

AI赋能雨课堂在物理化学混合式教学中的实践探索

成媛媛¹, 赵娣^{2,*}, 张志成^{3,*}

¹ 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083

² 北京理工大学化学与化工学院, 北京 102488

³ 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

摘要: 本文阐述了物理化学课程的特点及传统教学存在的问题, 分析了AI与雨课堂结合的优势, 介绍了利用AI赋能雨课堂开展物理化学混合式教学的具体实施过程, 包括课前、课中、课后的教学环节设计。通过教学实践和学生反馈, 探讨了混合式教学模式对学生学习效果、学习兴趣、自主学习能力和创新实践能力的影响, 结果表明学生成绩提升明显且未有不及格学生, 学习兴趣大幅提升且参与度提高约3倍, 学习能力和实践能力也有所提升。本文旨在为物理化学教学改革提供新的思路和方法, 推动教育技术与学科教学的深度融合。

关键词: AI赋能; 雨课堂; 物理化学; 混合式教学

中图分类号: G64; O6

Practical Exploration of AI-Enabled Rain Classroom in Blended Teaching of Physical Chemistry

Yuanyuan Cheng¹, Di Zhao^{2,*}, Zhicheng Zhang^{3,*}

¹ School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China.

² School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China.

³ Tianjin Key Laboratory of Molecular Optoelectronic Sciences, Key Laboratory of Organic Integrated Circuits, Ministry of Education, Department of Chemistry, School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China.

Abstract: This paper delineates the distinctive features of physical chemistry courses and identifies the limitations inherent in traditional teaching methodologies. It examines the synergistic advantages of integrating artificial intelligence (AI) with the Rain Classroom platform and details the implementation process of AI-enabled Rain Classroom in blended teaching of physical chemistry, encompassing pre-class, in-class, and post-class instructional design. Through empirical teaching practices and student feedback, the study investigates the impact of the blended teaching model on students' learning outcomes, academic interest, autonomous learning capabilities, and innovative practical skills. The findings demonstrate significant improvements in students' academic performance with no failing grades, a substantial increase in learning interest accompanied by approximately threefold engagement enhancement, and notable advancements in both learning and practical abilities. This research aims to provide innovative approaches and methodologies for the reform of physical chemistry education, facilitating the profound integration of educational technology with disciplinary instruction.

Key Words: AI-enabled; Rain classroom; Physical chemistry; Blended teaching

收稿: 2025-03-10; 录用: 2025-05-16; 网络发表: 2025-07-29

*通讯作者, Emails: dizhao@bit.edu.cn (赵娣); zczhang19@tju.edu.cn (张志成)

基金资助: 2025年北京理工大学本科教育教学改革项目(2025KCJS059); 国家自然科学基金青年基金项目(22309011); 2024年天津大学理学院本科生教育改革研究计划项目; 研究生教育改革研究计划项目; 国家自然科学基金联合基金项目(U24B20190)和面上项目(22375142)

物理化学作为化学学科的核心基础课程，其重要性不言而喻。它不仅是连接化学理论与实际应用的桥梁，更是培养学生科学思维和创新能力的关键课程。物理化学课程涵盖了化学热力学、化学动力学、电化学等多个重要领域，运用物理学的理论和实验方法，深入研究化学变化的基本规律。然而，该课程具有理论性强、概念抽象、公式繁多的显著特点，这些特点使得学生在学习过程中面临着诸多困难^[1,2]。

在传统的物理化学教学模式中，教师往往占据主导地位，采用以讲授为主的教学方法。这种教学方式下，学生主要是被动地接受知识，缺乏主动思考和探索的机会。教师在课堂上按照既定的教学大纲和教材内容进行讲解，难以充分考虑到每个学生的学习进度和个体差异。同时，由于课程内容的抽象性，单纯的口头讲解和板书演示很难让学生深入理解和掌握相关知识。例如，在讲解化学热力学中的熵变、焓变等概念时，学生往往难以理解其物理意义和实际应用，导致学习效果不佳。此外，传统教学模式下的课堂互动相对较少，学生的学习积极性和主动性难以得到有效激发，也不利于培养学生的创新思维和实践能力。

随着信息技术的飞速发展，人工智能(AI)技术在各个领域都展现出了巨大的应用潜力，教育领域也不例外。AI技术凭借其强大的数据分析、智能决策、个性化学习等功能，为教育教学带来了全新的机遇和挑战^[3-5]。在教育领域，AI可以通过对学生学习数据的分析，了解学生的学习习惯、兴趣爱好和学习能力，从而为学生提供个性化的学习方案和指导。同时，以建构主义“支架式”教学理论为指导^[6]，AI还可以实现智能辅导、自动批改作业等功能，减轻教师的工作负担，提高教学效率。

雨课堂作为一种基于微信和PowerPoint的智能教学工具，自推出以来就受到了广大教师和学生的关注和喜爱^[7-9]。它具有操作简单、功能丰富的特点，可以实现课堂互动、教学资源推送、学习数据统计等多种功能。通过雨课堂，教师可以方便地将教学课件、视频、练习题等资源推送给学生，学生也可以通过手机或电脑随时随地接收和学习这些资源。此外，雨课堂还提供了实时投票、弹幕、抢答等互动功能，能够有效增强课堂的互动性和趣味性，提高学生的参与度。

将AI技术与雨课堂相结合，赋能物理化学混合式教学，有望打破传统教学模式的局限，改善教学效果，提高学生的学习质量^[10-12]。通过AI技术对雨课堂的赋能，可以进一步优化教学资源的推送和管理，实现更加精准的个性化教学；同时，利用AI的智能分析和决策能力，可以更好地了解学生的学习状态和需求，为教师调整教学策略提供有力支持。因此，开展AI赋能雨课堂在物理化学混合式教学中的应用研究具有重要的理论和实践意义。此外，该教学模式在其他理工科课程和不同学生群体中都具有广泛的推广价值。

1 AI与雨课堂结合的优势

1.1 实现个性化学习

AI技术在个性化学习方面具有独特的优势。它可以通过对学生学习行为数据的收集和分析，如学生的在线学习时间、作业完成情况、测试成绩、课堂互动参与度等，深入了解每个学生的学习进度、学习能力和学习习惯。基于这些数据，AI系统能够为每个学生制定个性化的学习方案。

在物理化学教学中，对于学习困难的学生，AI可以推送基础知识点的详细讲解视频和针对性的练习题，帮助他们巩固基础知识，逐步提高学习能力。例如，当学生在化学动力学的反应速率方程理解上存在困难时，AI可以推送相关的动画演示视频，直观地展示反应速率与反应物浓度、温度等因素之间的关系，并提供一系列简单的练习题，让学生通过练习加深对知识点的理解。对于学有余力的学生，AI则可以推送拓展性的学习内容，如前沿的科研案例、高级的理论知识等，满足他们对知识的更高追求。比如，介绍一些物理化学在新能源材料、环境保护等领域的最新应用案例，激发学生的学习兴趣和创新思维。

雨课堂作为教学资源的推送平台，可以将AI生成的个性化学习资源准确地推送给每个学生。学生可以根据自己的学习进度和需求，在雨课堂上自主选择学习内容，实现个性化的学习。同时，雨

课堂还可以记录学生的学习过程和学习成果，为教师和学生提供反馈，以便及时调整学习策略。

1.2 增强课堂互动性

雨课堂本身已经具备了丰富的互动功能，如实时投票、弹幕、抢答等，这些功能在一定程度上增强了课堂的互动性。图1是我们使用雨课堂开设物理化学课程的情况以及雨课堂部分功能展示。

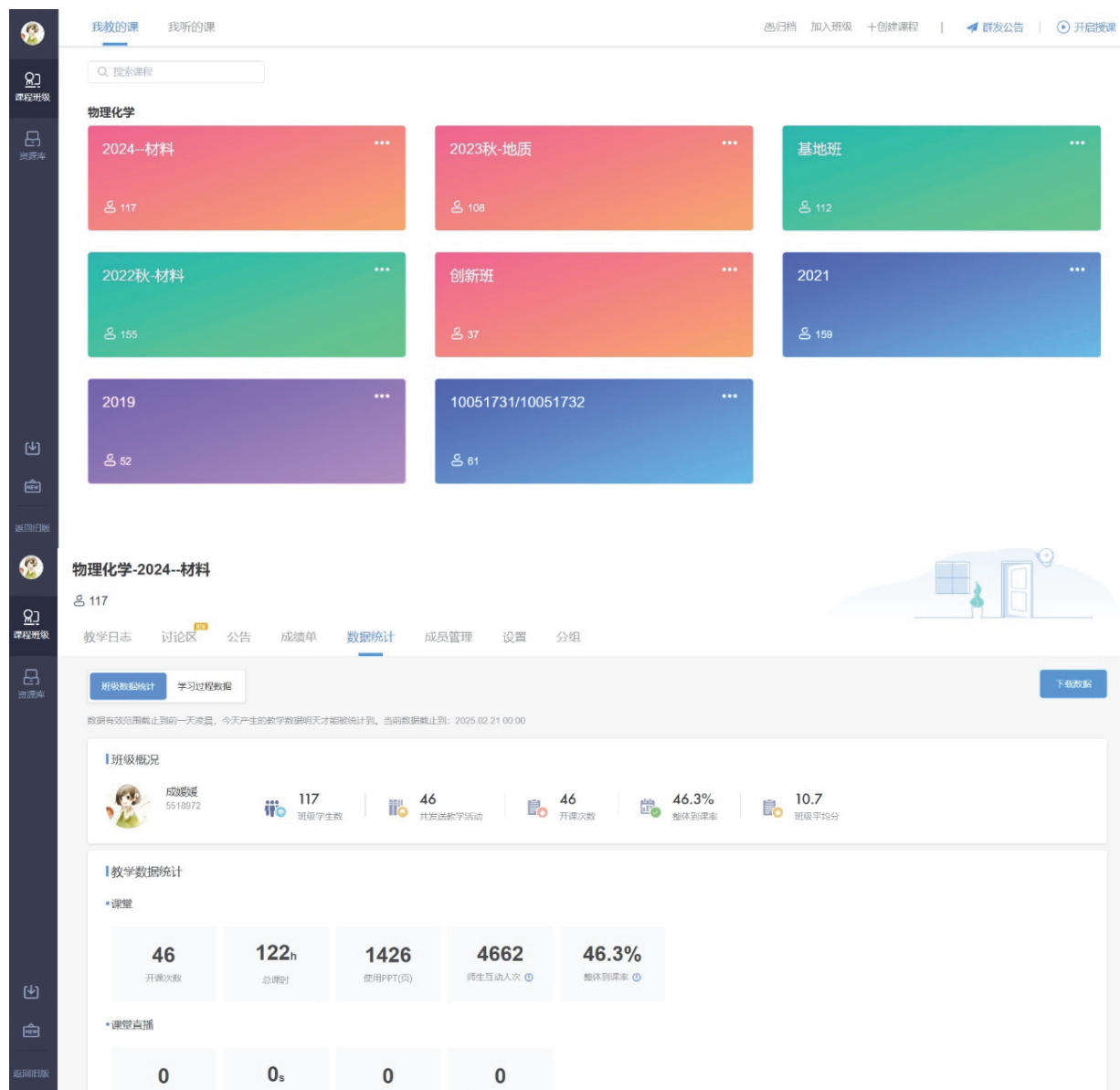


图1 物理化学课程雨课堂使用情况

通过自然语言处理技术，AI可以实现一键出题、自动阅卷等功能，使其更加智能化和人性化。例如，针对第一章热力学第一定律，AI技术可对授课的115页PPT实现自动总结知识点并一键出题插入到课题答题互动中，且雨课堂可自动阅卷，快速查看学生作答情况，如图2所示。

此外，AI还可以对学生的互动数据进行深入分析，了解学生的学习状态和参与度。通过分析学生在课堂上的投票结果、弹幕内容和抢答情况，AI可以判断学生对知识点的掌握程度和兴趣点，为教师调整教学策略提供依据。如果发现学生对某个知识点的理解存在普遍困难，教师可以及时调整

教学方法，加强讲解和练习；如果学生对某个话题表现出浓厚的兴趣，教师可以进一步拓展相关内容，激发学生的学习热情。

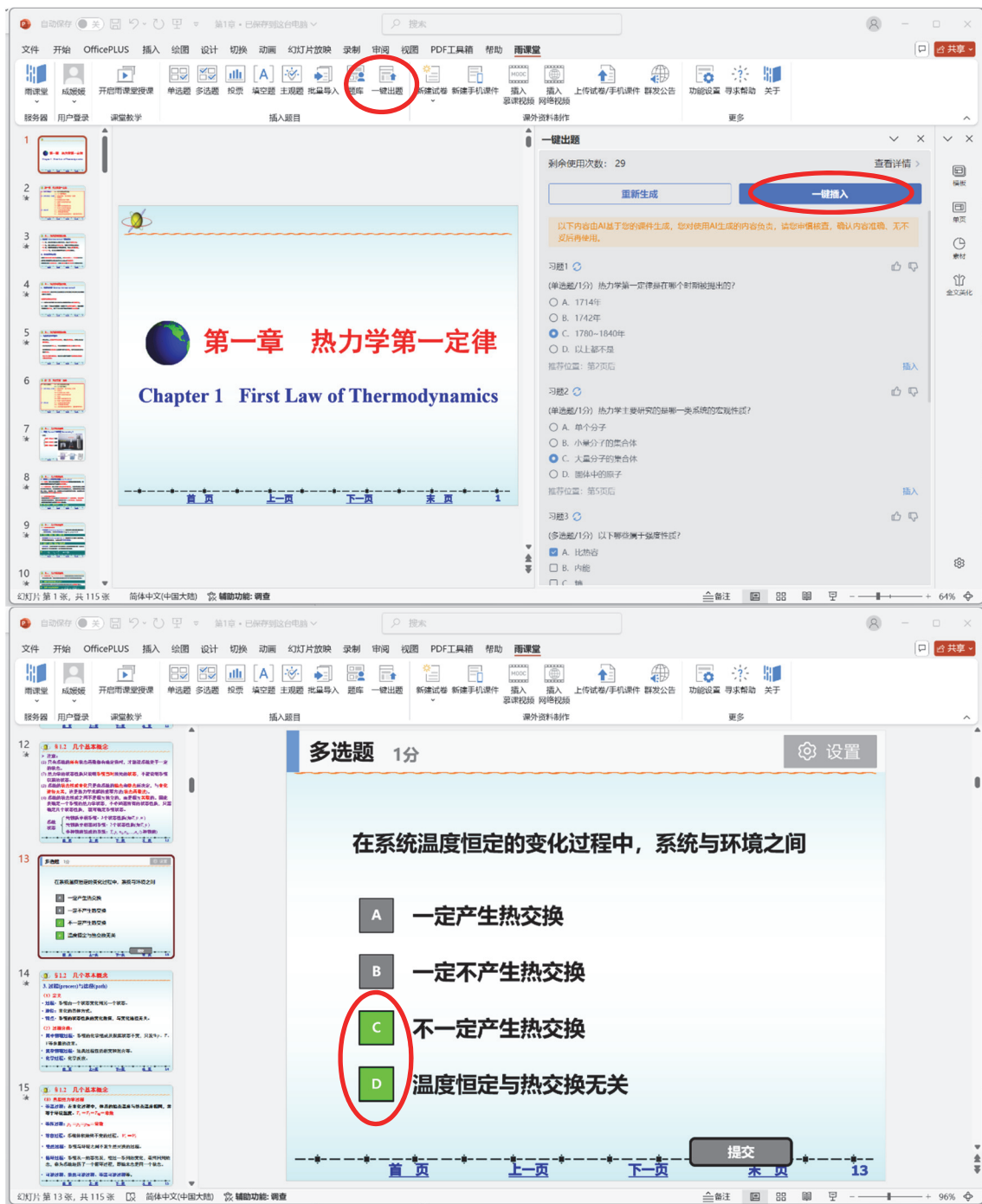


图2 AI赋能雨课堂一键出题、自动阅卷功能

1.3 精准教学评价

教学评价是教学过程中的重要环节，它对于了解学生的学习情况、评估教学效果以及指导教学改进具有重要意义。AI可以对学生的学习数据进行全面、深入的分析，为精准教学评价提供有力支持。

AI可以收集学生在课前预习、课堂学习、课后作业和考试等各个环节的数据，包括学生的学习时间、学习进度、答题情况、错误类型等。通过对这些数据的挖掘和分析，AI能够准确了解学生的学习优势和不足，为每个学生建立详细的学习档案。例如，通过分析学生的作业数据，AI可以发现学生在哪些知识点上容易出错，是概念理解不清还是计算错误，从而为教师提供针对性的反馈。

雨课堂可以将AI生成的教学评价结果及时反馈给学生和教师。学生可以通过雨课堂了解自己的学习进展和存在的问题，从而有针对性地进行学习和改进。教师则可以根据评价结果调整教学策略，优化教学内容和方法，提高教学质量。例如，教师可以根据学生的学习档案，为学习困难的学生提供个性化的辅导，为学有余力的学生提供拓展性的学习任务。

2 AI赋能雨课堂的物理化学混合式教学实施

在物理化学教学中，AI与雨课堂深度融合，打造高效混合式教学模式，如图3所示。课前，教师借助雨课堂功能，利用AI优化教学内容，制作丰富资源并布置预习任务；学生预习时通过互动交流，同时AI分析预习数据供教师参考。课中，知识讲解结合AI智能答疑，利用互动激发兴趣；小组讨论时，AI分析讨论内容，助力教师总结指导。课后，AI自动批改作业，推送个性化内容，方便学生复习巩固与拓展提升，全方位提升教学效果。



图3 AI赋能雨课堂混合式教学模式

2.1 课前准备

2.1.1 教师设计教学内容

教师在设计物理化学教学内容时，需要充分考虑课程的教学目标和学生的实际情况。利用雨课堂的功能，教师可以制作丰富多样的教学资源，如精美的PPT课件、生动的教学视频、详细的预习任务等。

在制作PPT课件时，教师可以运用AI技术对教学内容进行优化。例如，通过AI生成相关的教学案例和图片，使抽象的物理化学概念更加直观易懂。在讲解化学平衡的知识点时，AI可以生成不同条件下化学平衡移动的动态图片，展示反应物和生成物浓度的变化，帮助学生更好地理解化学平衡的原理。同时，教师还可以利用AI对教学内容进行结构化分析，突出重点和难点，使教学内容更加清晰有条理。

教学视频也是重要的教学资源之一。教师可以录制讲解物理化学知识点的视频，或者利用AI插入慕课视频或网络视频。视频讲解可以通过动画演示和语音讲解相结合的方式，生动地展示物理化学中的实验过程和原理。

此外，教师还需要设计详细的预习任务，引导学生在课前对教学内容进行自主预习。预习任务可以包括阅读教材、观看教学视频、完成预习练习题等。通过雨课堂，教师可以将预习任务和相关的学习资源推送给学生，并设置预习时间和截止日期，以便及时了解学生的预习情况。

2.1.2 学生预习

学生通过雨课堂接收教师推送的预习任务和学习资源后，开始进行自主预习。在预习过程中，学生可以利用雨课堂的互动功能，如提问、讨论等，与教师和同学进行交流。

学生在预习物理化学的知识点时，如果遇到不理解的问题，可以通过雨课堂的提问功能向教师提问。教师可以及时回复学生的问题，解答学生的疑惑。同时，学生还可以在雨课堂的讨论区与同学进行讨论，分享自己的学习心得和疑问。通过与同学的交流和讨论，学生可以从不同的角度理解知识点，拓宽自己的思维方式。

AI可以对学生的预习数据进行分析，了解学生的预习情况和存在的问题。例如，AI可以统计学生的预习时间、预习完成率、预习练习题的正确率等数据，并生成详细的预习报告。教师可以根据预习报告了解学生对知识点的掌握程度，从而调整课堂教学内容和方法。如果发现学生对某个知识点的预习效果不佳，教师可以在课堂上加强讲解和练习；如果学生对某个知识点的掌握较好，教师可以适当拓展相关内容，提高学生的学习深度。

2.2 课中教学

2.2.1 知识讲解

教师利用雨课堂进行物理化学知识讲解时，结合AI智能答疑功能，能够及时解答学生的疑问，提高教学效果。

在讲解过程中，教师可以通过雨课堂展示精心制作的PPT课件和教学视频，同时利用雨课堂的互动功能，如投票、抢答等，激发学生的学习兴趣 and 参与度。例如，在讲解化学热力学中的状态函数概念时，教师可以通过雨课堂发起一个投票，让学生选择哪些物理量属于状态函数。通过投票，教师可以了解学生对知识点的掌握情况，及时调整教学策略。例如，在讲解热力学第一定律时，可插入慕课视频讲解体积功的概念和计算，使学生更容易理解，如图4所示。

The screenshot displays the Rain Classroom (雨课堂) software interface. The main window shows a PPT slide titled "§ 1.4 体积功" (Volume Work). The slide content includes:

- 1. 体积功定义:** 因系统体积变化而引起的系统与环境间交换的功——体积功。
- 公式:** $\delta W = -f_{\text{外}} dl = -p_{\text{外}} \cdot A dl = -p_{\text{外}} \cdot dV$
- 注意:**
 - (1) 不论系统是膨胀还是压缩，体积功都用 $-p_{\text{外}} \cdot dV$ 来计算；
 - (2) 只有 $-p_{\text{外}} \cdot dV$ 才是体积功， $-pV$ 或 $-Vdp$ 都不是体积功。

The slide also features a diagram of a gas cylinder (Figure 1.3) and a video player on the right side. The video player shows a video titled "体积功的定义和计算" (Definition and Calculation of Volume Work) with the following content:

- 计算公式:**

$$\delta W = F \cdot dZ = -p_{\text{外}} \cdot A \cdot dZ$$

$$= -p_{\text{外}} \cdot dV$$

$$W = -\int p_{\text{外}} \cdot dV$$
- Diagram:** A diagram of a cylinder with external pressure $p_{\text{外}}$, internal pressure p , area A , and displacement dZ .

The software interface includes a top menu bar with options like "文件", "开始", "OfficePLUS", "插入", "绘图", "设计", "切换", "动画", "幻灯片放映", "录制", "审阅", "视图", "PDF工具箱", "帮助", and "雨课堂". A red circle highlights the "雨课堂" menu item. The bottom status bar shows "幻灯片第 29 张, 共 115 张" and "75%" zoom level.

图4 插入慕课视频讲解体积功

当学生在课堂上提出问题时, AI智能答疑系统可以迅速给出答案。如果AI系统无法回答学生的问题, 教师可以及时介入, 进行详细的讲解和指导。同时, AI还可以根据学生的互动情况, 实时分析学生的学习状态和掌握程度。例如, 通过分析学生的答题时间和正确率, AI可以判断学生对某个知识点的理解是否深入, 从而为教师调整教学节奏和方法提供支持。如果发现学生对某个知识点的理解存在困难, 教师可以放慢教学进度, 加强讲解和举例; 如果学生对某个知识点的掌握较好, 教师可以加快教学进度, 拓展相关内容。

2.2.2 小组讨论

小组讨论是物理化学教学中培养学生合作学习能力和创新思维的重要环节。教师组织学生进行小组讨论时, 利用雨课堂的小组讨论功能, 让学生在小组内分享自己的学习心得和问题。

在小组讨论开始前, 教师可以通过雨课堂发布讨论主题和要求, 引导学生围绕主题进行讨论。例如, 在学习电化学中的原电池和电解池知识后, 教师可以提出一个讨论主题: “原电池和电解池在实际生活中有哪些应用? 它们的工作原理有何异同?” 学生在小组内通过雨课堂的讨论区进行交流和讨论, 分享自己的观点和发现。

AI可以对小组讨论的内容进行分析, 了解学生的思维过程和合作情况。通过分析学生在讨论区的发言内容和频率, AI可以评估学生的参与度和贡献度, 为教师评价学生的小组表现提供依据。同时, AI还可以发现学生在讨论中存在的问题和争议点, 及时反馈给教师, 以便教师在讨论结束后进行总结和指导。例如, 如果发现学生对某个知识点的理解存在偏差, 教师可以在讨论结束后进行重点讲解, 纠正学生的错误理解。

2.3 课后巩固

2.3.1 作业布置与批改

教师通过雨课堂布置物理化学作业, 作业形式可以包括选择题、填空题、计算题等。AI可以对学生的作业进行自动批改和分析, 及时反馈学生的作业情况。

在布置作业时, 教师可以根据学生的学习情况和教学目标, 选择不同难度和类型的题目。AI可以根据学生的学习档案, 为每个学生推送个性化的作业。例如, 对于学习成绩较好的学生, AI可以推送一些综合性较强的题目, 锻炼他们的思维能力和解决问题的能力; 对于学习成绩相对较差的学生, AI可以推送一些基础题目, 帮助他们巩固基础知识。

学生完成作业后, 通过雨课堂提交作业。AI可以自动批改作业, 对于客观题, 如选择题和填空题, AI可以直接判断答案的对错; 对于主观题, 如计算题, AI可以通过智能算法对学生的解题过程和答案进行分析和评分。同时, AI还可以对学生的错误答案进行详细的解析和指导, 帮助学生理解和掌握知识点。例如, 如果学生在计算化学平衡常数时出现错误, AI可以分析学生的解题步骤, 指出错误的原因, 并提供正确的解题思路和方法。

教师可以通过雨课堂查看学生的作业情况和AI的批改结果, 对于学生普遍存在的问题, 教师可以在课堂上进行集中讲解和辅导; 对于个别学生的问题, 教师可以通过雨课堂与学生进行一对一的交流和指导。

2.3.2 复习与拓展

学生根据教师的反馈和自己的学习情况, 进行复习和拓展学习。雨课堂可以根据学生的学习数据, 为学生推送个性化的复习资料 and 拓展学习内容。

在复习阶段, AI可以分析学生的作业和考试数据, 如图5所示。找出学生掌握不扎实的知识点, 为学生推送相关的复习资料, 如知识点总结、例题讲解视频等。例如, 如果学生在化学动力学的反应速率常数计算方面存在问题, AI可以推送相关的知识点总结和计算例题的讲解视频, 帮助学生巩固这部分知识。

对于学有余力的学生, 雨课堂可以推送拓展性的学习内容, 如物理化学领域的前沿研究成果、学术论文等, 激发学生的学习兴趣和探索精神。学生可以通过阅读这些拓展学习内容, 了解物理化

学学科的最新发展动态，拓宽自己的知识面和视野。

此外，学生还可以利用雨课堂的在线测试功能，进行自我检测，了解自己的学习效果。在线测试的题目可以根据学生的学习情况和复习进度进行个性化设置，帮助学生及时发现自己的不足之处，调整学习策略。

序号	姓名	学号	课堂 (30%)	雨课堂课件 (20%)	考试 (50%)	总成绩	
1	[Name]	1003230118	13.8	0.0	0.0	13.8	
2	[Name]	1003230113	13.5	0.0	0.0	13.5	
3	[Name]	1003230110	13.3	0.0	0.0	13.3	
4	[Name]		13.3	0.0	0.0	13.3	
5	金 [Name]	230616	1001230115	13.3	0.0	0.0	13.3
6	雷欣 [Name]	1230507	1001230117	13.2	0.0	0.0	13.2
7	刘 [Name]	1230504	1001230114	13.2	0.0	0.0	13.2
8	[Name]		1001230113	13.1	0.0	0.0	13.1
9	[Name]		1003230119	12.9	0.0	0.0	12.9
10	[Name]		1003230112	12.9	0.0	0.0	12.9

图5 学生成绩数据汇总

3 教学实践与效果分析

3.1 教学实践

我们在物理化学课程中开展了AI赋能雨课堂的混合式教学实践。以在中国地质大学(北京)的实践为例，我们选取了两个平行班级作为实验对象，一个班级采用传统教学模式，另一个班级采用AI赋能雨课堂的混合式教学模式。在教学过程中，对两个班级的学生进行了跟踪观察和数据收集。

3.2 效果分析

学习成绩对比：针对同一年级相同专业学生，由同一位老师在同一学期开设物理化学课程进行平行班教学活动。通过期末考试成绩对比发现，采用AI赋能雨课堂混合式教学模式的班级，学生的平均成绩明显高于采用传统教学模式的班级，且未有不及格学生，如图6所示。这表明AI赋能雨课堂的混合式教学模式能够提高学生的学习效果，帮助学生更好地掌握物理化学知识。

学习兴趣调查：通过雨课堂投票问卷调查，发现采用AI赋能雨课堂混合式教学模式的班级，学生的学习兴趣明显较高，非常感兴趣的学生数量大约是传统班级的3倍，如图7所示。学生对课堂互动、个性化学习资源等教学环节表现出较高的参与度和满意度。

自主学习能力评估：通过对学生的预习情况、作业完成情况和课后复习情况等方面的评估发现，采用AI赋能雨课堂混合式教学模式的班级，学生的自主学习能力得到了显著提升。学生能够更加主动地进行学习，合理安排学习时间，提高学习效率。

创新实践能力评估：通过对学生参与大学生创新创业训练计划项目的数量、级别以及完成情况的评估，采用AI赋能雨课堂混合式教学模式的班级，学生参与大创项目的数量增多，国家级、北京市级项目的占比较高，且结题优秀的项目居多。学生的创新实践能力得到了大幅度提升，部分学生在大创老师的指导下发表了国际SCI期刊论文。

中国地质大学(北京)
2024学年秋学期null成绩统计和试卷分析

开课院系: 数理学院 教研室: 化学教研室
 课程名称: 物理化学B 学时/学分: 48.0/3.0
 任课教师: 成媛媛 课程性质: 必修()学位()选修()
 命题方式: 题库()集体()单独() 考核方式: 考试()考查()
 考试方式: 开卷()闭卷()其他() 打印日期: 2025-01-10

课序号	3	人数	60	实考人数	59	缺考人数	0		
平均分	68.3	最高分	89	最低分	38.2	均方差	10.2	期望值	5
平均分	人数		百分率(%)						
≥90分	0	0.0							
80-89分	8	13.3							
70-79分	14	23.3							
60-69分	30	50.0							
<60分	7	11.7							

中国地质大学(北京)
2024学年秋学期null成绩统计和试卷分析

开课院系: 数理学院 教研室: 化学教研室
 课程名称: 物理化学B 学时/学分: 48.0/3.0
 任课教师: 成媛媛 课程性质: 必修()学位()选修()
 命题方式: 题库()集体()单独() 考核方式: 考试()考查()
 考试方式: 开卷()闭卷()其他() 打印日期: 2025-01-10

课序号	5	人数	53	实考人数	53	缺考人数	0		
平均分	71.2	最高分	88.8	最低分	60	均方差	8.4	期望值	5
平均分	人数		百分率(%)						
≥90分	0	0.0							
80-89分	11	20.8							
70-79分	14	26.4							
60-69分	28	52.8							
<60分	0	0.0							

图6 课序号3(传统教学)和5(混合式教学)期末成绩对比

4 结语

本文通过对AI赋能雨课堂在物理化学混合式教学中的实践探索,表明这种教学模式具有明显的优势,能够提高学生的学习效果、学习兴趣和自主学习能力。然而,在教学实践过程中也发现了一些问题,如AI技术的应用还不够成熟,存在数据隐私问题及算法偏见等问题,且部分教师对AI和雨课堂的使用还不够熟练。

未来,需要进一步加强AI技术在教育领域的应用研究,不断完善AI赋能雨课堂的教学功能,确保数据安全性和算法偏见带来的不公正等问题得以解决。同时,加强对教师的培训,提高教师的信息技术素养和教学能力,推动AI赋能雨课堂在物理化学教学中的广泛应用,为培养具有创新精神和实践能力的高素质化学人才做出贡献。



图7 传统教学班级(上)和混合式教学班级(下)的学习兴趣调查

参 考 文 献

- [1] 杨绳岩, 孟祥珍, 王新, 张杨. 大学化学, 2024, 39 (11), 28.
- [2] 梁红莲, 邝晓哲, 王福萍, 陈钰. 大学化学, 2024, 39 (10), 433.
- [3] 王新福, 高文蓓, 凌一洲. 化学教育(中英文), 2025, 46 (1), 77.
- [4] 邓淞, 伍晓春. 化学教育(中英文), 2024, 45 (18), 14.
- [5] 李平, 尹超. 大学化学, 2024, 39 (10), 402.
- [6] 陈翠霞, 张雨森, 张再美, 李慧, 赵玉荣, 王玉鸣, 唐艳凌. 生命的化学, 2025, 45 (3), 529.
- [7] 谭娥, 王素琴, 黎泓波. 化学教育(中英文), 2025, 46 (2), 39.
- [8] 宋宁, 张雷明, 李富强, 张伟. 中国现代教育装备, 2024, 447 (23), 85.
- [9] 李永峰, 余林, 何军, 阳香华, 钟远红, 于会娟, 赵丰华. 高教学刊, 2025, 11 (3), 138.
- [10] 任风华, 符强, 张琦, 李晓, 杨青. 高教学刊, 2021, No. 6, 36.
- [11] 吕晓欣, 刘良, 王丽梅. 教育教学论坛, 2020, 12 (52), 140.
- [12] 孙久, 卞学胜, 王如刚. 科教导刊, 2024, 12 (36), 53.