

基于知识图谱的无机化学实验AI课程构建与教学新形态探索

黄子俊*, 邬峰, 皮少锋, 黄赛金, 方正军*

湖南工程学院材料与化工学院, 湖南 湘潭 411104

摘要: 在教育数字化转型背景下, 针对传统无机化学实验教学存在的知识离散、资源整合度低、个性化支持不足等问题, 提出“知识图谱+AI”融合模型, 构建“概念-操作-资源”三元组网络, 实现实验原理、操作规范等要素的结构化映射。通过智能导学系统和动态推理算法, 支持个性化学习路径规划及过程性评价。教学实践表明, 该模式显著提升学生知识整合效率与创新能力, 为实验教学数字化转型提供新路径。

关键词: 知识图谱; 无机化学实验; 实验教学改革; 智能导学系统

中图分类号: G64; O6

Knowledge Graph-based Development of AI Curriculum for Inorganic Chemistry Experiments and Exploration of New Teaching Paradigm

Zijun Huang*, Feng Wu, Shaofeng Pi, Saijin Huang, Zhengjun Fang*

College of Materials and Chemical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, Hunan Province, China.

Abstract: In the context of educational digital transformation, this study addresses the challenges of fragmented knowledge, low resource integration, and insufficient personalized support in traditional inorganic chemistry experiment teaching. A “Knowledge Graph + AI” integrated model is proposed, which constructs a “concept-operation-resource” triple network to achieve structured mapping of essential elements such as experimental principles and operational standards. Through an intelligent tutoring system and dynamic reasoning algorithms, the model supports personalized learning path planning and formative assessment. Teaching practice demonstrates that this approach significantly enhances students’ knowledge integration efficiency and innovation capabilities, providing a novel pathway for the digital transformation of experimental education.

Key Words: Knowledge graph; Inorganic chemistry experiments; Experimental teaching reform; Intelligent tutoring system

在“互联网+教育”深度融合的时代背景下, 教育形态正经历着从知识传递到知识建构的重要转变。建构主义学习理论认为, 学习者主要通过与环境的互动来实现知识的意义建构^[1]。无机化学实验作为典型的探究性学习场景, 其核心目标是通过具体的操作实践与问题解决过程, 促进学生对于化学原理的深层理解。然而, 传统实验教学中“碎片化知识呈现-线性流程操作-单向结果评价”的模式, 与建构主义倡导的“情境化、网络化、个性化”学习需求存在明显矛盾^[2]。这种矛盾具体体现为: 知识体系以教材章节为单元分散分布, 缺乏对“实验原理-操作规范-安全风险-工程应用”等核心要素的有机关联与整合; 教学手段过度依赖教师现场演示, 难以适应学生在认知节奏上的个体差

收稿: 2025-04-15; 录用: 2025-06-26; 网络发表: 2025-07-29

*通讯作者, Emails: huangzijun@hnie.edu.cn (黄子俊); fzj1001@163.com (方正军)

基金资助: 湖南省普通高等学校教学改革研究项目(HNJG-20230952, HNJG-2022-0975); 湖南省普通高校青年骨干教师培养对象项目

异；评价体系往往只关注实验结果的正确性，却忽视了对探究过程中高阶思维能力的培养^[3,4]。

作为语义网络的高级形态，知识图谱的理论核心在于通过“实体-关系-属性”三元组实现领域知识的结构化表征。在教育领域，知识图谱的价值早已超越了单纯的数据可视化工具，成为认知建模的重要技术载体^[5,6]。相较于传统教学大纲的树状结构，其网状关联特性能够精准映射学科知识的内在逻辑。以“硫酸亚铁铵制备”实验为例，知识图谱可将“复盐溶解度-结晶条件-仪器选择-环保处理”等要素构建成动态关联网络，帮助学生从孤立的知识点记忆向系统性的知识网络建构转变。这种建模方式与认知负荷理论^[7]相契合，通过降低外在认知负荷、优化内在认知负荷，助力学习者建立更高效的知识表征体系。人工智能技术在教育领域的应用遵循“数据驱动-智能决策-精准反馈”的闭环逻辑。基于机器学习的智能导学系统，能够通过分析学生在虚拟仿真实验中的操作轨迹、问题提问频次等数据，动态生成个性化学习路径，这与自适应学习理论^[8]所倡导的“学习者模型-领域模型-教学策略”三元架构高度契合。

地方高校作为应用型人才培养的主阵地，其无机化学实验教学面临着双重挑战：既要落实“新工科”建设对实践能力培养的更高要求，又要应对生源基础参差不齐、优质教育资源相对有限的现实困境。《中国教育现代化2035》明确提出“推动教育数字化转型，构建‘互联网+教育’新生态”，这为地方高校实验教学改革指明了方向^[9-11]。基于“技术赋能-理论适配-本土创新”的思路，将知识图谱的结构化表征优势与AI的个性化计算能力相结合，着力构建符合地方高校学情的“虚实融合”教学新形态。通过将建构主义学习理论、知识图谱语义建模理论、自适应学习理论与地方高校的教育实际相结合，本研究提出“知识体系-智能辅助-多元评价”三位一体模式，不仅具备技术创新价值，更形成了基于教育理论的系统性解决方案，为新时代实验教学改革奠定了坚实的理论基础。

1 知识图谱驱动的课程资源建设

湖南工程学院无机化学实验课程是“化学工程与工艺”国家级一流专业的核心基础实验课程，是化工、材料、化学类专业的首门必修实验课程，与国家级一流本科课程——无机化学共同构建起同步教学体系。该课程于2009年获评省级精品课程，2023年升级为省级精品在线开放课程。随着“互联网+”教育的深入发展，国家级精品在线开放课程建设推动实验教学模式发生深刻变革。依托智能教学平台，传统实验室正逐步向“虚实融合”的智慧实验室转型。

1.1 建设无机化学知识图谱

基于人工智能数字化技术建设无机化学实验知识图谱，实现无机化学实验教学新形态。知识图谱课程按知识图谱、问题图谱、能力图谱三个板块建设(图1)，包含：4个主题、2个子主题、270个图谱节点、3517个素材资源。图谱节点包括19个重点、98个知识点、17个思政点等。将传统的按章节展开的层级结构转化为图形结构，使各个知识点之间的上下位、前后序关系更加合理，从知识导航的角度实现基于图的学习路径推荐。知识图谱课程链接3136个AI推荐资源、71个视频、156个习题、54个PPT课件、12个教案、87个外挂链接等，实现对课程资源的有效管理，增强资源与课程知识概念间的相关性，提高了学生的学习效率，让学生从大海捞针式的知识获取升级为个性化的智能导航，实现了系统化和碎片化融合，激发学生深度学习，培养学生自主学习能力、发现问题和解决问题能力。

1.2 AI智慧课堂构建

依托智慧树网湖南省级精品在线开放课程“无机化学实验”，通过“数智化”改造构建“知识图谱-问题图谱-能力图谱”三维图谱框架。针对多模态碎片化数字资源，采用本体建模技术实现知识体系重构，在知识点与知识点以及知识点与教学资源之间建立连接的语义网络，能够在教育语义计算、学习资料的语义关联、学习者模型建立、网络教学平台开发、智能答疑系统开发、学习资源的个性化服务等方面发挥重要的基础性作用，为认知智能阶段发展提供可能，推动智慧教育的创新发展，打造学生个性化的学习方案。



图1 无机化学实验AI课程构建示意图

(1) 知识图谱构建。

构建无机化学实验知识图谱时, 先系统梳理课程, 划分“安全知识和实验基本操作”“设计性实验”等模块, 提取实验项目(如硫酸亚铁铵制备)、操作要点等知识实体, 定义实体间上下位、时序关系, 搭建模式层。接着整合视频、课件等资源, 精准映射到对应知识节点(如实验配视频、操作配讲解), 填充数据层。最后经专家论证、算法优化知识点关联, 形成含270个节点的知识网络, 让碎片化知识系统化, 助力智能导学(图2)。

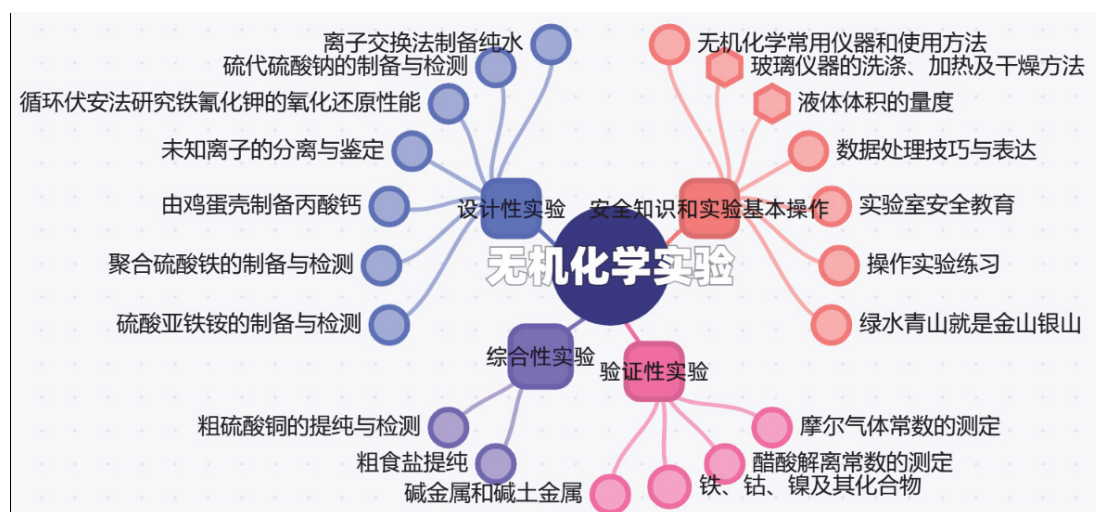


图2 无机化学实验知识图谱

(2) 问题图谱构建。

无机化学实验问题图谱构建采用分层拆解法(图3): 首先搭建“全局层-概念层-方法层”三级体系, 全局层以“学习无机化学实验应掌握哪些原理和技能”为总领方向; 概念层从知识概念切入, 分解出“玻璃仪器干燥方法有哪些”“分压定律与气体状态方程应用”等23个问题, 覆盖实验原理、仪器知识等内容; 方法层围绕操作过程, 生成“如何判断玻璃仪器洗净”“带刻度仪器能否加热干燥”等59个实操性问题。构建时, 依托已有数据库资源, 将每个问题关联对应知识点, 如“使用铬酸洗液清洗仪器后处理”问题, 匹配实验安全操作知识点; 同时整合教学视频、习题等资源, 使问题图谱既形成“总-分-法”的逻辑网络, 又与知识、资源深度链接, 为学生提供从概念理解到方法

应用的全方位问题引导。

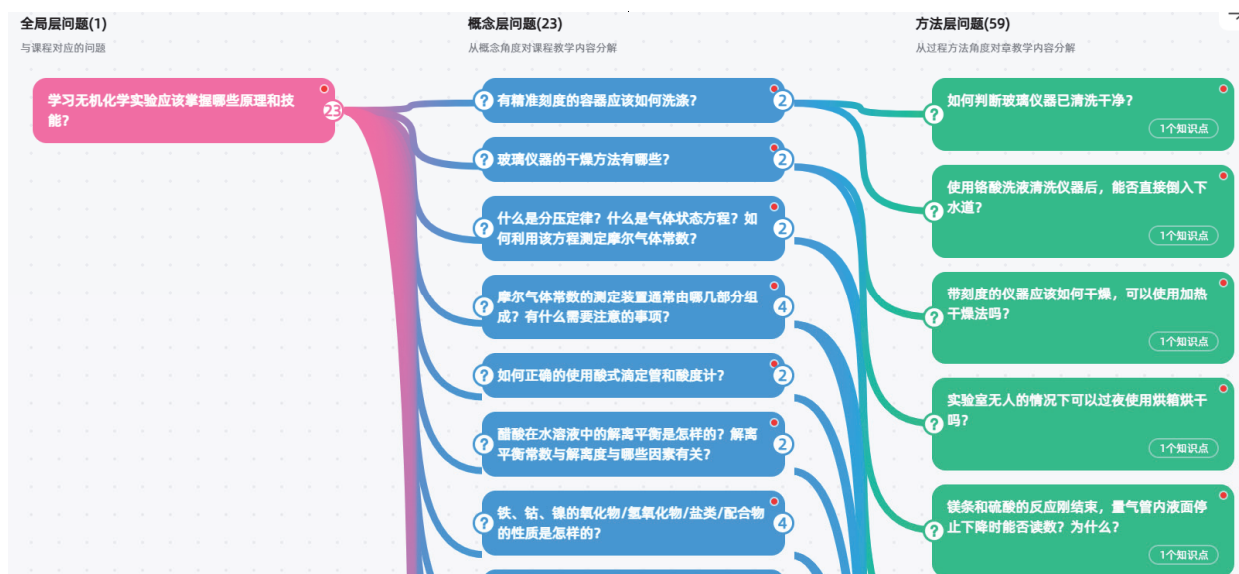


图3 采用分层拆解法构建无机化学实验问题图谱

(3) 能力图谱构建。

无机化学实验能力图谱构建以课程目标为核心依据, 首先梳理课程三维目标: 知识目标(掌握无机物分离、提纯、制备方法及实验基本操作)、能力目标(培养实践能力、分析解决问题能力)、素养目标(强化安全环保意识、严谨科学态度)。聚焦能力目标, 进行结构化拆解: 划分“基本实验技能”“思考与创新”“数据分析与实践”“安全意识”4大主能力, 每个主能力下延伸子能力, 如“基本实验技能”涵盖规范操作仪器、精准执行实验流程等子能力(图4)。依托数据库资源, 将71个重要知识点(占总知识点72%)、81个关键问题与能力项深度关联。例如, “玻璃仪器洗涤操作”知识

课程目标

- 1、知识目标: 掌握无机物的一般分离、提纯和制备方法及无机化学实验的基本操作和实验技能;
- 2、能力目标: 培养学生基础实践能力和辩证思维能力; 培养学生综合运用所学知识分析问题和解决问题的能力; 提高学生的动手能力;
- 3、素养目标: 培养学生安全和环保意识; 培养学生严谨的科学态度和精益求精的学习作风; 具备良好的科学素养。

目标拆解

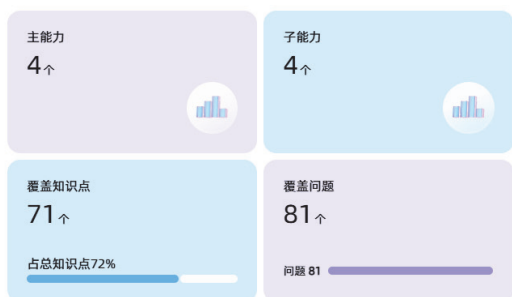


图4 无机化学实验能力图谱

点支撑“基本实验技能”主能力；“实验数据异常分析”问题对应“数据分析与实践”主能力。通过整合知识、问题与能力要素，构建起包含主能力、子能力，且与课程知识体系、问题场景紧密映射的能力图谱，实现从知识输入到能力培养的系统化衔接。

基于智慧树网智慧课堂平台，融合知识图谱、问题图谱、能力图谱构建无机化学实验AI智慧课堂。课前，依托知识图谱整合实验视频等资源，结合问题图谱设计预习问题，依据能力图谱分析学生基础，推送个性化预习内容；课中，以问题图谱的层次化问题驱动探究，借助智慧课堂互动功能，联动知识图谱资源讲解，围绕能力图谱的“基本实验技能”“思考与创新”等目标开展实验实践；课后，通过智慧课堂分析学习数据，基于能力图谱评估学生能力，再联动知识图谱推送针对性巩固资源，结合问题图谱的拓展性问题布置任务，形成“导学-实践-提升”闭环，实现知识掌握、能力培养、素养发展的三维教学目标。

1.3 AI教学助手构建

1) AI教学助手构建。

依托无机化学实验知识图谱，将270个图谱节点(包含重点、难点、知识点、思政点、实验等)及关联的大量资源(71个教学视频、54个PPT课件等)进行梳理。以知识图谱为基础，构建助手的知识体系，使其能够准确理解和关联课程中的各类概念、原理和操作。将问题图谱中的全局层、概念层、方法层问题整合进AI教学助手。让助手能够依据不同层次的问题，精准定位学生的疑问方向，无论是关于课程整体的原理技能问题，还是具体概念理解、操作方法的问题，都能迅速匹配解答策略。结合能力图谱中对学生能力的分层(如基本实验技能、思考与创新、数据分析与实践、安全意识等主能力及子能力)，使教学助手能够根据学生的能力水平和培养目标，提供针对性的指导和建议。例如，对于在“数据分析与实践”方面能力薄弱的学生，助手可推荐相关强化练习资源。运用自然语言处理技术，使助手能够理解学生输入问题的语义，对问题进行准确分类和解析。同时，将知识图谱、问题图谱、能力图谱中的信息转化为自然流畅的语言输出，为学生提供清晰易懂的回答。数据库资源支撑：利用已有的数据库资源，如实验操作规范数据库、原理讲解文档库、常见问题解答库等，不断训练和优化教学助手。通过对大量文本数据的学习，提升助手回答的准确性和全面性。

2) 知识图谱驱动的智能推送机制。

构建“知识点-能力-资源”多维度数据驱动模型，每个知识点标注学习难度(L1-L3)、能力维度(如“基本实验技能”占比40%)及资源类型(视频/虚拟仿真/习题)。例如，“摩尔气体常数测定”知识点关联2个虚拟仿真实验(L2，对应“数据分析与实践”能力)、3个阶梯式计算题(L3，对应“思考与创新”能力)。系统通过协同过滤算法分析学生前测错误率、资源停留时长等数据，动态生成个性化学习路径。若学生在“分压定律应用”测试中错误率>60%，系统自动推送该知识点的基础讲解视频(L1)，并在后续实验中优先触发相关虚拟仿真操作提示。构建场景化推送策略。课前：根据预习测试结果，向薄弱知识点学习者推送微课件(如“仪器洗涤规范”动画)；课中：通过预习情况、实操及实验结果判断操作错误，推送对应的纠正视频；课后：基于实验报告质量分析(如数据异常率)，定向推送“误差分析”专题习题及解析。

2 无机化学实验知识图谱AI课程在混合式教学中的应用探索

我校工科无机化学实验课程设32学时，1.5学分。自2021年无机化学实验在线课程建成，已开展9个学期线上线下混合式教学。2023年，团队基于课程知识图谱与虚拟仿真实验资源，推进无机化学实验知识图谱AI课程混合式教学，实现系统化知识与碎片化资源的有机融合。教学过程聚焦学生知识、能力与素质协调发展，强化过程性评价及学情分析，将分析结果反馈至教学环节，有效提升课堂质量。在线课堂互动累计1639次，师生参与互动逾4.7万人次，线上考核参与16907人次，知识图谱总学习人次达9.2万。通过实时追踪学生知识点掌握情况，动态调整教学方法与内容，教学效果获广

泛认可。经近5年探索，形成线上线下融合的考核体系。

2.1 线上线下融合的多元考核体系构建

2.1.1 多元考核体系的设计原则

能力导向原则。以布鲁姆教育目标分类学为理论基础，将考核重点从“知识记忆”转向“高阶思维能力”培养，重点评估学生的实验设计能力(如方案优化)、数据分析能力(如误差溯源)和科学探究能力(如异常现象解释)。

过程性评价原则。打破“重结果轻过程”的传统模式，通过线上学习轨迹追踪(如知识图谱节点访问深度、操作记录)和线下实验过程观测(如操作规范性、问题解决效率)，构建覆盖“预习-实践-总结”全流程的形成性评价体系。

多维量化原则。采用“知识-能力-素养”三维考核框架，知识维度考查原理应用准确性，能力维度评估实验设计与数据处理水平，素养维度关注安全规范与环保意识，实现定性评价与定量分析结合。

2.1.2 线上课程学习考核办法

线上考核独立设置，总分100分，由三部分构成：平时成绩(占50%)、平时测试成绩(占10%)、期末考试成绩(占40%)。其中，平时成绩通过进度完成度、互动参与度(讨论区回帖数与被赞数)、知识图谱节点学习情况、虚拟仿真实验完成质量综合评定；平时测验以章节测试题考查基础知能；期末考试通过50道客观题(20道判断题，30道选择题)检验课程整体掌握度。该模块独立评估学生线上自主学习成效。

平时成绩：增设“知识网络构建”指标(占平时成绩20%)，通过AI分析学生在知识图谱中的节点关联操作(如自主建立“实验原理-操作步骤-安全规范”关联链的数量)，评估知识整合能力。平时测试：设计“开放式问题”模块(占测试成绩30%)，如“若实验中晶体产率低于理论值，可能涉及哪些操作误差？请结合知识图谱节点分析”，考查批判性思维与问题解决能力。

2.1.3 线下考核与混合式成绩构成

线下考核面向参与混合式教学的学生，总分100分，包含三部分。

平时成绩(40分)：整合线上与线下过程性评价，其中线上考核占30分(对应线上课程中的知识图谱学习、视频观看、测验参与等核心环节)，线下考核占10分(含课堂出勤、分组讨论参与度等现场表现)；

实验报告成绩(10分)：评价实验数据记录的规范性、现象分析的逻辑性及结论的科学性；

实验操作成绩(50分)：聚焦操作步骤正确性、仪器使用规范性、安全意识及结果准确性，通过现场观测与结果分析综合评分。

学期总成绩构成说明：纯线上学习学生，以“线上课程学习考核”成绩(100分)作为学期总成绩；混合式学习学生，线上线下考核独立计分，最终按课程定位确定权重(如本课程采用线上30%+线下70%的比例折算学期总成绩，具体权重根据人才培养方案调整)。

实验报告：增加“创新设计反思”栏目(占报告成绩30%)，要求学生对比标准流程与自主优化方案的差异，分析改进依据(如“为何选择冰水浴冷却结晶？从溶解度曲线角度说明”)。操作考核：设置“突发问题处理”环节(占操作成绩20%)，如模拟“分液漏斗活塞漏液”“加热时溶液暴沸”等场景，观察学生是否能根据知识图谱中的“异常处理”节点快速响应，评估应急决策能力。

线上线下数据打通：通过AI整合线上“知识点掌握热力图”与线下“实验创新指数”(如方案偏离度、数据异常分析深度)，生成能力雷达图，精准定位高阶思维薄弱环节(如“数据分析与实践”能力不足时，自动推送强化任务)。

2.2 虚实融合教学空间的构建与实践

以实践能力培养为核心，构建虚实融合学习空间。依托知识图谱开展线上线下混合式教学，践

行“建以致用”原则，借助智慧教学工具实现规模教育与个性培养结合。教学以问题与案例驱动：课前线上导学熟悉实验；课中线下实验，教师剖析重难点并强化讨论；课后自主诊断，借助拓展资源提升能力。在线课程融入课程思政案例、虚拟仿真实验、化学前沿等内容，结合教师科研方向引入二氧化碳利用、金属催化等前沿知识，既引导学生树立正确价值观，又培养科学精神与创新能力，强化应用型人才培养特色(图5)。

课程学习 > 课程资料

选择排序规则 Q

名称	大小	所属课节	创建人	日期	我的浏览
7 有趣的化学动画	--	--	黄子俊	2023-12-26	
4 化学竞赛	--	--	黄子俊	2023-12-26	
3 化学前沿	--	--	黄子俊	2023-12-26	
2 参考教材	--	--	方正军	2023-08-20	
5 科普类资料	--	--	方正军	2023-08-20	
1 课程思政案例库	--	--	彭倩	2021-05-24	
6 虚拟仿真实验	0KB		黄子俊	2023-12-23	<input type="radio"/>
6 虚拟仿真实验	0KB	1	黄子俊	2023-12-23	<input type="radio"/>

图5 无机化学实验在线课程资料

2.3 基于AI教学助手的个性化学习支持

以AI教学助手为依托，构建个性化学习模式。学生在学习各阶段遇到问题(如“如何判断玻璃仪器洗净”)，可向助手提问。依托知识图谱的语义推理能力，在解答“如何判断玻璃仪器洗净”等具体问题，不仅提供详细的操作步骤解析，还能关联“仪器材质-洗涤原理-安全规范”等扩展知识，实现从“单点解答”到“知识网络拓展”的进阶支持。这种智能化教学形态打破了传统“一刀切”的教学模式，为解决地方高校学生基础差异大、自主学习能力薄弱等现实问题提供了有力的理论支撑。助手整合“知识图谱、问题图谱、能力图谱”及数据库资源精准解答，如解答“摩尔气体常数测定装置组成”后，推荐关联视频、课件或习题(图6)。此外，助手结合能力图谱分析学生课堂表现，为教师提供能力发展参考，辅助制定教学计划。同时，根据学生学习进度与需求，从知识图谱关联资源中推送个性化学习材料，满足差异化学习需求。

以AI教学助手为依托，构建个性化辅导的闭环流程。依托能力图谱的4大主能力(基本实验技能、安全意识、数据分析与实验报告撰写、思考与创新)，采用模糊层次分析(FAHP)模型生成学生能力雷达图。例如，某学生“安全意识”得分低于阈值时，系统自动触发“实验室应急处理”专项学习包，并在课中每10分钟弹出安全规范提示弹窗。建立“知识点掌握度-路径权重”动态矩阵，若学生对“氧化还原反应”掌握度<70%，系统自动将后续“配合物制备”实验的前置知识要求调整为“需复习氧化还原理论”，并插入3个关联微课(权重占比20%)，同时将该知识点的考核权重提升15%。



图6 AI教学助手运用

3 教学效果与改进计划

2023–2024秋季学期,针对开展混合式教学的30个班级,教学团队依托课程知识图谱,推动系统化知识与碎片化资源深度融合,聚焦学生知识、能力与素质协同发展。通过强化过程性评价、学情分析及教学反馈,课堂教学质量显著提升。学生评价:“中学阶段仅接触理论知识,缺乏实验实践,信心不足。线上平台提供预习渠道,借助视频观看与虚拟实验操作,为线下实验积累经验,操作信心大幅提升。”期末评教中亦有学生提到:“线上课堂支持随时随地学习操作视频,不仅提升实验课效率与效果,课后回看功能更助力知识巩固。”

基于知识图谱的混合式教学,有效深化学生对学科关键问题、课程知识体系及关联知识的认知,在专业探究中提升学生对知识图谱重难点、核心知识与能力的搜索及应用能力。教学数据显示,在线课堂问答累计达5.5万人次,知识图谱课程覆盖7所高校,累计浏览量9.3万人次。通过实时追踪3000余名学生的知识点掌握情况,动态优化教学方法与内容,知识点掌握图显示(图7),混合式教学模式下学生在“原理应用”“创新设计”等维度正确率较传统模式提升17%–23%。实验报告质量与实验操作水平量化对比表明(图8),实验报告优良率从传统模式的34%提升至48%,平均分从75.2分提升至82.1分;操作失误率从28次/学时降至16次/学时。实践表明,新模式下学生实验前准备充分,实验中操作规范,实验后收获显著,实验报告质量与实验操作水平均优于传统教学模式。

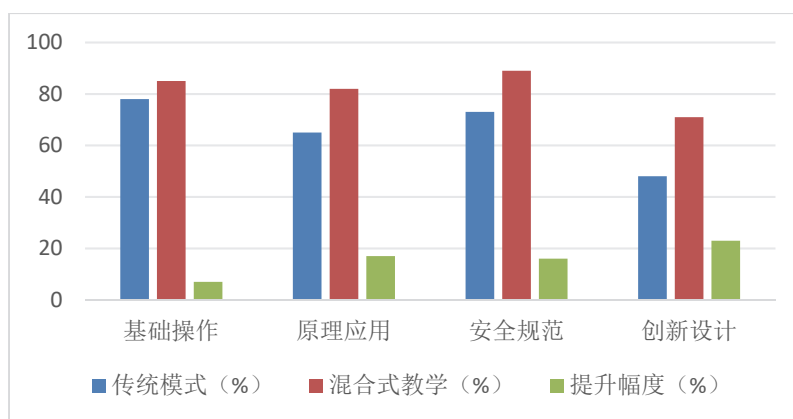


图7 AI教学助手运用

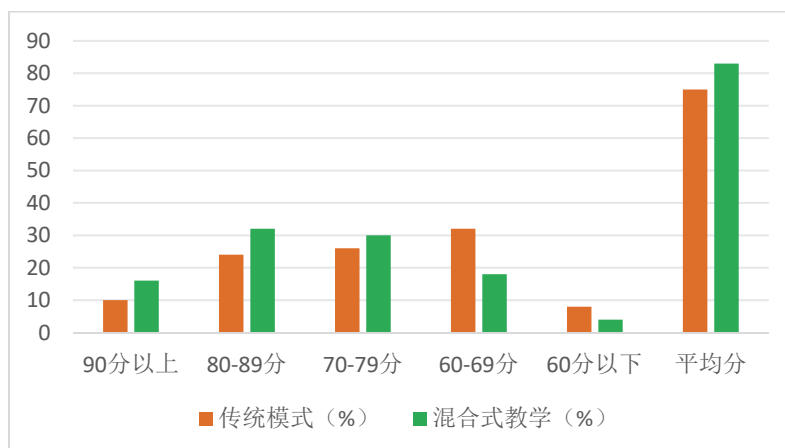


图8 实验报告评分分布对比

教材建设层面,团队已与化学工业出版社签约,启动《无机化学实验》立体化教材编写工作,通过二维码技术融入在线视频、知识图谱、虚拟仿真实验等线上资源,提升教材专业性与交互性,激发学生学习兴趣,提高学习效率与科学素养。

未来改进方向上,项目以无机化学实验知识图谱/AI课程平台为核心,构建多向、多维的实验课程培养体系。借助平台智能系统,结合学生学习反馈与知识掌握情况,定制个性化学习方案,落实“价值塑造、能力培养、知识传授”三位一体育人目标。同时,深化知识图谱应用,推动知识层、问题层、价值层融合;采用多元化实践教学考核机制,以学生为中心强化过程评价,实行“过程评价与结果评价结合”“自我评价与相互评价结合”模式,拓展评价主体(教师、学生、课程),基于综合评价完善实验教学环节,推进教学智能化发展与质量提升。

4 结语

无机化学实验AI课程建设聚焦学习者个性化需求、学习体验与学习效果,形成以下实践成果:其一,依托知识图谱技术整合优质数字化资源,创新性构建无机化学实验AI课程,为教学智能化发展与质量提升提供有效路径;其二,系统化梳理课程知识点及其逻辑关联,以全新方式呈现教学内容,推动教育教学向多元化、多样化方向发展;其三,借助知识图谱/AI课程平台,基于学生学习反馈与知识掌握状态,从知识培养维度规划个性化学习方案,切实提升教学效能与育人质量。

现阶段,知识图谱AI课程在我校无机化学实验混合式教学改革中仍处于探索初期,后续需持续优化知识图谱的层序结构,依据课程反馈的学情精准调整教学内容与活动设计,进一步丰富课程资源、习题及例题设置。AI赋能的无机化学实验教学改革,需经过多轮实践迭代与深度反思,方能实现理想的教学效果。

参 考 文 献

- [1] 何克抗. 电化教育研究, 1997, No. 3, 3.
- [2] 黄子俊, 皮少锋, 陈建芳, 鄂峰, 方正军. 广州化工, 2022, 50 (19), 245.
- [3] 马骁飞, 马亚鲁, 高洪苓. 大学化学, 2021, 36 (2), 2004061.
- [4] 马骁飞, 马亚鲁, 田昀, 秦学, 高洪苓, 刘华姬, 鲁凡丽. 大学化学, 2018, 33 (11), 15.
- [5] 朱伟钢, 马骁飞, 田昀, 刘华姬, 鲁凡丽, 马亚鲁. 大学化学, 2024, 40 (6), 9.

- [6] 李玲, 王国成. 大学化学, **2024**, *40* (6), 1.
- [7] 陈巧芬. 现代教育技术, **2007**, No. 9, 16.
- [8] 李亦菲. 天津师范大学学报(基础教育版), **2004**, No. 4, 55.
- [9] 中共中央、国务院. 中国教育现代化2035. [2025-07-24]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-02/23/content_5367987.htm
- [10] 梁作中, 魏灵灵, 曹译文, 魏韵涵, 史海媚, 郑浩铨, 高胜利. 大学化学, **2024**, *39* (11), 379.
- [11] 叶龚兰, 尹霞, 许峰, 杨鹏, 吴英鹏, 费慧龙. 大学化学, **2024**, *39* (8), 136.