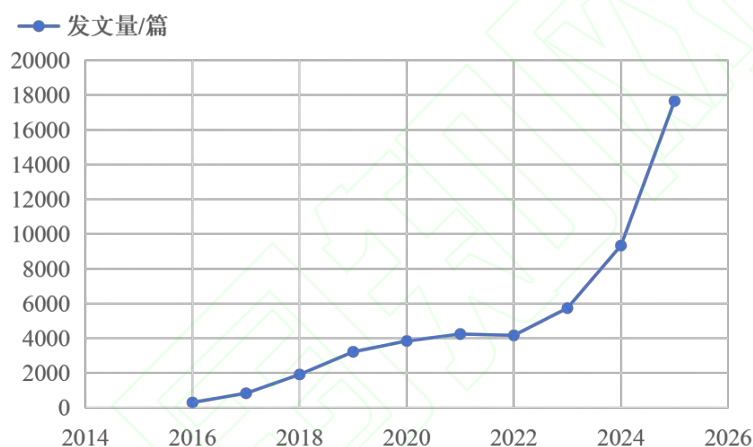


图1 2016–2025年“人工智能”+“教育”主题知网发文量趋势

为回应上述问题，本文运用CiteSpace科学知识图谱工具，对“人工智能+化学+高等教育”主题研究进行聚类分析，旨在揭示该领域的知识结构、研究热点与演进趋势，并结合国外研究进展探讨未来进路。本研究将文献计量分析与学科教学理论相结合，力求为学术研究与一线教学实践之间的有效衔接提供学理参照。

2 数据来源与研究方法

为保证研究的时效性与聚焦性，本研究以中国知网(CNKI)学术期刊数据库为核心数据源，采用高级检索功能，以“人工智能”、“化学”和“高等教育”为主题进行精确检索。检索时间范围设定为2023年1月1日至2025年12月31日，以捕捉“人工智能+”战略提出后最新的研究动态。初步检索后，通过人工审阅标题与摘要，剔除与大学化学教学无关以及仅泛论技术的文献，最终获得116篇有效文献作为本研究的分析样本。

本研究主要采用文献计量法与科学知识图谱法，运用CiteSpace 6.3.R1软件进行可视化分析。通过对样本文献的关键词进行共现分析、聚类分析，识别该领域的核心研究主题群落及其内在关联，从而系统、客观地揭示研究现状、热点与结构。

3 结果与分析

本文遵循从宏观结构到具体维度的逻辑展开：首先通过聚类图谱揭示该领域的知识结构与整体

特征；进而从育人理念与价值、教学路径、学科差异化应用三个维度详细呈现国内研究的进展与典型案例；最后通过国内外对比，批判性审视该领域存在的“碎片化”与“表层化”倾向，以及其与“全要素、全过程”深度融合目标之间的现实差距。

3.1 知识结构聚类分析

关键词聚类分析生成了以“教学改革”为核心，包含“化学教育”“智慧课堂”“教学实践”“分析化学”“生物化学”“绿色化学”及“课程思政”等八个主要聚类图谱(图2)。该结构直观揭示了领域研究的多维度特征。



图2 “人工智能+化学+高等教育”关键词聚类分析

一方面，一个以“教学改革”为共同目标的初步框架已然显现。“教学改革”节点处于网络中心且连接广泛，表明技术赋能教学革新是绝大多数研究的终极指向。“化学教育”作为平行核心，与“课程思政”聚类形成呼应，体现了研究者在追求技术效用的同时，对学科本质与育人价值的兼顾。而“智慧课堂”“教学实践”与各分支学科聚类的存在，则证实了探索已覆盖从理念、路径到具体场景的多个层面。

另一方面，图谱也暴露了当前研究核心聚拢与边缘分散并存的困境。首先，“化学教育”作为一个宽泛的顶层聚类占据显著位置，说明大量研究仍停留在探讨“能否结合”或“如何初步结合”的通用层面，尚未深入化学学科特有的认知内核。其次，各分支学科聚类(如#4分析化学、#6生物化学)与核心聚类“教学改革”之间的连接线条相对稀疏且微弱。这表明针对不同化学二级学科的人工智能应用探索，大多仍是彼此孤立的点状尝试，尚未与教学改革主体通过理论或实践桥梁形成强关联。这种知识结构印证了研究在整体上处于“碎片化”状态，零散的案例创新难以汇聚成推动学科教学体系变革的合力。

3.2 国内研究进展

3.2.1 育人理念与价值导向

对“教学改革”“化学教育”“课程思政”“绿色化学”等聚类文献的梳理发现，当前研究在育人理念与价值导向上已形成基本共识，即人工智能应服务于学生综合素养促进与高阶能力发展，并自觉融入“课程思政”以实现价值引领。

人工智能在化学教学中有力支撑了学生高阶思维的发展。齐记等^[7]利用DeepSeek辅助量子化学课程，学生在计算方案制定、错误调试与结果解析的人机多轮对话中，培养了计算思维与系统性问

题解决能力。杨旭东等^[8]尝试构建基于知识图谱的生物化学智能课程,通过可视化知识网络与AI陪练,帮助学生自主建立“物质组成-代谢调控-生命现象”的关联框架,从而构建整体知识体系。李荣金等^[9]在物理化学课程中融合费曼学习法与生成式AI,以“学生-同伴-AI-教师”协同课堂推动“讲中学”,将AI定义为“思维训练工具”,强化学生元认知监控与学科表达能力。孔德明^[10]在仪器分析课程中以“小视频创作+双评机制”替代传统论文考核,要求学生独立完成脚本设计、实拍、配音与剪辑,保障了学生的深度思维参与。上述实践表明,人工智能在发挥辅助优势的同时,教师也需警惕学生过分依赖人工智能而削弱自主思考,可通过任务设计防范认知风险,使其真正服务于高阶思维发展。

此外,人工智能还常服务于教学内容与思政元素的融合渗透,它为课程思政提供了精准化、场景化的技术与素材支撑。刘雪莹等^[11]在基础化学课程中利用人工智能平台推送思政微视频、前沿案例及社会热点素材,并在各章节(如原子结构、配位化合物、电化学分析等)系统嵌入融合科学家精神、环保责任与家国情怀的思政元素。董惠馨等^[12]在无机化学课程中借助学生画像技术动态分析学情,精准推送科学家事迹与涉及绿色化学、传统文化的思政素材,同时利用虚拟仿真手段将思政教育融入实验规范与生态理念培养,实现了思政内容的个性化渗透。姜兆玉等^[13]依托人工智能构建思政资源库,于蛋白质化学、核酸结构、酶催化、基因编辑等知识点教学中融入科学家精神、科学伦理与社会责任等议题,并通过智能辅导系统记录学生的思政表现,形成多维度评价反馈。人工智能不仅提升了思政素材的推送效率与匹配精度,更推动了思政教育从附加“说教”向价值建构的转变。

当前研究仍以短期案例为主,缺乏对学生高阶思维发展轨迹的长周期追踪,也缺少思政价值内化的可量化评价体系,且对不同化学二级学科认知特征的差异性关注不足,存在“一刀切”倾向;未来需转向机制研究,重点构建融合过程性数据的AI教学长周期评价模型、面向不同学科认知特征的适配框架,以及人机协同下元认知能力保持的临界条件与干预策略。

3.2.2 教学路径与技术框架

“智慧课堂”与“教学实践”聚类下的文献表明,当前人工智能在大学化学教学中的应用已形成两条不依赖于特定学科内容的通用技术路径。这些路径为后续的学科差异化探索提供了基础框架。

在教学流程层面,研究者普遍构建了覆盖“课前-课中-课后”全环节的混合式教学模式。武文娜等^[14]从教师与学生两方面出发,在备课、教学、答疑、学情分析等各个教学环节中融入AI助教,实现了“课前预习-课堂互动-课后巩固”的教学流程智能闭环。在教学角色层面,传统的“师-生”二元互动被拓展为“师-生-机”三元交互模式,教师可通过知识图谱与AI助教实现资源精准匹配与学情动态诊断^[15]。在以上路径的基础上,AI助教成为支撑个性化学习的主流工具,能够提供全天候答疑、学情分析与学习导航等服务^[16-18]。此外,借助生成式人工智能将科研前沿成果转化为教学素材,引导学生追踪学科热点,也是被广泛采用的做法^[19,20]。

上述两条路径为人工智能融入化学教学提供了可迁移的操作范式。然而它们主要聚焦于教学组织形式的优化,尚未深入不同化学二级学科的独特认知规律。要实现从“技术辅助”到“学科重构”的跨越,还需进一步探索面向特定课程特质的差异化应用。

3.2.3 面向不同化学二级学科的差异化应用

聚焦于“分析化学”“生物化学”等聚类,以及有机化学、无机化学、物理化学等二级学科课程,可以发现人工智能的应用呈现出显著的学科特质性。不同课程因其知识结构的固有差异,形成了各自适配的技术应用模式。

(1) 分析化学:数据驱动的智能分析助手

分析化学课程数据密集,涉及大量谱图解析与定量计算,传统教学中学生常因数据处理负担过重而难以聚焦原理理解。因此,人工智能主要被定位为智能分析助手,致力于实现谱图批量解析、信号自动识别与教学评价的精准化。蒋浩阳等^[21]开发了集成人工智能的气相色谱教学系统,实现谱图批量解析与智能评价,有效解决了传统实验反馈滞后的痛点;胡宇芳等^[22]将人工智能引入《化学

与生物传感器》课程，辅助学生处理传感器采集的复杂非线性数据。这类应用的核心价值在于将师生从重复性劳动中解放出来，提升数据密集型教学环节的效率与质量。

(2) 生物化学：微观过程的可视化与认知支架

生物化学知识体系具有高度的微观性、关联性与动态性，人工智能主要扮演微观过程可视化与复杂机制交互解析的角色，以化解知识高度抽象的认知障碍。张伟娜等^[23]在糖酵解教学中综合运用人工智能生成思维导图、借助虚拟仿真平台模拟动态过程，构建沉浸式学习体验；张颖等^[24]聚焦“AI预测基因突变的功能效应”这一前沿课题，引入AlphaMissense、DeepSequence等工具，让学生在“突变-结构-预测-验证”的逻辑链条中掌握完整科研流程。

(3) 有机化学与无机化学：虚拟仿真与合成路线优化

有机化学和无机化学同样积累了丰富的AI应用案例。在有机化学中，李瑞歌等^[25]系统探讨了虚拟仿真、AI个性化教学、增强现实(AR)及移动学习平台的融合应用，指出AR技术可将分子结构与反应机制以三维可视化形式呈现，显著提升学生对抽象概念的理解；李洪昕等^[26]利用在线虚拟仿真实验室模拟实验降低安全风险与成本，并利用人工智能预测最佳合成路线。在无机化学中，桑晓光等^[27]搭建了AI课程平台，通过知识图谱、24小时智能学伴与AI讲伴，实现知识点、教材、视频、习题的有效衔接；刘淼等^[28]介绍了无机材料数据库在判断热力学稳定性、推测化学反应路径及辅助人工智能物性预测方面的应用路径。

(4) 物理化学：抽象概念的计算辅助与可视化

物理化学课程理论性强、计算繁琐，研究者普遍利用人工智能辅助学生拆解抽象概念并替代重复性计算。周维磊等^[29]在“卡诺循环”教学中借助AI编写MATLAB程序，学生仅需输入参数即可实时获得图像，将精力从繁琐运算转向数据分析；齐记等^[7]与周佳等^[30]分别在量子化学课程中引入生成式人工智能，通过人机交互完成计算方案制定、错误调试与结果解析，显著降低专业软件的使用门槛。这些应用均尝试利用AI承担低阶认知负荷，使学生得以聚焦学科本质问题的深度思考。

(5) 实践课堂中的智能辅助

在实践性较强的课程中，人工智能的应用呈现多样化形态。在工程实践类教学中，AI辅助教师将真实产业问题转化为可模拟、可预测的教学任务。杜静等^[31]以蒽醌法制过氧化氢为例，要求学生收集数据、构建数据库、训练模型预测产率，并完成实验验证；高明亮等^[32]在中药化学实验中设立产业真实情境，让学生借助AI完成从文献调研到结果汇报的全流程；李婧男等^[33]以炼钢厂废水治理为原型，利用虚拟仿真与AI辅助平台完成方案量化评分。

在基础实验课程中，多位学者开发了智能判断与反馈系统。郭小峰^[34]和王月娇等^[35]开发了基于颜色识别的智能滴定系统，自动判断滴定终点；畅正轩等^[36]构建红外光谱AI识别与多智能体协同系统，解决了谱图解读依赖过度教师经验的问题；郑州大学化学学院将计算机视觉融入沉淀法制备二氧化硅、晶体溶解动力学等实验，实现自动识别^[37]；王金龙等^[38]开发的ChemScore预评分系统可对实验数据进行自动评分与可视化；邵松雪等^[39]构建实验报告智能评分系统，结合大模型实现多模态内容识别与个性化反馈，使批改时间缩短70%。

3.3 国内外研究的对比分析

通过对比同期国外研究可以发现，国内外学者在“人工智能+大学化学教学”领域呈现出不同的研究取向与重心。

育人理念与价值导向方面，国内研究强调人工智能应服务于课程思政与价值引领，将科学家精神、家国情怀、生态伦理等思政元素有机融入智能教学平台与资源推送，形成了鲜明的价值建构导向。相比之下，国外研究虽同样关注学生综合素养的发展，但更侧重于认知层面的基本原则与伦理反思。例如Cooper^[40]提出了一套支持学习的生成式人工智能应用原则体系，主张教学设计应支持自我调节学习、奖励学习过程，并警惕AI绕过认知加工导致批判性思维弱化。目前国内研究中尚缺乏类似系统化的理论建构，更多聚焦于具体技术应用而非学习科学层面的顶层设计。

教学实践路径方面, 国内研究已形成覆盖“课前-课中-课后”全流程的混合式教学框架, 呈现出从通用框架向学科适配的系统性演进。国外研究则更多将人工智能塑造为“认知伙伴”与“学习对象”, 强调学生在与AI的互动中亲历科学探究过程。例如Correia等^[41]提出AI支持实验室翻转教学模式, 通过前置理论学习、决策点设计与反思报告弥合理论与实践之间的鸿沟。Green等^[42]开发的本科实验课程, 将学科知识与K近邻分析、K-中位数聚类等数据科学工具结合, 让学生理解机器学习在化学功能预测中的应用。Oh等^[43]将AI语音识别融入经典的二氧化碳喷泉实验, 学生通过“编码、制作和整合AI”亲历从硬件搭建到软件调用的完整探究过程。总体而言, 国内研究在教学全流程的系统性与技术整合的广域上优势明显, 而国外研究更注重将AI作为认知工具嵌入具体的探究任务, 强调学生的主动建构与数据科学素养培养。

学科差异化应用方面, 国内研究已针对不同化学二级学科积累了丰富的案例, 但整体呈现点状分布, 尚未形成系统化的学科适配理论。国外研究同样呈现鲜明的学科特色, 例如Fu等^[44]将核酸技术应用生物化学教学、Loch等^[45]借助AR分子模型开展有机化学可视化教学、Wang等^[46]利用虚拟实验提升高分子科学中的自我效能感, 以及Gong等^[47]通过ChemReactSeek辅助催化加氢反应方案设计等。以上研究均体现了学科特色与教学方法的深度结合。

综上所述, 国内外研究各有侧重, 互补性强。国内研究在系统化教学流程、课程思政融合与技术落地的广度上具有突出优势; 国外研究则在认知原则建构、探究任务设计与AI素养直接培养上更为深入。未来可借鉴国外在翻转实验室、数据科学嵌入及学习科学指导原则方面的经验, 同时发挥国内在教学全流程覆盖与价值引领上的特色, 推动人工智能与化学教育的双向赋能。

4 结论与展望

4.1 研究结论

本研究通过CiteSpace知识图谱分析, 系统梳理了2023–2025年“人工智能+大学化学教学”领域的研究图景。主要结论如下:

第一, 国内研究已形成以“教学改革”为核心、覆盖理论课程与实践课程的差异化应用格局。在育人理念上, 人工智能服务于高阶思维发展与课程思政融入已形成共识; 在教学路径上, “课前-课中-课后”全流程混合式教学模式趋于成熟; 在学科应用上, 分析化学、生物化学、有机化学等课程依据知识结构特征分别形成了数据自动化、可视化模拟、认知支架等适配路径。

第二, 当前研究仍存在显著的“点状分布”与“表层化”倾向。各分支学科的应用探索彼此孤立, 尚未整合为驱动化学教育整体变革的协同力量; 多数实践停留于利用人工智能优化既有教学环节, 而基于化学学科独特认知规律重构教学目标、内容与评价体系的范式创新尚处起步阶段。

第三, 国内外研究各有侧重。国内在系统化教学流程、课程思政融合与技术落地广度上优势突出; 国外则在认知原则建构、探究任务设计及人工智能素养培养上更为深入, 其实验室翻转教学、数据科学嵌入教学等经验值得借鉴。

4.2 未来展望

为推动“人工智能+化学教育”从广泛探索走向高质量发展, 实现从效率提升到范式创新的关键跃迁, 后续研究可在以下方向进行深化与拓展:

一是深化理论融合, 探索学科特色的智能教育模型。未来研究可加强教育学、化学与信息科学的跨学科对话与合作, 共同构建根植于化学学科本质的智能教学理论。重点探索如何利用人工智能特性, 深度支持化学学习中的宏观-微观-符号表征转换、复杂系统建模与实验探究过程, 发展出具有高学科辨识度的智能教学法与评价体系。

二是推动系统设计, 实现从课程单点教学体系的智能化升级。鼓励超越对单点教学环节的技术优化, 开展以人工智能为核心赋能的课程整体重构。这包括系统性设计智能技术支撑下的项目式、探究式学习路径, 重新思考课程知识图谱与能力架构, 推动教学目标向培养复杂问题解决能力和创

新思维的方向深化。

三是夯实实证基础,开展严谨、长期的效果评估研究。倡导采用设计性研究、纵向追踪等多元方法,扩大研究样本与周期,不仅关注人工智能对知识掌握的影响,更重视其对学科思维、实践能力、科学态度等核心素养的长期效用评估,为教学创新提供更为坚实、全面的证据支持。

四是回归学生视角,关注学习者的真实需求与认知体验。当前研究多从教师“教”的角度出发探讨人工智能如何辅助教学,而对学生“学”的视角关注不足。未来研究应深入探究学生在AI赋能学习环境中的真实需求与认知体验。一方面关注学生使用AI时的认知参与度,保证其在利用AI提升效率的同时维持自身认知的深度参与;另一方面应关注学生对AI赋能学习的情感体验与态度变化,了解他们在人机协作学习中的困惑、期待与需求,为构建更具包容性和适应性的智能学习环境提供依据。

通过以上方向的持续探索,有望将人工智能从强大的辅助工具,进一步转化为深化化学学科育人价值、重塑未来学习体验的内在催化剂,从而为培养适应智能时代的卓越化学人才开辟切实可行的新路径。

参 考 文 献

- [1] 郑新. 电化教育研究, 2026, 47 (1), 15.
- [2] 吴砥. 冯倩怡, 华中师范大学学报(人文社会科学版), 2025, 64 (6), 136.
- [3] 赵卫光. 化学教育(中英文), 2025, 46 (18), 1.
- [4] 洪玲. 电化教育研究, 2025, 46 (5), 19.
- [5] 付晓萍, 李凌飞, 高斌, 范江平. 现代农业科技, 2025, 902 (24), 214.
- [6] 教育部等五部门关于印发《普通高等教育学科专业设置调整优化改革方案》的通知.
[2026-02-20]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202304/t20230404_1054230.html?eqid=d6976592000a9908000000004643e7ae5
- [7] 齐记, 刘志强, 郑安民. 化工高等教育, 2025, 42 (6), 75.
- [8] 杨旭东, 蒋晓刚, 闫小飞, 郑芳, 赵悦, 李冬民. 中国医学教育技术, 2025, 39 (6), 753.
- [9] 李荣金, 朱荣娇, 陈丽, 冯霞, 刘俊吉. 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202511130
- [10] 孔德明. 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202508106
- [11] 刘雪莹, 夏亚钊, 刘艳艳, 邹明静, 李刚, 王英玲. 化工设计通讯, 2025, 51 (10), 72.
- [12] 董惠馨, 周振垒, 邹雯欣, 金娟, 刘希光, 牛余忠, 祝丽荔, 姜华, 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202505003
- [13] 姜兆玉, 余君彤, 郝冬梅. 高教学刊, 2025, 11 (10), 14.
- [14] 武文娜, 张涛, 何涛, 冯凯, 韩艳扬, 刘珊珊, 柳华杰, 李庆忠, 杨昕. 大学化学, 2025, 40 (9), 251.
- [15] 朱荣娇, 冯霞, 孙艳, 刘俊吉, 陈丽, 李荣金, 王玉新, 孙雅静, 杨方旭. 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202508068
- [16] 李玲. 大学化学, 2025, 40 (9), 82.
- [17] 刘宸宇, 张海晨, 乔卫红. 化工高等教育, 2026, 43 (1), 32.
- [18] 梁希壮, 仝凤霞. 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202510086
- [19] 马亚鲁, 田昀, 马骁飞. 大学化学, 2025, 40 (9), 177.
- [20] 张丹维. 大学化学, 2025, 40 (12), 168.
- [21] 蒋浩阳, 畅正轩, 赵卫光. 化学教育(中英文), 2025, 46 (24), 53.
- [22] 胡宇芳, 王邃, 谢洪珍. 广东化工, 2025, 52 (18), 171.
- [23] 张伟娜, 刘军和, 李云, 梁思佳. 教育教学论坛, 2025, 731 (24), 177.

- [24] 张颖, 葛芳, 罗志敏. 大学化学, 2025, 40 (3), 277.
- [25] 李瑞歌, 吕东灿, 高光芹, 许家喜, 申文波. 大学化学, 2025, 40 (2), 159.
- [26] 李洪昕, 杨永林, 何江永, 拓巧艳, 师瑞. 基于AI赋能的高校有机化学教学策略探究//2025年高等教育发展论坛科教分论坛论文集(上册). 2025年高等教育发展论坛科教分论坛, 河南郑州, 2025年9月3日. 河南, 2025: 107.
- [27] 桑晓光, 王锦霞, 冯钟敏, 郑伟, 张霞. 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202506026
- [28] 刘淼, 孟胜. 中国科学: 化学, 2023, 53 (1), 19.
- [29] 周维磊, 韩赫, 陈湧, 许秀芳. 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202509062
- [30] 周佳, 潘永龙. 化学教育(中英文), 2025, 46 (12), 97.
- [31] 杜静, 万林, 李正阳, 张志坤, 任相伟, 闫传滨. 实验室研究与探索, 2025, 44 (10), 124.
- [32] 高明亮, 周桂生, 陈佩东. 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202507064
- [33] 李婧男, 汪群慧, 马梦莹, 宋娜, 舒敬荣, 任梦, 李明雨. 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202507110
- [34] 郭小峰, 张永策, 施治国, 齐悦, 丁琼, 赵发琼. 化学教育(中英文), 2025, 46 (20), 93.
- [35] 王月娇, 毛全兴, 崔俊硕, 冯小庚, 常晓红, 娄振宁, 熊英. 大学化学, 2026, 41 (1), 107.
- [36] 畅正轩, 蒋浩阳, 赵卫光. 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202505070
- [37] 以计算机视觉赋能化学实验教学推动拔尖人才培养. [2026-04-03].
http://chinateacher.jyb.cn/zgjsb/html/2025-12/17/content_647433.htm?div=-1
- [38] 王金龙, 陈晓宇, 颜攀, 蔺佳慧, 赵妍茜, 毕雪琴, 郭彦炳. 化学教育(中英文), 2025, 46 (16), 110.
- [39] 邵松雪, 张钊源, 沈海云, 邱丽娟, 于曦, 朱莉娜. 大学化学, 2026, doi: 10.12461/PKU.DXHX202509051
- [40] M.M. Cooper, *J. Chem. Educ.* 2026, 103 (1), 36.
- [41] P.R.M. Correia, I.M. Kinchin, T.R.L.C. Paixão, D.T. Harvey, *Anal. Bioanal. Chem.* 2025, 417 (19), 1.
- [42] N.M. Green, J.L.B. Putnam, R.I. Hammond, N.H. Angello, J. Planey, D. Brandt, J.A. Martinez, T. Hummel, B. Gunasekera, R. Switzky, et al., *J. Chem. Educ.* 2025, 102 (12), 5273.
- [43] P.K. Oh, S.J. Kang, *J. Chem. Educ.* 2021, 98 (7), 2376.
- [44] J. Fu, A. Monte Carlo, D. Zheng, *J. Chem. Educ.* 2025, 102 (7), 3010.
- [45] F. Loch, J. Huwer, L.J. Thoms, *J. Chem. Educ.* 2025, 103 (1), 185.
- [46] Y. Wang, C.F. Wise, T. McKlin, M. Li, *J. Chem. Educ.* 2025, 103 (2), 920.
- [47] Z. Gong, C. Zhang, D. Song, W. Xia, B. Shen, W. Su, H. Duan, A. Su, *Chem. Commun.* 2025, 61 (70), 13137.