DOI：10.19789/j.1004-9398.2026.02.013　　**Open Access**
文献引用：张璐莹，卢思嫄，薛雨婷，等．吡啶离子液体绿色化学催化剂设计及教学实践：乙酸乙酯合成实验中的创新能力培养［J］．首都师范大学学报（自然科学版），2026，47（2）：86-93. ZHANG L Y，LU S Y，XUE Y T，et al. Design and teaching practice of pyridine ionic liquid green chemical catalysts：cultivation of innovation ability in the synthesis experiment of ethyl acetate［J］. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2026，47（2）：86-93.

吡啶离子液体绿色化学催化剂设计及教学实践：乙酸乙酯合成实验中的创新能力培养*

张璐莹，卢思嫄，薛雨婷，杨　莹，王　前，方　玉，李　凯，郑婷婷**

（首都师范大学化学系，北京　100048）

摘要：针对乙酸乙酯传统合成工艺中使用浓H_2SO_4作为催化剂所引发的设备腐蚀、废酸污染以及副反应难以控制等问题，本研究开发了一种N-丁基吡啶溴盐离子液体的绿色催化体系，并构建了“离子液体催化-探究型实验”双驱动教学模式。以正溴丁烷为原料，通过吡啶季铵化反应合成N-丁基吡啶溴盐离子液体，并利用红外光谱和核磁共振氢谱技术确定其结构；通过调整反应温度、时间和催化剂用量，研究了该催化体系的催化活性、选择性及循环稳定性。结果表明：当15 mmol离子液体、135 ℃反应90 min时，产率为52.3%，且催化剂能稳定循环使用5次；优化后的催化体系在产物产率、纯度以及催化剂的循环使用性能方面均优于传统工艺，且催化剂的分离回收过程简便，有效减轻了环境污染。在教学方面，采用“分子设计-工艺革新-教学重构”的方法，引导学生设计离子液体催化剂替代浓H_2SO_4，实现乙酸乙酯的绿色合成；通过优化反应条件，掌握多变量调控与谱图分析方法；重构探究性实验流程，提升实验设计能力与绿色化学认知，推动传统实验向综合性、创新性教学转型。本研究不仅实现了实验工艺的绿色升级，更将科研成果融入教学实践，帮助学生构建系统化科研思维，为化学实验课程改革提供了可推广的新路径。

关键词：吡啶离子液体；乙酸乙酯；有机化学实验；创新能力培养；绿色化学
中图分类号：O621　　**文献标志码**：A

Design and teaching practice of pyridine ionic liquid green chemical catalysts：cultivation of innovation ability in the synthesis experiment of ethyl acetate*

ZHANG Luying，LU Siyuan，XUE Yuting，YANG Ying，WANG Qian，FANG Yu，LI Kai，ZHENG Tingting**

（Department of Chemistry，Capital Normal University，Beijing　100048）

Abstract：Addressing the issues of equipment corrosion，waste acid pollution，and difficult-to-control side reactions caused by the use of concentrated H_2SO_4 as a catalyst in the traditional synthesis process of ethyl acetate，this study developed a green catalytic system of N-butylpyridinium bromide ionic liquid and established a “ionic liquid catalysis-inquiry experiment” dual-drive teaching model.

收稿日期：2025-04-23
*首都师范大学关于人工智能赋能课程建设项目
**通信作者：zhengtt@cnu.edu.cn

Using *n*-bromobutane as a raw material, N-butylpyridinium bromide ionic liquid was synthesized through the quaternization reaction of pyridine, and its structure was determined using infrared spectroscopy and proton nuclear magnetic resonance technology. By adjusting the reaction temperature, time, and amount of catalyst, the catalytic activity, selectivity, and cyclic stability of this catalytic system were studied. The results showed that when 15 mmol of ionic liquid reacted at 135 ℃ for 90 min, the yield was 52.3%, and the catalyst could be stably recycled 5 times. The optimized catalytic system was superior to the traditional process in terms of product yield, purity, and cyclic usability of the catalyst, and the separation and recovery process of the catalyst was simple, effectively reducing environmental pollution. In teaching, the method of "molecular design-process innovation-teaching reconstruction" was adopted to guide students in designing ionic liquid catalysts to replace concentrated H_2SO_4 and achieve green synthesis of ethyl acetate. By optimizing reaction conditions, mastering multivariable regulation and spectrum analysis methods. Reconstructing inquiry experimental procedures, enhancing experimental design capabilities and green chemistry cognition, and promoting the transformation of traditional experiments to integrated, innovative teaching. This study not only realized the green upgrade of experimental processes, but also integrated scientific research achievements into teaching practice, helping students build systematic scientific research thinking, providing a new path that can be promoted for the reform of chemistry experimental courses.

Keywords: pyridine ionic liquid; ethyl acetate; organic chemistry experiments; innovation ability training; green chemistry

CLC: O621　　**DC**: A

0　引　言

随着绿色化学理念的普及,传统实验教学中高污染、高能耗的合成工艺已难以满足新时代化学人才培养的需求。推动实验课程的绿色化转型,已成为化学教育改革的重要方向[1-3]。乙酸乙酯合成实验是国内外高校广泛开设的经典有机化学实验之一,具有操作典型、原理清晰、与理论课程联系紧密等特点,在训练学生蒸馏、回流和干燥等基本操作技能方面长期发挥着重要作用。然而,该实验以浓H_2SO_4作为催化剂,存在诸多问题[4-7]:(1)安全隐患突出,浓H_2SO_4具有强腐蚀性,操作不当易引发灼伤等安全事故,给教学过程带来较大风险;(2)副反应多、产率低,反应过程中易发生脱水、氧化等副反应,导致产物复杂、实验结果重复性差,学生普遍反映产率偏低;(3)不符合绿色化学理念,反应结束后产生大量酸性废液,处理困难,不符合绿色化学"减少或消除有害物质使用与排放"的基本原则。在传统教学模式下,学生多采用"照方抓药"的方式进行实验,缺乏对催化剂设计原理、工艺优化方法的深入探究,难以真正理解绿色化学的核心理念。若能将验证性实验转化为探究性实验,将有助于提升学生的科学思维和创新能力[8]。

近年来,离子液体因其可设计的酸性位点、高催化活性、良好的热稳定性及可循环利用等特性,成为绿色化学领域的研究热点[9-12]。已有部分研究尝试将其引入教学实验中,以替代传统强酸催化剂,取得了一定成效[13-14]。尽管这些研究为教育领域提供了宝贵的经验,但目前有关离子液体用于乙酸乙酯合成的教学实验改革尚未见详细报道。具体来说,现有文献主要集中在验证离子液体作为催化剂的有效性和优越性,但缺乏针对本科生实验课程的系统性教学设计。本文首先拟设计一种结构简单、易于合成与回收的N-丁基吡啶溴盐离子液体催化剂,使学生能够在课堂时间内完成其制备与结构表征;其次构建探究性实验框架,引导学生自主设计实验方案,探究催化剂用量、反应温度等参数对产率的影响,并分析产物纯度;最后引入催化剂回收与再利用环节,增强学生对绿色化学理念的理解与实践能力。旨在通过引入离子液体这一绿色催化材料,推动乙酸乙酯合成实验从"验证型"向"探究型"转变,提升实验教学的科学性与创新性,为绿色化学教学改革提供可推广的实践范例。

1　实验设计

1.1　实验目的

(1)掌握离子液体的基本概念及应用领域;(2)学习并理解离子液体的制备原理与技术;(3)熟练掌握催化合成乙酸乙酯的实验原理和操作流程;(4)精通回流、蒸馏和气体回收干燥等基础实验技能;(5)熟悉红外光谱和核磁共振谱图的解析方法;(6)熟练操作气相色谱仪。

1.2　实验原理

(1)离子液体制备。以有机阳离子吡啶类和无机阴离子Br^-组成的离子液体N-丁基吡啶溴盐作为催化剂,反应式见图1。吡啶结构中的氮原子含有未参与共轭的一对电子,赋予了其一定的亲核能力,从而表现出碱性,这使得吡啶能够与强酸反应生成相应的盐,也能与卤代烃或酰卤发生亲核反应生成季铵盐[15-18]。

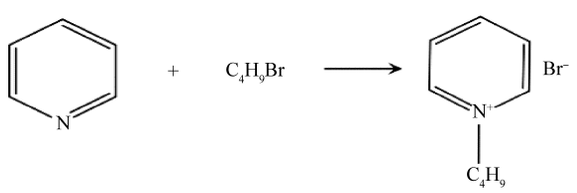


图1　N-丁基吡啶溴盐的制备原理

Figure 1　the principle of preparing N-butylpyridinium bromide

(2)乙酸乙酯制备。酯化反应为可逆反应,为了增加正反应产物乙酸乙酯的产量,通常会加入过量的反应试剂(如过量酸或过量醇)[19-20]。本实验采用加入过量醇的方法,其反应见图2。

1.3　实验设计及教学安排

学生分别采用离子液体和浓H_2SO_4作为催化剂合成乙酸乙酯,计算产率、检测副产物和回收催化剂的实验,并比较2种催化剂在反应效率和环境友好性方面的差异。

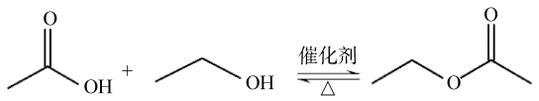


图2　乙酸乙酯的制备原理

Figure 2　preparation principle of ethyl acetate

实验核心内容及能力提升列于表1。整个实验分为3次进行,每次6学时,包括:第1次实验,制备N-丁基吡啶溴盐离子液体;第2次实验,表征离子液体N-丁基吡啶溴盐,并设定气相色谱的分析条件;第3次实验,通过调节反应时间、温度和催化剂的用量,分组使用离子液体催化合成乙酸乙酯,并与浓H_2SO_4比较催化效果,最后得出结论并撰写实验报告。

2　实验部分

2.1　试剂

分析纯吡啶购自中国医药集团有限公司;分析纯的正丁醇、95.0%乙醇、冰醋酸、异戊醇、98.0%H_2SO_4、无水NaBr、NaCl、NaOH、$NaHCO_3$、无水$CaCl_2$和无水$MgSO_4$均购自北京市通广精细化工公司。实验用水均为超纯水。

2.2　仪器

使用天津欧诺仪器股份有限公司生产的EMS-50电加热磁力搅拌器搅拌溶液;使用美国尼高乐公司公司生产的IR200型傅立叶红外光谱仪测量溶液红外吸收光谱;使用美国Varian公司生产的600 MHz核磁共振波谱仪测定化合物氢谱;使用上海一恒科学技术有限公司生产的真空干燥箱干燥固体,以40 ℃/min,升温3 min,160 ℃保持5 min;使用巩义市予华仪器有限公司生产的SHZ-DIII型循环水真

表1　实验核心内容及能力提升

Table 1　experimental core content and capability enhancement

实验	主要内容	理论知识	实验操作	能力提升	课时/学时
第1次	合成N-丁基吡啶溴盐离子液体	亲核取代反应	回流、蒸馏、萃取、液体干燥、气体回收、抽滤和真空干燥等	训练学生基础有机合成实验的操作能力,培养学生的绿色环保意识	6
第2次	表征离子液体,设定气相色谱条件	红外光谱、核磁共振氢谱、气相色谱的分析	制作表征样品,测定红外光谱、核磁共振氢谱,优化气相色谱条件	锻炼学生常用仪器操作能力,能够识谱、解谱和分析谱图	6
第3次	优化离子液体的催化效果及实验条件	综合能力	准备催化剂、控制反应过程、分离与纯化产物、分析气相色谱、数据处理与结果比较	通过自主设计实验、分析数据与优化条件,培养学生提出问题、分析问题和解决问题的科研思维能力	6

空泵进行减压操作。

使用北京东西分析仪器有限公司生产的GC-4000A型气相色谱仪检测乙酸乙酯,载气压力为0.3 MPa、汽化室温度为200 ℃、氢焰温度为200 ℃,程序升温为35 ℃保持2 min、以15 ℃/min升温3 min、80 ℃保持3 min。

2.3　正溴丁烷制备

在50 mL圆底烧瓶上安装回流冷凝管,连接气体吸收装置,使用5.0%NaOH溶液吸收气体。加入7.0 mL H_2O和9.4 mL浓H_2SO_4,混合后冷却至室温;加入6.2 mL正丁醇和8.70 g NaBr,震荡后加入磁子,回流30~40 min;冷却后,更换装置蒸馏,得到粗产物正溴丁烷馏出液。

将馏出液转移到分液漏斗,水洗涤;再转移到另一个干燥分液漏斗,浓H_2SO_4洗涤;有机相用等体积水、饱和$NaHCO_3$溶液和水洗涤,转移到干燥锥形瓶;用约1.00 g无水$CaCl_2$干燥,摇动至清澈透明;过滤至蒸馏瓶,加热蒸馏,收集99~103 ℃馏分。

2.4　N-丁基吡啶溴盐离子液体制备

在50 mL圆底烧瓶中加入10.50 g吡啶和10.00 g正溴丁烷,然后将其置于电加热磁力搅拌器中;加热回流45 min后,停止加热,并更换为蒸馏装置,蒸馏出多余的正溴丁烷,得到红棕色液体;在室温下结晶,通过减压过滤得到褐色晶体;将离子液体转移到50 mL烧杯中,保鲜膜密封,用针均匀地扎几个小孔后放入真空干燥箱中干燥24 h。取出称质量,计算产率。

2.5　乙酸乙酯合成

在50 mL圆底烧瓶中加入7.2 mL冰醋酸、11.5 mL乙醇和3.24 g离子液体,混合均匀后加热至135 ℃,回流90 min;冷却后蒸馏得到粗产物乙酸乙酯。向粗产物中加入饱和$NaHCO_3$水溶液至无气泡产生,用pH试纸测试至中性;将混合物转入分液漏斗,分离水相,有机相用饱和NaCl溶液和$CaCl_2$溶液洗涤,干燥后过滤;将干燥的粗乙酸乙酯放入50 mL蒸馏瓶中,蒸馏收集馏分。

2.6　乙酸乙酯检测

在50 mL圆底烧瓶中加入7.2 mL冰醋酸和11.5 mL乙醇,迅速加入3.24 g离子液体,混合均匀后加入磁子,装上回流冷凝管,加热回流90 min;过滤离子液体,气相色谱检测产物溶液。准确称取梯度质量为3.00~7.00 g乙酸乙酯,为提升检测准确性,引入异戊醇作为内标物,即分别加入1.00 g异戊醇配制标准系列。以乙酸乙酯和异戊醇质量比为横坐标,乙酸乙酯和异戊醇的峰面积比为纵坐标,建立标准曲线,以定量分析样品中酯的含量。

2.7　反应条件优化

采取控制变量法分别探究催化剂用量、反应温度和反应时间对产率的影响。在50 mL圆底烧瓶中,以7.2 mL冰醋酸和11.5 mL乙醇为原料。

(1)催化剂用量。在上述烧瓶中分别加入2.16、2.70、3.24、3.78和4.32 g离子液体,对应物质的量为10.0、12.5、15.0、17.5和20.0 mmol,混合均匀后加入磁子,装上回流冷凝管,观察反应回流速度,通过热电偶控制温度为135 ℃,加热回流90 min后,停止加热,用差量法称取1.00 g异戊醇加入反应液中,混合均匀后,取1.0 μL产物溶液,检测分析。

(2)反应温度。以3.24 g催化剂,热电偶控制温度分别为130、135、140、145和150 ℃,重复上述实验。

(3)反应时间。以3.24 g催化剂、反应温度为135 ℃,加热回流时间分别为60、75、90、105和120 min,重复上述实验。

2.8　对比实验

以无催化剂的空白实验和催化剂分别为离子液体、浓H_2SO_4实验,对比催化效果。

(1)空白实验。不添加催化剂,重复2.5节的步骤,无催化剂时反应几乎不进行,产物极少,且避免后续酸性样品腐蚀气相色谱仪的毛细管柱,称量乙酸乙酯的质量,并计算产率。

(2)浓H_2SO_4为催化剂。以4.0 mL浓H_2SO_4为催化剂,重复2.5节的步骤,因浓H_2SO_4为催化剂时,产物中不可避免会有残留酸性物质,其腐蚀气相色谱仪的毛细管柱,因此称量乙酸乙酯的质量,计算产率。

(3)离子液体为催化剂。计算2.7节条件优化后乙酸乙酯的产率。

2.9　离子液体回收实验

首先,通过减压蒸馏实验(温度为80~100 ℃,压力为20~30 mmHg)去除反应体系中的乙酸乙酯及未反应的乙酸、乙醇;其次,室温下静置蒸馏液,使离子液体结晶析出,并用少量乙醚洗涤晶体;再次,在60 ℃下真空干燥晶体2 h;最后,红外光谱表征回收的离子液体,验证稳定性并评估是否适合再次使用。

3　实验结果

3.1　结构表征

离子液体的红外光谱如图3所示。3 080 cm^{-1}是吡啶环中C—H的伸缩振动吸收峰,697和1 170 cm^{-1}分别为吡啶环C—H的变形振动吸收峰和弯曲振动吸收峰;2 950和2 870 cm^{-1}为脂肪链中C—H不对称伸缩振动峰;797 cm^{-1}为吡啶环上的C—C伸缩振动峰;1 630 cm^{-1}为吡啶环中C═C的伸缩振动峰;1 480 cm^{-1}为吡啶环中的C═N伸缩振动峰。可确定产物为N-丁基吡啶溴盐离子液体。

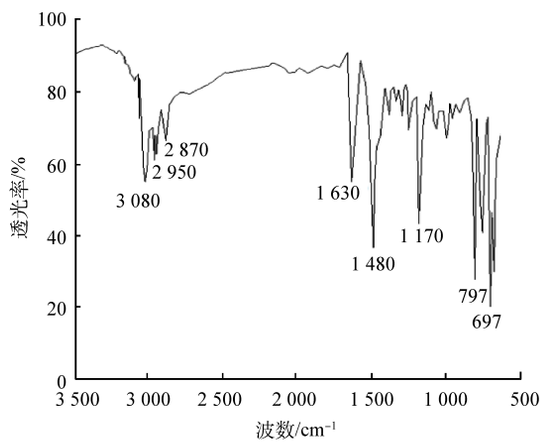


图3　N-丁基吡啶溴盐离子液体的红外光谱

Figure 3　infrared spectroscopy of N-butylpyridinium bromide

离子液体的核磁共振氢谱如图4所示。在低场区9.66 ppm(双峰,2H)、8.54 ppm(三重峰,1H)及8.23 ppm(三重峰,2H)分别归属为吡啶环邻位(H2、H6)、对位(H4)及间位(H3、H5)质子;高场区5.02 ppm(三重峰,2H)对应与吡啶氮连接的亚甲基(N—CH_2—),2.06 ppm(多重峰,2H)、1.44 ppm(多重峰,2H)及0.94 ppm(四重峰,3H)依次归属为丁基链中间亚甲基(—CH_2—)及末端甲基(—CH_3),证实产物为N-丁基吡啶溴盐离子液体。

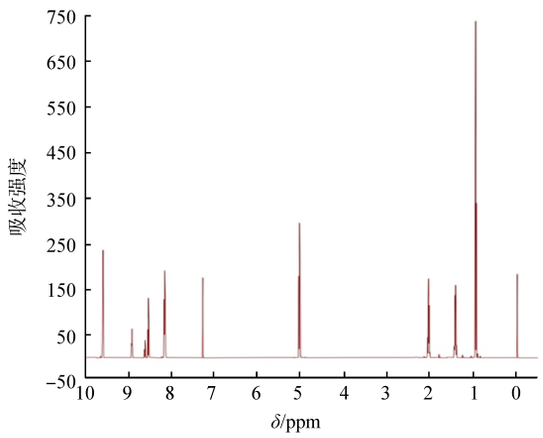


图4　N-丁基吡啶溴盐离子液体的核磁共振氢谱

Figure 4　nuclear magnetic resonance hydrogen spectrum of N-butylpyridinium bromide

3.2　反应条件优化

不同反应条件对产率的影响如图5所示,产率均是呈先增加后降低趋势,温度升高会加速逆反应和副反应,并增加了产物的挥发损失,从而降低产率。当催化剂用量为15.0 mmol、反应温度为135 ℃、反应时间为90 min时,产率达到最大值,为52.3%。

3.3　定性及定量

色谱条件优化后,不同样品的色谱图如图6所示。乙酸、乙醇、乙酸乙酯和内标物异戊醇均在不同的保留时间出峰,峰形清晰、基线稳定。乙酸乙酯的保留时间约为8.87 min,其峰形尖锐且与其他组分分离良好,没有出现重叠现象,满足定量分析要求。采用内标法结合差量法建立的乙酸乙酯标准曲线为A=1.024w−1.629 4,R^2=0.999 6,式中:

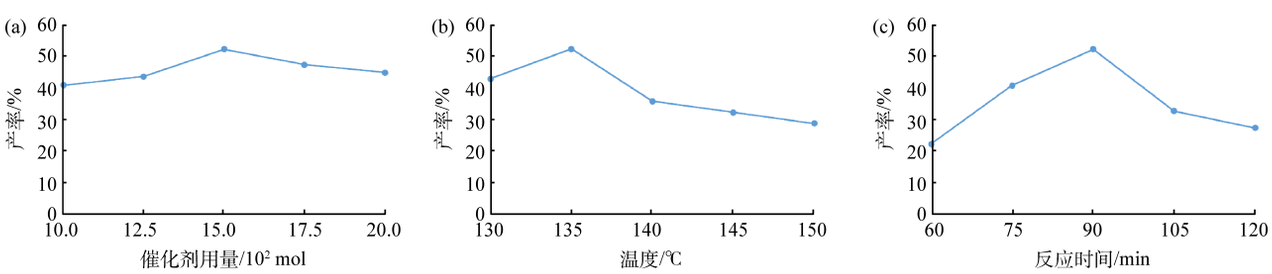


图5　不同反应条件对产率的影响

(a)催化剂用量;(b)反应温度;(c)反应时间

Figure 5　effect of different reaction conditions on yield

(a)catalyst dosage;(b)reaction temperature;(c)reaction time

A表示乙酸乙酯与内标物的峰面积比;w表示质量比。

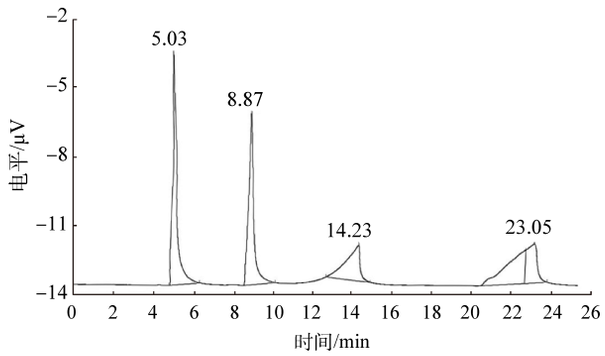


图6　不同样品的气相色谱图

Figure 6　gas chromatograms of different samples

3.4　实验对比

不同催化剂条件下乙酸乙酯合成反应数据列于表2。无催化剂、4.0 mL浓H_2SO_4为催化剂、3.24 g离子液体为催化剂时,反应所得乙酸乙酯的质量分别为0.18、2.50和2.70 g,对应平均产率分别为3.5%、48.4%和52.3%。与浓H_2SO_4为催化剂相比,离子液体为催化剂时乙酸乙酯的产率提升了3.9%。分析3组平行实验产量和产率,与浓H_2SO_4组相比,离子液体催化剂组质量和产率的标准偏差均显著降低,表明其实验重复性更佳、数据稳定性更高。

3.5　离子液体重现性实验

在反应完成后,通过循环回收离子液体并重复4次乙酸乙酯合成实验,累计5次实验的产率分别为52.3%、51.2%、50.4%、49.1%和48.0%。经过这5次循环使用后,虽然第5次产率约下降了0.4%,但仍显示出良好的催化活性:前4次实验的产率均超过了采用传统浓H_2SO_4催化的实验结果,表明该催化剂在重复使用4次之后依然保持着较高的活性水平,体现了优异的稳定性;重复实验之间产率的小幅下降可能是由于离子液体在循环过程中的少量损失(如在分离纯化过程中残留在反应体系或洗涤液中),这与催化剂多次循环使用后的表现相符。进行5次重复实验不仅满足了评估催化材料稳定性的标准要求,而且充分展示了催化活性的变化趋势,为其可循环使用性能提供了有力证据。

4　教学评价

采用问卷调查法从激发实验兴趣、深化环保认知和培养科研思维3个方面评价了本次教学活动。在激发实验兴趣方面:87.0%学生认为该实验拓展了他们对传统催化体系的理解,并对其绿色化学特性表现出浓厚兴趣;92.0%学生明确表示通过实验设计环节,更加产生了从事科研的兴趣。在深化环保认知方面,超过83.0%的学生表明这是他们首次系统践行绿色催化理念,同时意识到传统工艺难以避免废酸和副产物的产生,而离子液体工艺则趋近于零废弃物。在培养科研思维方面,86.0%的学生反馈其在实验过程中学会了如何从数据中推导反应机制,通过优化工艺参数、绘制趋势图、分析产物纯度等,不仅掌握了具体的操作技能,还学会了运用科学方法分析数据。

这表明本实验成功地提升了学生实验参与度,并激发了他们对化学实验的兴趣,通过实践操作,既加深了其对绿色化学的理解,又培养了环保意识,使学生的自信心和解决问题的能力得到了显著提升。本次教学活动在激发学生实验兴趣、深化环保认知以及培养科研思维等方面均取得了显著成效,充分体现了现代教育理念与实践的有机结合。

5　结术语

本研究采用"分子设计-工艺革新-教学重构"的方法,构建了"离子液体催化-探究型实验"双驱动教学模式,以离子液体催化合成乙酸乙酯实验为例,系统验证了绿色催化技术在高产率、低污染反应中的显著优势,同时探索了其在教学实践中的多维价值,更通过原子经济性理念与废弃物量化对比,深

表2　不同催化剂条件下乙酸乙酯的产量及产率对比

Table 2　comparison of yield and productivity of ethyl acetate under different catalyst conditions

催化剂类型	质量/g				平均产率/%
	平行实验1	平行实验2	平行实验3	平均值	
无催化剂	0.18	0.17	0.19	0.18±0.01	3.5±5.6
4.0 mL浓H_2SO_4	2.50	2.45	2.55	2.50±0.05	48.4±2.0
3.24 g离子液体	2.70	2.68	2.72	2.70±0.02	52.3±0.7

化了学生对绿色化学的实践认知。教学反馈进一步证实,该实验通过跨学科整合(有机合成、仪器分析)与科研全流程训练,有效培养了学生的创新思维与技术迁移能力。未来研究可聚焦于拓展离子液体催化体系至更复杂反应,并探索其工业化应用中的规模化适配性。本工作为绿色化学教育提供了可复制的范式,也为可持续化学研究输送了兼具方法论素养与环保责任感的创新人才。

©The editorial department of Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition) 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参 考 文 献

[1] 戴安邦.全面的化学教育与实验室教学[J].大学化学,1989,4(1):1-7+30. DOI:10.3866/PKU.DXHX19890101.
DAI A B. Comprehensive chemical education and laboratory teaching[J]. University Chemistry, 1989, 4(1):1-7+30.

[2] 方东,杨锦明,王庆东.结合示范中心建设探索有机化学实验教学改革[J].实验室研究与探索,2010,29(12):82-84. DOI:10.3969/j.issn.1006-7167.2010.12.022.
FANG D, YANG J M, WANG Q D. Exploring the reform of organic chemistry experiment teaching through the construction of demonstration center[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(12):82-84.

[3] 郭毅敏,储小平.双碳目标驱动下环境规制对我国工业绿色发展的影响[J].工业技术经济,2024,43(5):113-118. DOI:10.3969/j.issn,1004-910x.2024.05.011.
GUO Y M, CHU X P. Impact of environmental regulations on China's industrial green development driven by dual carbon goals[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2024, 43(5):113-118.

[4] 杨志龙.有机化学实验教学模式探究:以"1-溴丁烷的制备"为例[J].化学教育,2018,39:27-30. DOI:10.13884/j.1003-3807hxjy.2017040111.
YANG Z L. Exploration of organic chemistry experiment teaching mode: taking "preparation of 1-bromobutane" as an example[J]. Chinese Journal of Chemical Education, 2018, 39(6):27-30.

[5] 黄焕生,黄科林,杨波,等.乙酸乙酯合成生产技术现状及发展趋势[J].化工技术与开发,2007(12):12-16. DOI:10.3969/j.issn.1671-9905.2007.12.004.
HUANG H S, HUANG K L, YANG B, et al. Current status and development trend of ethyl acetate synthesis technology[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2007(12):12-16.

[6] 曾艳,邹晓川.再谈合成乙酸乙酯的催化剂选择[J].化学教育,2009,30(12):69-70. DOI:10.3969/j.issn.1003-3807.2009.12.025.
ZENG Y, ZOU X C. Re-discussion on catalyst selection for ethyl acetate synthesis[J]. Chinese Journal of Chemical Education, 2009, 30(12):69-70.

[7] 李玉芳,伍小明.乙酸酯化法合成乙酸乙酯技术研究进展[J].精细与专用化学品,2019,27(11):40-42. DOI:10.19482/j.cn11-3237.2019.11.11.
LI Y F, WU X M. Research progress in synthesis technology of ethyl acetate by acetic acid esterification method[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2019, 27(11):40-42.

[8] 王红,刘秋平,王海滨,等.有机化学实验教学绿色化改革的研究与实施[J].实验室研究与探索,2019,38(7):139-144. DOI:10.3969/j.issn.1006-7167.2019.07.032.
WANG H, LIU Q P, WANG H B, et al. Research and implementation of green reform in organic chemistry experiment teaching[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(7):139-144.

[9] 邓晓翠.酸性离子液体催化的有机反应研究[D].武汉:中南民族大学,2013.
DENG X C. Study on organic reactions catalyzed by acidic ionic liquids[D]. Wuhan: South-Central University for Nationalities, 2013.

[10] 于琳浩,毛继平,张国良,等.功能化酸性离子液体催化合成烷基化油研究进展[J].石油学报(石油加工),2024,40(5):1264-1274. DOI:10.3969/j.issn.1001-8719.2024.05.011.
YU L H, MAO J P, ZHANG G L, et al. Research progress in catalytic synthesis of alkylate oil using functionalized acidic ionic liquids[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2024, 40(5):1264-1274.

[11] 徐智策.酸性功能化离子液体的合成及其在催化酯化反应中的应用研究[D].天津:天津大学,2016.
XU Z C. Synthesis of acidic functionalized ionic liquids and their application in catalytic esterification reactions[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.

[12] POURIAN S, ASHOURI A. Ionic liquid-catalyzed green synthesis of cyclohexanone diesters via double addition reaction[J]. Research on Chemical Intermediates, 2025, 51:1341-1355. DOI:10.1007/s11164-025-05515-6.

[13] 唐渊哲,杨强斌,王婧,等.基于离子液体MOF复合材料的碘吸附性能在化学实验教学中的设计与探索[J].

当代化工研究，2024（17）：146-148. DOI：10.20087/j.cnki.1672-8114.2024.17.048.
TANG Y Z，YANG Q B，WANG J，et al，Design and exploration of ionic liquid MOF composites for iodine adsorption properties in chemical experiment teaching［J］. Modern Chemical Research，2024（17）：146-148.

［14］曹璐，王心茹，李洋，等. 固载质子型离子液体催化酯化反应合成香蕉油：可回收固态催化剂的实验教学应用［J］. 云南化工，2024，51（9）：107-112. DOI：10.3969/j.issn.1004-275x.2024.09.24.
CAO L，WANG X R，LI Y，et al，Synthesis of banana oil through esterification reaction catalyzed by proton supported ionic liquids：experimental teaching application of recyclable solid catalysts［J］. Yunnan Chemical Technology，2024，51（9）：107-112.

［15］SEDDON K R. Ionic liquids for clean technology［J］. Journal of Chemical Technology & Biotechnology，1997，68（4）：351-356. DOI：10.1002/（SICI）1097-4660（199704）68：4<351：：AID-JCTB613>3.0. CO；2-4.

［16］SUAREZ P A Z，DSULLIUS J E L，EINLOFT S，et al. The use of new ionic liquids in two-phase catalytic hydrogenation reaction by rhodium complexes［J］. Polyhedron，1996，15（7）：1217-1219. DOI：10.1016/0277-5387（95）00365-7.

［17］SMIGLAK M，METLEN A，ROGERS R D. The second evolution of ionic liquids：from solvents and separations to advanced materials-energetic examples from the ionic liquid cookbook［J］. Accounts of Chemical Research，2007，40：1182-1192. DOI：10.1021/ar7001304.

［18］ZHAI Z W，BARRETO J，KOLLER T M，et al. Correlation of macroscopic surface tension and microscopic surface composition of binary ionic liquid mixtures with common cations and anions of different size［J］. The Journal of Physical Chemistry B，2025，129：2789-2800. DOI：10.1021/acs.jpcb.4c08785.

［19］张普玉，娄帅，金邻豫. 离子液体应用研究进展［J］. 精细化工，2005，22（5）：5324-5327. DOI：10.3321/j.issn：1003-5214.2005.05.002.
ZHANG P Y，LOU S，JIN L Y，et al. Research progress on applications of ionic liquids［J］. Fine Chemicals，2005，22（5）：5324-5327.

［20］赵中华，伍举培. 硝酸不稳定性的探究实验［J］. 化学教学，2009，31（10）：19-20.
ZHAO Z H，WU J P. Exploratory experiment on the instability of nitric acid［J］. Chemistry Teaching，2009，31（10）：19-20.

（责任编辑：王　媛）

（上接第85页）

［15］GOLDBERG M A，MULESHKOV A S，CHEN C S，et al. Polynomial particular solutions for certain partial differential operators［J］. Numerical Methods for Partial Differential Equations，2003，19：112-133. DOI：10.1002/num.10033.

［16］CHEN C S，LEE S，HUANG C S. Derivation of particular solutions using Chebyshev polynomial based functions［J］. International Journal of Computational Methods，2007，4（1）：15-32. DOI：10.1142/S0219876207001096.

［17］POULLIKKAS A，KARAGEORGHIS A，GEORGIOU G. The method of fundamental solutions for inhomogeneous elliptic problems［J］. Computational Mechanics，1998，22：100-107. DOI：10.1007/s004660050344.

［18］DANGAL T，CHEN C S，LIN J. Polynomial particular solutions for solving elliptic partial differential equations［J］. Computers & Mathematics with Applications，2017，73（1）：60-70. DOI：10.1016/j.camwa.2016.10.024.

［19］XIE H T，ZHANG Z Z，JIANG Z W，et al. Method of particular solutions for second - order differential equation with variable coefficients via orthogonal polynomials［EB/OL］.［2024-11-28］. https：//doi. org/10.1155/2023/9748605.

［20］ANDERSON T G，BONNET M，FARIA L M，et al. Construction of polynomial particular solutions of linear constant-coefficient partial differential equations［J］. Computers & Mathematics with Applications，2024，162：94-103. DOI：10.1016/j.camwa.2024.02.045.

［21］林开亮，王兢. 求解常系数线性微分方程的代数解法［J］. 内蒙古师大学学报（自然科学汉文版），2019，48（6）：577-582. DOI：10.3969/j.issn.1001-8735.2019.06.016.
LIN K L，WANG J. An algebraic approach to solve linear differential equation with constant coefficients［J］. Journal of Inner Mongolia Normal University（Natural Science Edition），2019，48（6）：577-582.

（责任编辑：马田田）