

安息香氧化还原串联实验探究式教学改革研究 ——基于标准化操作与多元过程评价的实践探索

许冰, 张文文, 张培超, 盖聪昊, 柴晓云, 邹燕, 赵庆杰*

海军军医大学(第二军医大学)药理学有机化学教研室, 上海

收稿日期: 2026年8月2日; 录用日期: 2026年9月1日; 发布日期: 2026年9月8日

摘要

针对高校有机化学实验课程中“重操作轻素养、验证模式固化、安全教学薄弱、评价体系单一”等育人短板, 本文以安息香氧化还原综合实验为载体, 构建了完整的串联合成教学方案, 并设计了“问题导入-机理探究-标准化实操-分层变量探究-多元评价”五步探究式教学流程。选取两个平行教学班开展对照教学, 直接采集本实验的过程性评价数据、产物结果报告及课后问卷, 从理论应用、操作规范与探究意识三个维度对比教学成效。实践表明, 标准化探究课堂显著提升了学生的机理理解能力与操作规范性; 60%过程性评价与40%结果性评价相结合的多元体系能切实反映学生综合素养。本方案标准化程度高, 可为同类实验课程改革提供实践参照。

关键词

有机化学实验, 探究式教学, 安息香, 铜盐催化氧化, 多元教学评价

Inquiry-Based Teaching Reform of the Benzoin Oxidation-Reduction Tandem Experiment

—Standardized Operation and Multivariate Process Evaluation in Practice

Bing Xu, Wenwen Zhang, Peichao Zhang, Conghao Gai, Xiaoyun Chai, Yan Zou,
Qingjie Zhao*

Department of Organic Chemistry, School of Pharmacy, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai

Received: August 2, 2026; accepted: September 1, 2026; published: September 8, 2026

*通讯作者。

文章引用: 许冰, 张文文, 张培超, 盖聪昊, 柴晓云, 邹燕, 赵庆杰. 安息香氧化还原串联实验探究式教学改革研究[J]. 教育进展, 2026, 16(9): 424-431. DOI: 10.12677/ae.2026.1691920

Abstract

Aiming at the educational deficiencies in college organic chemistry experiment courses, such as overemphasis on operational skills while neglecting comprehensive literacy, rigid verification based teaching models, insufficient safety education, and unitary evaluation systems, this paper takes the benzoin oxidation reduction comprehensive experiment as the carrier, constructs a complete tandem synthesis teaching scheme, and designs a five step inquiry based teaching process consisting of problem introduction, mechanism discussion, standardized operation, hierarchical variable exploration, and multivariate evaluation. A comparative teaching experiment is conducted between two parallel classes, and the teaching effectiveness is evaluated from three dimensions—theoretical application, operational standardization, and inquiry awareness—by directly collecting process based assessment data, product result reports, and post experiment questionnaires from this experiment. Practice shows that the standardized inquiry based classroom significantly improves students' understanding of mechanisms and operational standardization; the multivariate evaluation system combining 60% process assessment and 40% outcome assessment can effectively reflect students' comprehensive competencies. This scheme is highly standardized and can provide a practical reference for the reform of similar experimental courses.

Keywords

Organic Chemistry Experiment, Inquiry Based Teaching, Benzoin, Copper Salt Catalytic Oxidation, Multivariate Teaching Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 高校有机实验教学改革背景与现实困境

当前,本科化学专业教学质量标准明确要求有机实验课程坚持“学生中心、产出导向”的教育理念,强调操作技能、反应理论、科研创新与安全环保素养的协同培育[1]。然而,国内多数高校的有机化学实验教学仍以固定流程的验证式模式为主导。教师统一规定试剂用量、反应温度与操作步骤,学生机械复刻实验流程,缺乏自主思考与探究空间。理论讲解与实操训练相互脱节,安全规范与绿色化学教育呈现碎片化特征。考核评价过度依赖实验报告与产物收率,过程表现未能纳入评价体系,难以满足创新型化学人才培养的迫切需求。

探究式教学以问题作为导向,引导学生自主思考、动手实验、总结规律,是改变实验课机械照做实验现状的重要方式[2][3]。本教学改革主要依据建构主义学习理论和探究式学习理念开展教学设计。建构主义学习理论认为知识不是靠老师灌输获得,而是学生在真实情境中主动思考构建形成;探究式学习提倡让学生像科研工作者一样,经历提出问题、推理猜想、动手实践、收集证据、分析解释、反思总结完整学习过程。有机化学综合实验正好提供这样真实的学习场景,学生需要结合理论知识解释实验现象、处理产物异常、分析条件带来的影响,实现知识、动手能力与科学素养同步提升。但目前很多高校的探究实验只是简单增加课堂讨论,缺少标准化操作要求、分层学习任务以及配套考核方式,探究学习流于表面[4]-[7]。因此本研究把探究学习各个环节拆解落实到五步课堂流程中,避免探究教学形式化。

1.2. 安息香实验教学的育人价值与现存问题

安息香氧化还原实验是本科有机化学综合实验中的核心项目，兼具氧化、还原两类官能团转化，可串联回流装置搭建、尾气处理、薄层色谱分析、重结晶纯化及立体化学讨论等多个教学模块，综合育人价值突出。然而，当前主流铜盐催化氧化教学体系仍存在四层育人短板：

第一，实操执行标准不统一。铜盐氧化释放 NO_x 有毒尾气，但尾气吸收漏斗高度、装置气密性检查、通风橱操作等均无统一执行准则，不同教师演示标准各异，学生易出现气体泄漏、冲料等安全隐患。硼氢化钠低温加料、酸淬灭及 TLC 点样等关键操作讲解简略，操作失误频发。

第二，教学模式固化。全部实验参数固定，无变量探究任务，学生仅记录现象与收率，缺少图谱分析与异常现象分析训练，科研思维培育严重不足。

第三，理论教学浅层化。仅简单罗列反应方程式，忽略还原立体选择性、分子极性与 TLC 迁移规律、氮氧化物吸收原理等深层理论内容，学生无法建立“结构-反应-操作-表征”的完整逻辑链条。

第四，素养与评价体系不完善。绿色化学、实验室安全及严谨求实科学精神等思政元素渗透不足；单一的终结性评价无法全面衡量学生的操作能力、探究能力与协作能力，教学反馈滞后。

1.3. 研究思路与创新点

本文以统一规范全套实验操作标准为突破口，选用高校广泛使用的醋酸铜-硝酸钠催化氧化体系构建两步串联合成路线，重新设计闭环探究课堂，并配套分层探究任务与过程导向多元评价体系，通过平行班对照教学实证育人成效。研究的创新性主要体现在以下四个方面：一是统一全流程实操规范，补齐安全操作与表征教学短板；二是将验证性实验转化为分层递进探究课题，切实落实学生主体地位；三是构建适配理工科实验的多元过程评价体系，实现育人效果的量化考核；四是将安全、环保与严谨治学等课程思政要素全程融入，促进知识传授与价值引领同向同行。

2. 标准化实验教学体系设计

聚焦于育人目标、统一操作规范与探究式课堂流程的系统设计，旨在为教学改革提供可操作、可复制的实施方案。

2.1. 实验反应体系与分层育人目标

2.1.1. 教学反应路线

实验采用两步串联合成路线：第一步，安息香在醋酸铜-硝酸钠-冰醋酸体系中催化氧化， α -羟基脱氢氧化生成共轭二苯乙二酮，反应过程中持续产生 NO 、 NO_2 酸性尾气，配套碱液尾气吸收实操训练；第二步，在冰水浴条件下以硼氢化钠选择性还原安息香羰基，亲核试剂优先从空间位阻更小、与苯基相反的一侧进攻羰基平面，主要生成赤-1,2-二苯乙二醇。全程以 TLC 薄层色谱实时监测反应终点，训练学生对物质极性判断、 R_f 值计算及色谱图解读等基础科研技能。

2.1.2. 三维分层育人目标

(1) 知识目标：掌握 α -羟基酮选择性氧化与羰基亲核加成还原的基本机理；理解 TLC 极性迁移规律及氮氧化物碱液吸收机理；能够对比硝酸氧化与铜盐催化氧化两套传统方案在安全性和环保性方面的差异。

(2) 能力目标：熟练完成回流尾气装置搭建、低温控温加料、过量还原剂酸淬灭、混合溶剂重结晶及 TLC 全套标准化操作；具备自主探究反应条件、分析图谱与解释实验异常现象的基础科研能力。

(3) 素养目标：树立实验室安全操作与绿色化学减量减排意识；培养严谨求实、独立思考与小组协作

的科学品质，有效落实立德树人的课程思政要求。

2.2. 统一标准化实操规范

从安全操作、还原控制与色谱表征三大模块明确统一操作标准：

(1) 铜盐氧化尾气安全规范：回流冷凝管上端连接三角漏斗尾气吸收装置，漏斗 1/4 露出液面、3/4 浸没于 10% 氢氧化钠吸收液中；实验前全面检查磨口连接处的气密性，全程在通风橱内操作；若出现红棕色 NO_2 泄漏，应立即停止加热并调整漏斗高度。

(2) 硼氢化钠还原控温淬灭规范：冰水浴控制反应体系温度不超过 25°C ，在搅拌状态下分批缓慢加入还原剂，防止局部过热分解释放大氢气导致体系喷溅；反应结束后在冰浴条件下加水稀释，缓慢滴加稀盐酸至中性，彻底分解过量硼氢化钠，严格控制酸度以避免产物醚化副反应。

(3) 薄层色谱标准化教学模块：距薄层板底边 0.5 cm 处绘制基线，原料、产物与共点分别点样，斑点直径不超过 2 mm；氧化反应展开剂为石油醚:乙酸乙酯 = 4:1，还原反应展开剂为石油醚:乙酸乙酯 = 1:1；溶剂前沿距板顶端 0.5~1 cm 时取出，于 254 nm 紫外灯下标记斑点并计算 R_f 值。明确极性排序：1,2-二苯乙二醇 > 安息香 > 二苯乙二酮，直观验证分子极性与其在硅胶吸附层析中迁移行为的内在关联。

2.3. 五步闭环探究式教学流程

摒弃传统“预习 - 操作 - 写报告”的单向教学模式，基于探究式学习理论设计完整的课堂闭环(图 1)。

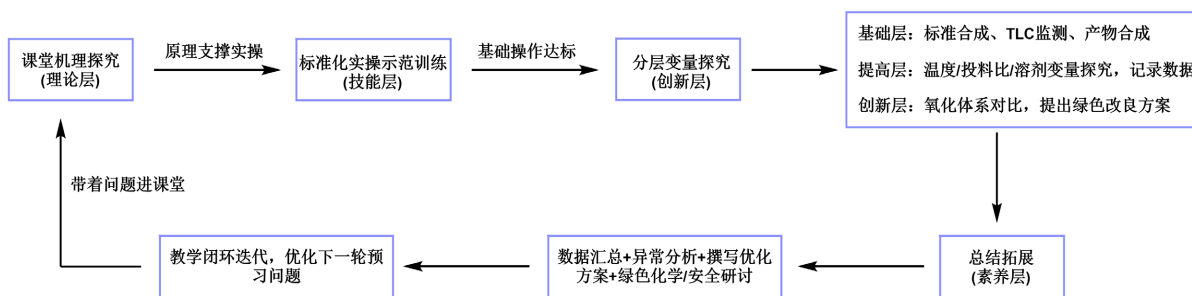


Figure 1. Closed-loop classroom process of inquiry-based learning

图 1. 探究式学习课堂闭环流程

(1) 课前问题导入(预习层)：布置预习思考题，如：铜盐氧化为何产生红棕色气体？尾气漏斗不能完全浸没液面的原因何在？硼氢化钠加料为何必须采用冰水浴控温？三种产物 TLC 的 R_f 差异由分子的何种官能团决定？学生提前查阅资料，带着问题进入课堂，实现从被动接受向主动求知转变。理论对应：对应探究学习的提出问题环节，通过预习思考题激发学生思考，制造认知疑问，为课堂学习打好基础，体现建构主义情境化学习的思路。

(2) 课堂机理探究(理论层)：教师结合示意图拆解铜盐循环催化氧化与还原立体选择性机理，横向对比浓硝酸氧化与铜盐催化氧化在试剂消耗、污染程度及操作难度等方面的差异，将每一项操作规范与相应化学原理相对应，有效打通理论与实操之间的壁垒。理论对应：对应探究学习的推理猜想环节，帮助学生结合反应原理预判实验现象，明白每一步操作背后的道理，改变只会做实验、不会思考的问题。

(3) 标准化实操示范训练(技能层)：教师依照统一标准分步演示回流尾气装置搭建、TLC 操作流程，现场纠正漏斗浸没不当、TLC 点样过大、还原剂一次性加入等高频错误；学生分组实操，助教巡回指导，实时规范操作细节。理论对应：对应探究学习的动手实施环节。统一的操作标准不是让学生机械模仿，

而是保障后续自主探究得到的数据真实可信。

(4) 分层变量探究(创新层):

基础层: 完成标准氧化与还原合成, 规范进行 TLC 监测与产物提纯, 夯实基础操作技能;

提高层: 自主探究氧化温度、硼氢化钠投料摩尔比及重结晶溶剂比对产物收率与纯度的影响, 完整记录多组实验数据;

创新层: 对比浓硝酸氧化与铜盐催化氧化体系在污染程度、成本及操作难度方面的差异, 提出绿色改良方案。

理论对应: 对应探究学习收集实验证据环节。分层任务适配不同学习水平学生, 让每位学生都可以依靠实验现象和数据开展学习。

(5) 总结拓展(素养层): 小组汇总 TLC 图谱及收率数据, 分析实验异常现象, 撰写简易优化方案, 交流绿色化学与实验室安全相关学习感悟, 实现知识内化与素养提升的有机统一。理论对应: 对应探究学习分析解释、反思拓展环节, 学生依靠自己得到的实验结果分析问题, 小组交流讨论, 巩固所学知识, 提升科学素养。

2.4. 多元过程导向教学评价体系

构建“60%过程性评价 + 40%结果性评价”的双维度考核标准(图 2), 全部评价指标依托统一操作规范设定, 有效弥补单一终结性评价的缺陷:

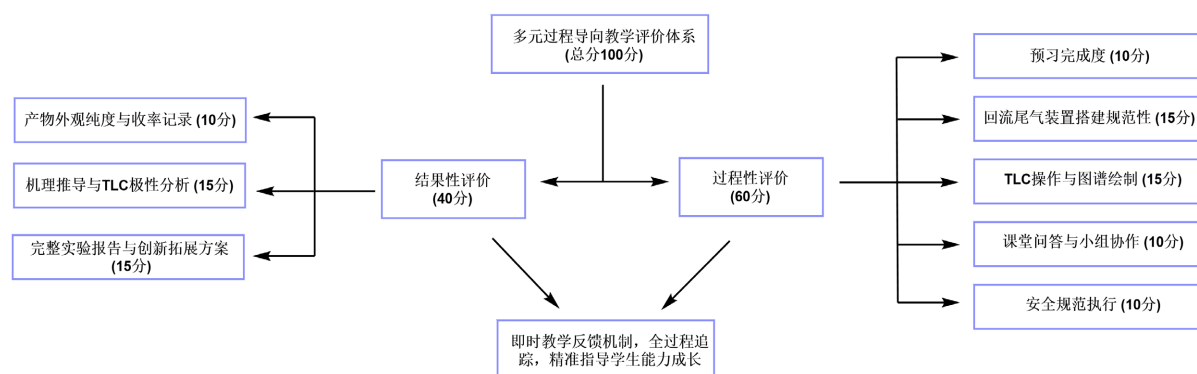


Figure 2. Composition of the multivariate process-oriented teaching evaluation system

图 2. 多元过程导向教学评价体系构成

(1) 过程性评价(60%): 预习完成度占 10%, 回流尾气装置搭建规范性占 15%, TLC 操作与图谱绘制占 15%, 课堂问答与小组协作占 10%, 安全规范执行占 10%;

(2) 结果性评价(40%): 产物外观纯度与收率记录占 10%, 机理推导与 TLC 极性分析占 15%, 完整实验报告与创新拓展方案占 15%。

课堂中实时对照操作标准纠正学生操作错误, 课后针对报告、图谱及数据问题进行一对一反馈, 建立即时教学反馈机制, 实现对学生能力成长的全过程追踪与精准指导。

3. 教学实施与育人成效实证分析

3.1. 教学实践对象与分组方案

选取本校化学专业两个平行教学班开展对照教学, 其中实验组 22 人, 对照组 20 人, 总共有 42 名学生参与研究。开展教学前对比两个班级学生的有机化学理论课和基础实验课成绩, 整体水平相近, 具备

开展对比教学的条件。对照组采用传统验证式教学(固定参数、仅依据产物收率与实验报告评价);实验组执行标准化探究流程(分层任务 + 多元过程评价)。

本研究收集三类材料用于教学效果分析:一是课堂上教师和助教按照统一标准记录的学生实验操作得分;二是实验产物、实验报告等实验成果材料;三是课后调查问卷。实验相关数据使用 SPSS 26.0 软件处理,两组学生的分数对比采用独立样本 t 检验,计数类结果采用卡方检验,以 $p < 0.05$ 作为判断效果是否存在明显差异的标准。

课后调查问卷围绕理论掌握、实操收获、探究思维、课程认同 4 个方面设计,包含 16 道程度评价题和 3 道主观开放问答题。问卷参考国内已有的化学实验教学调研问卷,结合安息香氧化还原串联实验的课堂实际情况调整改编,确保问卷内容贴合本次教学改革的评价目标,问卷整体和各分项题目均有较好可靠性。问卷采用匿名作答,课后现场发放、当场回收,问卷有效回收率 100%。本研究主要从理论应用(反应机理与薄层色谱极性分析)、操作规范(装置搭建与 TLC 实操)、探究意识(条件变量分析和实验异常现象解析)三个维度,对比两种教学模式的实际教学效果。

3.2. 教学成效对比

(1) 理论应用与逻辑分析能力:实验组学生在实验报告中,对反应机理、薄层色谱极性规律分析的平均得分率为 $89.7\% \pm 7.2\%$,对照组为 $62.3\% \pm 11.5\%$,统计分析显示两组存在显著差异($t = 9.26, p < 0.001$)。绝大多数实验组学生能自主解释尾气吸收、低温加料等操作背后的理论逻辑,对照组则多仅能复述步骤。

(2) 实操规范程度:在尾气处理装置搭建、TLC 点样、硼氢化钠淬灭这些关键操作中,实验组学生操作扣分率为 $10.2\% \pm 4.1\%$,对照组扣分率为 $43.1\% \pm 9.6\%$,实验组扣分率较对照组相对下降 76.4%,两组差异明显($t = 14.01, p < 0.001$)。统一标准有效消除了操作偏差,安全隐患显著减少。

(3) 科研探究意识:在变量探究环节中,86.2% (19/22) 的实验组学生能独立完成数据记录与异常现象分析,而对照组仅 31.5% (6/20) 能提出基本的优化思路,卡方检验表明两组存在统计学差异($\chi^2 = 12.47, p < 0.001$)。

(4) 教学认同度:课后问卷显示,92.5% (20/22) 的实验组学生认可探究式教学对创新思维的提升作用。

3.3. 铜盐氧化体系的教学优劣势育人对比

铜盐催化氧化相较于传统浓硝酸氧化,尽管仍产生少量 NO_x 尾气,但展现出独特的教学育人价值,具体对比见表 1。

Table 1. Comparison of teaching effects between two oxidation systems

表 1. 两种氧化体系教学效果对比

对比维度	浓硝酸直接氧化体系	铜盐催化氧化体系(本文教学方案)	教学育人优势
安全风险	大量高浓度 NO_x 废气,强腐蚀性	少量氮氧化物,配套尾气吸收训练载体	完整开展废气处理安全实操教学
试剂消耗	大量浓硝酸,成本高昂	催化量醋酸铜,试剂用量显著减少	有效渗透绿色化学减量理念
操作复杂度	装置简单,无配套尾气处理结构	回流 + 尾气吸收全套装置	丰富综合动手操作训练内容
副产物控制	副产物多,提纯耗时较长	副产物少,产物纯度稳定	节省课堂时间,预留充分探究时长

4. 传统有机实验教学现存教育问题分析

4.1. 实操教学缺乏统一执行标准，技能育人难以落地

由于缺少统一的操作准则作为教学基准，不同教师的讲解与演示标准存在差异，尾气吸收、还原剂控温等安全关键步骤讲解简略。学生仅能机械模仿操作流程，安全规范与标准化操作素养的培育流于形式，实验室操作事故时有发生。

4.2. 验证式教学模式固化，违背学生主体教育理念

传统实验全部参数固定，学生缺乏自主变量设计、数据分析与方案优化的空间。课堂以教师单向讲授为主，忽视学生自主探究的内在需求，难以培育创新思维与独立科研能力，与新时代创新人才培养的目标不相适应。

4.3. 理论与实操相割裂，知识传授停留于浅层

教学重心过度集中于操作流程的记忆，弱化了立体化学、色谱极性及尾气吸收等理论关联的讲解。学生难以形成“结构-反应-操作-表征”的完整知识逻辑，理论知识无法有效指导实操，知识内化效果较差。

4.4. 绿色安全素养与课程思政渗透不足

传统硝酸氧化体系污染严重且具有腐蚀性，课堂缺乏系统的废气废液处理及化学品减量等绿色化学教学内容。实验仅关注产物收率结果，忽略严谨求实、安全规范与责任意识等思政元素的融入，导致学生综合化学素养发展不均衡。

4.5. 单一终结性评价难以全面衡量育人成效

仅依靠实验报告与产物收率开展考核，忽视了课堂装置搭建、图谱绘制、小组探究及问题应答等过程表现。教学反馈滞后，教师难以精准定位学生的能力短板，教学调整缺乏量化数据支撑。

5. 标准化导向下探究式教学优化策略

5.1. 统一全流程实操标准，打通理论与实操育人壁垒

建立整套统一实验操作规范，在课堂同步教学中将反应机理、实操要求与安全准则有机结合。以分子结构与电子转移为切入点，串联氧化还原、色谱分析等知识点，构建完整知识体系。

5.2. 分层设计探究任务，落实以学生为中心的教学理念

将单一验证性实验拆解为基础、提高、创新三个递进层次的探究任务，适应不同学习水平学生的差异化需求。引导学生自主设计变量实验、对比不同氧化体系的优劣，将被动复刻操作转化为主动探究分析，充分发挥学生课堂主体地位，激发深层学习动机。

5.3. 依托实验载体全程渗透绿色化学与课程思政

以铜盐氧化尾气吸收、催化试剂减量与实验废液分类处理为抓手，系统开展绿色化学与实验室安全教育[8][9]。引导学生对比新旧氧化体系在污染程度上的差异，感悟化学科研中安全、环保与严谨求实的科学精神，实现知识传授、能力培养与价值引领的同步推进。

5.4. 完善多元过程评价体系，建立即时教学反馈机制

坚持过程性与结果性双维度考核，将实操规范、图谱分析与课堂探究纳入核心评分指标[10]。课堂中

实时对照统一操作标准纠正学生操作错误,课后针对报告、图谱及数据问题进行一对一反馈,精准补齐学生的知识与能力短板,实现全过程追踪育人,为教学持续改进提供数据支撑。

6. 总结与教学展望

6.1. 改革总结

本文以安息香铜盐催化氧化-还原串联实验为教学载体,建立了统一标准化操作流程,重构了五步探究式教学流程,完善了尾气吸收、薄层色谱等全套实操教学模块,并构建了多元过程导向评价体系。平行班对照教学实证表明,该改革方案有效解决了传统有机实验“重技能、轻素养、模式固化、评价单一”的育人痛点,显著提升了学生在理论理解、规范操作、自主探究与绿色安全等方面的综合素养。整套教学方案标准化程度高、可复制推广性强。

6.2. 教学拓展展望

本次教学改革实践仅在本校开展,参与学生数量有限,这套教学方案直接应用到其他不同类型院校还存在一定局限。后续计划扩大参与学生规模,进一步检验本教学方案的适用效果。后续教学改革还可在现有标准化操作体系基础上进一步拓展育人维度:结合线上虚拟仿真平台开展尾气吸收及硼氢化钠危险操作等环节的课前预习,构建虚实结合的立体化教学模式;引入微型化实验以进一步降低试剂用量,深化绿色化学教学内涵[11][12];持续完善实验统一操作规范,全方位落实创新型化学专业人才培养目标。

致 谢

本文相关教学改革实践依托海军军医大学校级精品课程立项培育项目-有机化学 II、海军军医大学教学改革重点项目:AI 赋能的《有机化学》助教系统的探索与实践资助完成,在此向项目主管单位表示感谢。

参考文献

- [1] 张树永,惠新平,李厚金,等. 高等学校化学类专业有机化学实验教学内容与教学要求建议[J]. 大学化学, 2026, 41(3): 10-22.
- [2] 张毅军. “行动导向教学”在高校有机化学实验中的应用[J]. 广州化工, 2011, 39(13): 181-182.
- [3] 孙宏,都雪. 探究式教学方法在有机化学实验中的应用[J]. 高师理科学刊, 2013, 33(6): 112-114.
- [4] 李厚金,陈六平. 有机化学实验教学中学生科学探究能力的培养[J]. 大学化学, 2018, 33(10): 13-17.
- [5] 任家强,王薇,周宝晗,等. 工科基础化学实验课程过程性评价体系的构建与实践[J]. 化学教育(中英文), 2024, 45(6): 23-29.
- [6] 朱洁莲,储鸿,刘湘,等. 探究式教学法在有机化学综合实验教学中的应用[J]. 实验室科学, 2023, 26(3): 133-137.
- [7] Mitra, A.K. (2026) Reimagining Organic Chemistry Laboratories: A Review of Modern Pedagogical Approaches. *Journal of Chemical Education*, **103**, 1225-1237. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5c00663>
- [8] 杜欣,王天泽,陈渡文. 基于绿色化学理念的苯甲醛与安息香的相互转化[J]. 大学化学, 2020, 35(4): 19-26.
- [9] 宋明芝,范传刚,解胜利. 有机化学实验绿色化教学改革与实践[J]. 广东化工, 2012, 39(2): 227-228.
- [10] 郭玲香,杨洪,王猛,等. 有机化学实验课程过程性评价体系的设计与实践[J]. 化工高等教育, 2023, 40(3): 55-60.
- [11] 徐攀攀,许会艳. 高校基础化学实验绿色化初探[J]. 山东化工, 2019, 48(15): 218-219.
- [12] 付引霞,李晓芳. 有机化学实验半微型化改革探索[J]. 实验室科学, 2018, 21(3): 38-40.