

基于科教协同育人的有机化学实验设计 ——以2-羟甲基-4,6-二叔丁基苯酚的亲核取代反应为例

辛爱一, 李佳蔚, 冉馨洋, 付川江, 王志国*

绵阳师范学院化学与化学工程学院, 四川 绵阳 621000

摘要: 通过气-液-固反应的实验现象, 激发学习兴趣; 通过气体发生装置、干燥装置、尾气处理装置的复杂链接, 培养学生“事有终始, 知所先后”的思维; 通过产物的分离、纯化和表征, 培养学生有机合成的综合能力; 通过规范使用浓硫酸和有害气体处理, 增强应急处理意识和环保意识; 最后, 通过课题拓展, 引导学生从理论走向实践。

关键词: 科教融合; 有机化学; 卤代烃; 亲核取代反应

中图分类号: G64; O6

Collaborative Science and Education Based Experimental Design in Organic Chemistry: A Case Study of the Nucleophilic Substitution Reaction of 2-Hydroxymethyl-4,6-Di-Tert-Butylphenol

Aiyi Xin, Jiawei Li, Xinyang Ran, Chuanjiang Fu, Zhiguo Wang *

School of Chemistry and Chemical Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang 621000, Sichuan Province, China.

Abstract: The experimental phenomena observed in gas-liquid-solid reactions serve to stimulate students' interest in learning. The intricate connections between gas generation, drying, and tail gas treatment equipment encourage students to adopt a mindset of understanding the sequence and significance of processes. Through the separation, purification, and characterization of products, students develop comprehensive skills in organic synthesis. Standardizing the use of concentrated sulfuric acid and managing hazardous gas treatments enhance students' awareness of emergency protocols and environmental responsibility. Finally, by extending the experimental focus to a series of related reactions, students are guided to transition from theoretical knowledge to practical application.

Key Words: Integration of science and education; Organic chemistry; Halogenated hydrocarbon; Nucleophilic substitution

1 研究背景

有机化学实验是化学、材料、生物、农林等专业本科生形成核心素养的重要科目, 其课程大纲较为系统地规划了有机化学实验内容。有机化学实验通过基础知识、基本操作、简单有机化合物的合成以及化合物的性质验证, 来培养学生的动手能力、思辨能力、分析问题和解决问题的能力, 这在漫长的本科教育中起到极其重要的作用^[1,2]。但随着时代的发展, 目前的教育模式, 很难适应新型的素质培养需求, 一方面, 在有机合成和性质实验中, 实验项目相对陈旧, 难以培养与时俱进和适

收稿: 2024-07-03; 录用: 2024-11-11; 网络发表: 2024-12-30

*通讯作者, Email: wangzhiguo224865@163.com

基金资助: 绵阳师范学院 2023 年校级“课程思政”示范课程研究项目(Mnu-JY230030)

应现代社会需求的人才^[3]；另一方面，实验内容的教条化，不利于学生创造性思维的培养，实验过程中无法形成思辨能力的培养。因此，有机化学实验的改革，就成了一种必然。

许多高校把该课程的教学改革作为一项重要的工作在落实，并按《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》进行了诸多探索，主要包括：趣味化及可视化实验^[4,5]、微型化实验^[6,7]、探究性实验^[8-10]、虚拟仿真实验^[11,12]、手持技术数字化实验^[13,14]、科研成果向教学转化型实验^[15-18]等。高校涌现的科研成果是实验教学更新换代的宝库，在探索中也发现，将新颖的研究型成果引入到本科生的化学实验教学之中，一方面能激发学生的学习兴趣，增强其自主学习意识；另一方面可以培养学生的科研意识、科研精神与科研方法，提升学生文献查阅、数据处理和论文撰写的能力。此外，在实验过程中，学生自拟方案主动思考，通过与同学团结协作完成实验，可以提高其团队意识和分析问题、解决问题的能力，一定程度上推动了化学实验教学。然而，在日常教学实践中往往存在策略不当的问题，一是机械地加入科研成果的情况，学生不仅不能通过科研成果加深对理论知识的理解，反而觉得科研前沿艰深晦涩，难以达到预期的教学效果；另一方面，实验设计时育人高度不够，缺乏核心价值塑造，实验难以构建价值塑造、知识探究、能力养成的模式，因此在实验设计过程中，完成学生学科知识、学科技能、学科素养的综合培养就显得尤为重要。

卤化物在日常生活与工农业生产中有着广泛的应用，可用作灭火剂、冷冻剂、清洗剂、杀虫剂等，因其强的抗氧化和还原能力还被用作高分子工业的原料^[19]。在有机合成上，卤素原子以其独特的活性成为有机合成的桥梁，无官能团的烷烃通过卤代物中间体完成官能团转换，形成各种有机化合物(醇、醛、羧酸、酯等)^[20]。因此，引入卤原子常常是改变分子性能的第一步反应，但遗憾的是卤代烃在自然界中含量极少且结构很难符合现实需求，因此卤代烃的合成就成为有机化学的必然。通常情况下，醇的亲核取代反应，因原料易得、操作简便和反应条件温和而成为合成卤代烃的主要方法。因此，在本科阶段，让学生通过直观的实验设计，加深对反应历程的理解，对培养今后从事相关合成工作或科研的应用型人才意义重大。

除此之外，卤化物的有机合成中还蕴含着中国传统文化的哲理性思考，如稳定碳正离子“共轭之道”中的“损有余而补不足”“反者道之动”的思想，是中国哲学认识世界的基础；卤化物到格氏试剂的极性转化($\overset{+}{\text{RCH}_2\text{X}} \rightarrow \overset{-}{\text{RCH}_2\text{MgX}}$)，深刻蕴含着中国哲学“阴阳”互变的理念，而这种理念贯穿在有机化学的始终，也贯穿在中国文化的始终。因此，将中国传统文化的思维方式融入到有机化学中去，可以实现“重理兼文”的教育理念；同时，利用中国传统文化之“美”，解化学理论之“真”，坚定学生的文化自信和民族自信，实现学生的核心价值塑造，使学生成为具有高度素养且有“中国心”的现代化人才。

目前较常用的有机化学实验教材中，涉及亲核取代反应制备卤代烃的反应，常用叔丁醇和浓盐酸的反应，如图1所示^[21]。实验步骤为：在分液漏斗中，放置叔丁醇和浓盐酸，轻轻旋转漏斗数分钟使反应完全；静置分层后分出有机相，将处理后的有机相层加热蒸馏收集馏分即得到叔丁基氯。

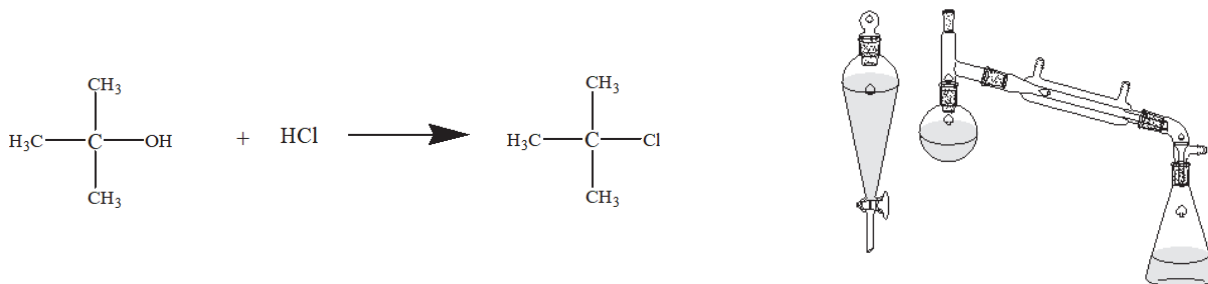


图1 叔丁基氯的制备原理(左)及装置图(右)

该实验为经典实验项目,原因如下:① 该实验操作简单,反应时间短,且产物易于分离;② 学生通过该反应很容易建立液-液常温反应的模式;③ 从空间效应上,由于三个甲基的拥挤性,从而彰显亲核取代反应 S_N1 历程;④ 此反应独特之处还在于均相跟异相的瞬间变化。但从培养学生综合能力的角度来说,存在以下问题:① 从学生学科知识的角度来看,该反应为非选择性反应,不利于学生理解较复杂环境的亲核取代反应;② 从学科技能方面来看,实验仅涉及分液、洗涤、蒸馏的简单操作,不利于学生综合操作能力的培养;③ 从学科素养方面来看,首先,该反应为超共轭效应稳定的碳正离子,难以工业应用,不利于引导学生从理论走向实践;其次,此反应为特例,不具有共性,极大地限制了学生对实验的拓展探究;第三,实验操作仅涉及废液的处理,没有对固体废物和气体废物的处理,不利于学生环保意识的培养。因此,实验课时有限的情况下,设计一个既能让学生更好地理解亲核取代反应,又能培养学生的综合能力的实验就成为了必然。

2 实验培养目标的合理化、可行性对接

2.1 实验培养目标合理化对接

实验培养目标包括学科知识、学科技能、学科素养。学科知识需要理解醇羟基和酚羟基的选择性反应和复杂环境的亲核取代反应历程,并达到可以“举一反三”及应用于实践的能力;学科技能主要为通过装置的复杂链接,培养学生有机合成综合操作的能力;学科素养注重核心价值的塑造(文化自信、民族自信)和综合能力(自主学习意识、规范意识、责任意识、环保意识等)的养成。

在教师科研的过程中发现,2-羟甲基-4,6-二叔丁基苯酚可以与干燥的氯化氢气体反应生成2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚,反应原理如图2所示。

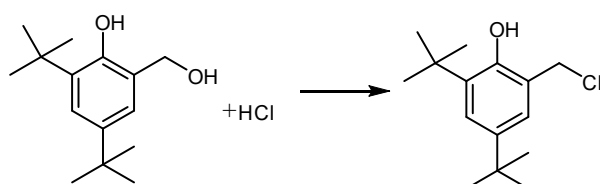


图2 2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚的合成原理

此实验的反应装置如下,如图3所示,主要包括气体的发生装置(a)、气体的干燥装置(b)、固-液反应装置(c)、尾气吸收装置(d)、蒸馏装置(e)。

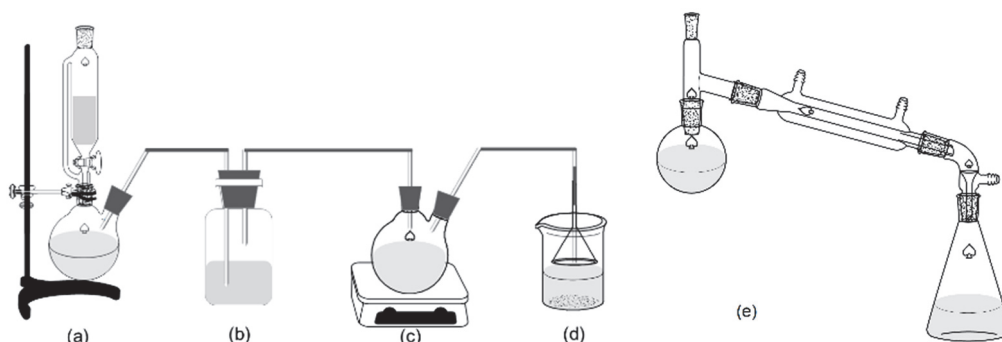


图3 2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚的制备装置

此反应相对叔丁醇的氯化反应,对学生的综合能力培养有以下优点:

(1) 从学科知识方面来说,实验所用的原料为2-羟甲基-4,6-二叔丁基苯酚,该结构中存在两个羟基,为选择性反应。通过两个羟基的化学环境比较可知,在反应物结构中酚羟基氧原子的 p 轨道与苯

环的大 π 键形成 $p-\pi$ 共轭,从而使碳氧键非常牢固,不易发生反应,这就决定发生反应的只能是醇羟基,且产物只有一种,有助于学生对醇羟基和酚羟基选择性地理解。通过反应物的结构来看,该反应的推动力为共轭效应稳定的碳正离子,其形成是由于孤对电子和芳香环。有机化学中,芳香环是多样的,羟甲基和芳香环会多样化组合,从而使目标产物多样化,如图4所示,学生可以从一个反应掌握一类反应,增强学生融会贯通的能力。

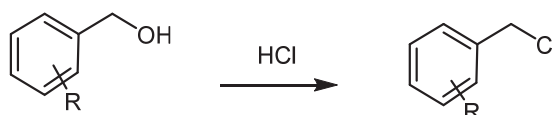


图4 氯甲基苯酚类化合物的合成

(2) 从学科技能方面来看,该实验可让学生熟悉气体发生装置、气体干燥装置、气液反应装置、有害气体吸收装置,并学会用薄层色谱法实时监测有机反应进度。除此之外,本次实验还涉及溶剂蒸馏、重结晶、薄层色谱检测产物纯度等有机合成基础操作,以及红外光谱和核磁共振等有机结构表征的方法,培养学生的有机合成综合操作能力。

(3) 从学科素养的角度来说,首先,“共轭之道”形成的稳定碳正离子,可以让学生理解中国传统文化中“反者道之动”的思想,坚定学生的文化自信和民族自信,实现学生核心价值塑造;其次,学生可以在实验过程中观察到随着气体通入固体消失的过程,激发学生从实验现象探究原理的兴趣和反向思维能力;最后,该实验可以增强学生的规范意识,如遵循实验室各项规章制度、规范实验操作流程、听取教师意见等;实验中涉及到浓硫酸、浓盐酸的使用以及有害气体的产生,可以增强学生的自我防护意识、应急处理意识、责任意识等;实验还涉及有害气体的尾气吸收等,可以增强学生的环保意识;另外,实验设计了共轭效应稳定的碳正离子,可形成较广泛的工业应用,有利于引导学生从理论走向实践。

综上所述,该实验设计从实验内容方面来说,涉及到有机化学中卤化物合成的亲核取代反应历程,具有很重要的理论和实践意义;通过实验设计与培养目标的合理对接,践行“重理兼文”教育理念的同时,成功构建了“核心价值塑造-多维知识探究-综合能力养成”的人才培养模式。培养目标对应的实验设计中的具体内容见表1。

表1 教研融合有机化学实验培养目标

培养目标	具体内容
学科知识	醇羟基和酚羟基选择性反应的理解 解决共轭效应稳定的碳正离子亲核取代反应 傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)、核磁共振氢谱(^1H NMR)原理及谱图解析
学科技能	熟悉气体发生装置、气体干燥装置、气液反应装置、有害气体吸收装置 了解薄层色谱法实时监测有机反应进度及检测产物纯度 掌握溶剂蒸馏、重结晶等有机合成基础操作
学科素养	通过固-气反应有趣的实验现象,激发学生从现象探究原理的兴趣 实验设计共轭效应稳定的碳正离子,可形成较广泛的工业应用,有利于引导学生从理论走向实践 稳定碳正离子形成“反者道之动”哲理性思考,坚定文化自信和民族自信,实现学生核心价值塑造 取代基和芳香环可以多样化组合,学生可以从一个反应的实验掌握一类反应,举一反三 增强学生的规范意识和环保意识 增强学生的自我防护意识、应急处理意识、责任意识等

2.2 可行性分析

2.2.1 实验可行性分析

为保证学生实验可以顺利进行,对实验的反应条件进行了优化,影响2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚制备和产率的主要因素包括:浓硫酸的滴加速度、反应时间、盐酸用量。通过单因素考察浓硫酸的滴加速度、反应时间、盐酸用量对2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚产率的影响,筛选最优实验条件,结果见图5,最优实验条件为:浓硫酸的滴加速度20滴/min,反应时间3 h,盐酸用量40 mL。

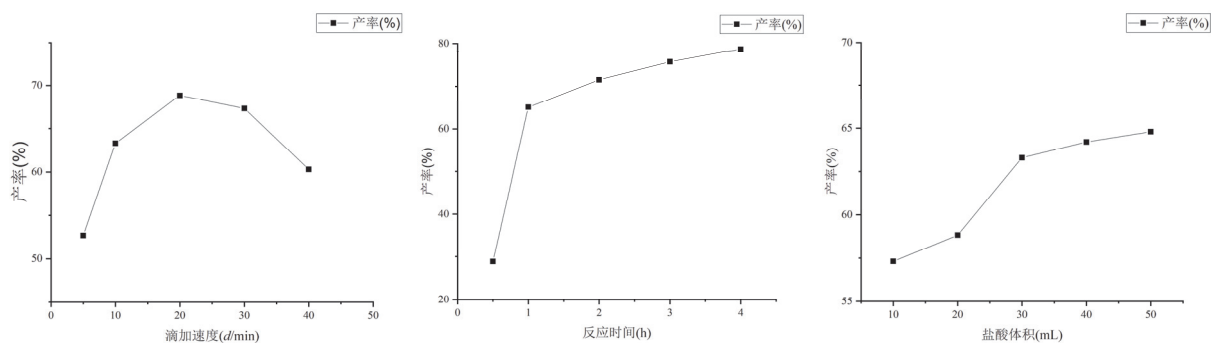


图5 反应条件对产率的影响

在最优实验条件进行五组平行实验,并计算2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚的产率,结果见表2。由实验结果可知,在筛选得到的最优条件下,2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚的产率在63.37%–68.83%之间,可以满足学生实验的要求。

表2 最优实验条件下2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚的产率

平行实验组数	产率/%
1	67.31
2	68.83
3	63.37
4	65.57
5	65.27

2.2.2 目标达成可行性分析

为保证培养目标的实现,对该实验的评价体系和评价内容进行科学设计,见图6。首先对原有的实验报告形式进行改革,要求学生以科技论文的形式撰写结果分析报告,进一步培养学生的科研能力;实验结果以全班的数据为准,进行合作型实验结果分析,培养学生团结协作的能力和严谨的科研精神;实验的成绩不再采取根据实验结果(产率和纯度)的先前评分标准,采用多元化评价体系,运用过程性和结果性相结合的评价方式。过程性评价包括:实验安全规范、预习报告、实验操作、实验数据记录;结果性评价包括:产品产率、产品纯度、思考题和论文式实验报告。为保证结果的准确性和公正性,教师应制定自评表,让学生对自己在本实验中的表现进行客观评价;实验结束后,制做调查问卷,及时了解学生对该教学方式的接受程度和反馈情况,进行反思并做出调整,以期达到更好的教学效果。

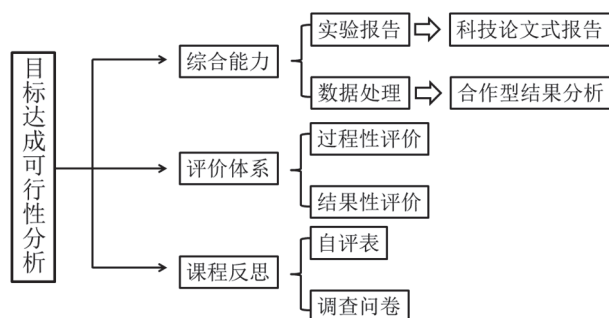


图6 目标达成可行性分析

3 教研融合实验内容设计

3.1 实验名称：2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚的合成及表征

3.2 实验目的

- (1) 学习由醇制备卤代烃的方法；
- (2) 理解亲核取代反应及其影响因素；
- (3) 学习并掌握气体的制备、干燥和有害气体尾气吸收等基本操作；
- (4) 掌握化合物的蒸馏、减压过滤、重结晶等基本操作；
- (5) 掌握用薄层色谱法(TLC)实时监控有机反应进度，掌握用FT-IR、 ^1H NMR对有机化合物进行结构表征。

3.3 实验原理

2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚是一种常用的化学品，主要用于制造天然橡胶、塑料抗氧化剂、燃料稳定剂、农药及染料中间体等。一般可由2-羟甲基-4,6-二叔丁基苯酚在石油醚中与干燥氯化氢制备得到。

本实验的亲核取代反应分两步进行，如图7。第一步分两个阶段，第一个阶段氢离子与醇羟基中的氧结合形成内鎓盐；第二阶段是内鎓盐解离为碳正离子；碳原子从原来的 sp^3 杂化转为 sp^2 杂化，结构上从原来的四面体转变为平面型，这种平面型的碳正离子，由于碳正离子的 p 轨道和苯环的大 π 键形成 $p-\pi$ 共轭使体系电荷得到了充分的分散而非常稳定；第二步是氯离子从平面的上、下进攻，形成目标产物。

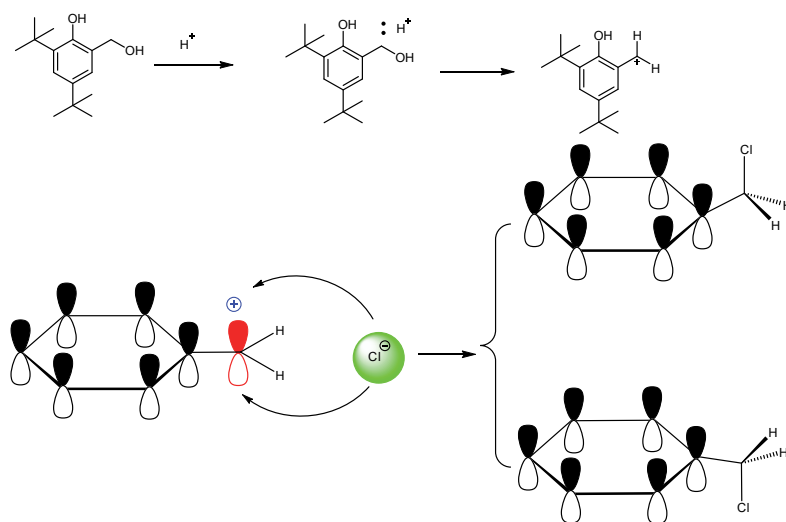


图7 2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚的合成

3.4 仪器与试剂

仪器：圆底烧瓶(100 mL, 250 mL)、恒压分液漏斗、球形冷凝管、常压蒸馏装置、电热套、磁力搅拌器、布氏漏斗、抽滤瓶、烧杯、锥形瓶、薄层色谱板、紫外灯、红外光谱仪(FTIR-8400S, SHIMADZU, 日本)、超导核磁共振波谱仪(Bruker Avance III-400 spectrometer, Bruker AXS GmbH, 德国)。

试剂：浓硫酸(分析纯)、浓盐酸(分析纯)、2-羟甲基-4,6-二叔丁基苯酚(分析纯)、氢氧化钠(分析纯)、石油醚(分析纯)、二氯甲烷(分析纯)、羧甲基纤维素钠(分析纯)、薄层硅胶(分析纯)、KBr(光谱纯)、DMSO-*d*₆(分析纯)

3.5 实验步骤

如图3搭建实验装置。在装置(a)恒压分液漏斗中加入40 mL浓硫酸，双口烧瓶中加入40 mL浓盐酸，用恒压分液漏斗控制浓硫酸流速为20滴/min。在装置(c) 250 mL干净的圆底烧瓶中，加入2 g 2-羟甲基-4,6-二叔丁基苯酚，用20 mL石油醚溶解，反应3.0 h，在反应过程中通过TLC法实时监测反应的进度(展开剂为 $V_{\text{石油醚}} : V_{\text{乙酸乙酯}} = 10 : 1$ ；254 nm下观察反应物和产物的斑点)。待反应完全后，在反应液中加入无水硫酸钠干燥并过滤。将滤液转移至装置(e)，用电热套蒸馏回收石油醚，当溶剂蒸发至初始量的1/4时，有固体析出，停止加热，冷却析晶。待固体全部析出后，减压过滤，得到粗产品。加入25 mL二氯甲烷重结晶，减压过滤，烘干，称重，计算产率。

分别取适量2-羟甲基-4,6-二叔丁基苯酚和2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚，按样品与溴化钾质量比1 : 100的比例，研细，混合压成透明薄片，分别测定红外光谱，并进行对比。

分别取适量2-羟甲基-4,6-二叔丁基苯酚和2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚，用DMSO-*d*₆溶解，测定核磁共振波谱，并进行对比。

3.6 实验结果

制备得到的产物为白色晶体，如图8所示，产率为65.73%。



图8 重结晶后的产物数码图片

反应物和产物的红外光谱图如图9所示。在图9a中，化合物在3430 cm^{-1} 处和3193 cm^{-1} 出现吸收峰，是与苯环相连的—OH和—CH₂OH中的羟基吸收峰；化合物在2905和2862 cm^{-1} 出现—CH₂—的红外吸收峰；在1120 cm^{-1} 处出现的吸收峰为苯环与羟基直接相连的C—O键的特征吸收峰；1224 cm^{-1} 处出现的吸收峰为—CH₂OH中C—O的特征吸收峰。

在图9b中，在3430 cm^{-1} 处出现的吸收峰是与苯环相连的—OH；1465和1375 cm^{-1} 处出现—CH₂—的弯曲振动峰和变形振动峰；在765 cm^{-1} 处出现—CH₂Cl中的C—Cl键的红外特征吸收峰。通过红外数据对比分析发现，产物中不再存有—CH₂OH中的—OH与C—O键的红外吸收峰，说明该反应实现了结构片段由—CH₂OH向—CH₂Cl的转变。

反应物和产物的¹H NMR如图10所示。

在图10a中，反应物核磁波谱数据如下：¹H NMR (400 MHz, DMSO-*d*₆) δ 8.52 (1H, —OH), 7.10 (1H), 7.01 (1H), 5.86 (1H, —OH), 4.64 (2H, —CH₂), 1.37 (9H, —CH₃), 1.24 (9H, —CH₃)。酚羟基和

醇羟基分别出现在 δ 8.52和5.86, δ 7.10和7.01的峰为苯环上氢, 4.64为苄基氢。在图10b中, 反应物核磁共振数据如下: $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, $\text{DMSO-}d_6$) δ 8.19 (1H, -OH), 7.04 (1H), 6.85 (1H), 3.88 (2H, -CH₂), 1.37 (9H, -CH₃), 1.16 (9H, -CH₃)。酚羟基出现在 δ 8.19, 未出现醇羟基的峰。苯环和苄基上氢的位移出现了微小的变化, 但变化不大, 原因是氧和氯的给电子共轭效应类似。

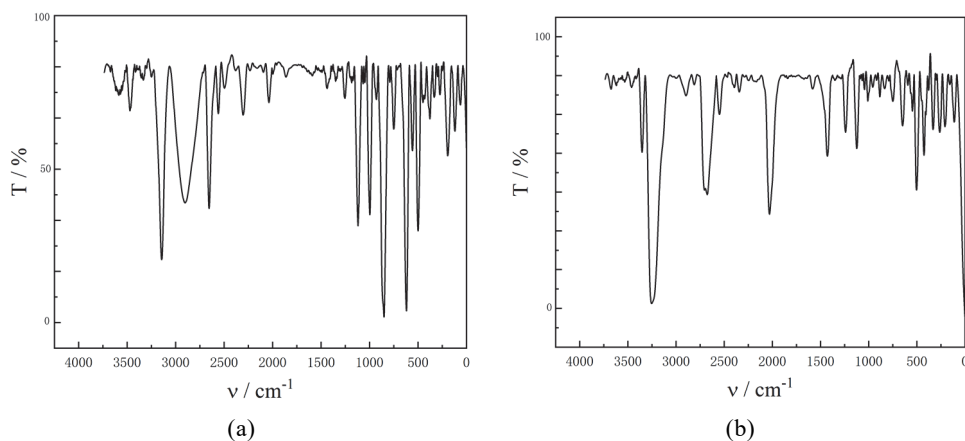
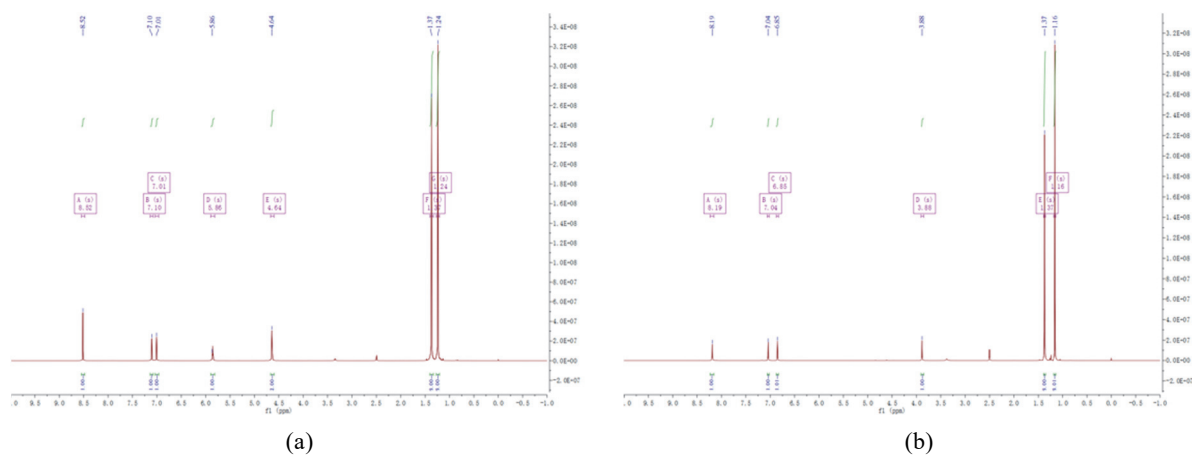


图9 反应物(a)和产物(b)的红外光谱图

图10 反应物(a)和产物(b)的 $^1\text{H NMR}$ 图

3.7 思考题

- (1) 本实验中未反应的2-羟甲基-4,6-二叔丁基苯酚如何除去?
- (2) 该反应可能会产生哪些副反应? 如何减小副产物的产生?
- (3) 影响该反应产率的因素有哪些?
- (4) 重结晶的目的是什么? 重结晶一般适用于哪些物质?

4 教学组织方式及教学实践效果

4.1 教学组织方式

本实验涉及有机化学实验中的综合操作, 因此本实验适合在大学本科二年级下学期有机化学实验II中开展。本实验适合采用小班制教学, 每班不超过24人。在合成制备环节, 3人一组, 配备6位指导教师; 结构表征环节, 6人一组, 配备4位指导教师。实验过程中注重小组之间的协作。为了保证实验的顺利进行, 教师应提前做好规划, 并组织学生提前做好所需要的仪器药品。

4.2 教学实践效果

2020级、2021级化学专业大二学生(215人次)参与了本次教学实践。从实验过程中来看,学生通过实验前查阅文献设计实验方案、问题探讨和分工协作,脱离了照着教师讲义“边看边做”的僵化模式,做到了实验方案与实验过程心中有数,实现了以学生为中心的教学模式,学生也在实验过程中感受到了探索的乐趣。

从实验结果来看,产物的平均产率在55%–70%之间,产品中副产物的含量较低,产物的纯度高、晶型好,说明通过该实验学生有机合成综合操作(合成、分离、纯化)的能力得到了提高,学生在此过程中也收获了成就感,教学效果良好。

从学生撰写实验报告的情况来看,首先学生通过本实验熟悉了科技论文的组成部分,初步学习了科技论文写作的方法,掌握将研究成果以文字、符号形式表现的能力,为以后科学成果的推广打下基础;其次,通过数据的综合处理,学生模拟实际科研中分析多次实验结果的过程,进一步理解样本与总体的差异、随机误差及过失,学习如何通过正确的数据处理来准确反映客观世界,培养学生正确的科研思维和科研方法;第三,结构表征中“产品实物-光谱符号-化学结构”的对接,可以引导学生理解如何探究微观世界。在实验过程中得到的产品都为实物,实物以气、液、固三态呈现,而感官无法解释其微观结构,为此必须借助现代仪器分析手段,而该手段输出的信号为谱图符号,把谱图符号对接于实物微观结构,是非常复杂的任务,通过这一思维训练过程,学生从宏观上理解了如何借助工具探究微观世界的真谛;此外,数据的样本来自全体学生,学生可以从中体会团结协作的重要性。

最终,通过科研内容融入教学的设计和撰写科研论文式实验报告结合,学生完成了“提出问题→设计实验→实验实施→观察现象→数据收集→数据分析→实验结论→反推反应历程”的逻辑闭环的思维训练,全方位培养了学生的综合能力。

为了科学评价本实验的教学效果,采用多元化评价的方法,通过过程性评价和结果性评价相结合的方式(图11),以建构生成理论为基础构建学习主体兴趣,对知识与技能、过程与方法、情感态度与价值观进行综合评价。过程性评价形式设计如下:实验安全规范、预习报告、实验操作、实验数据记录;结果性评价包括:产品的产率、产品的纯度、思考题和论文式实验报告。

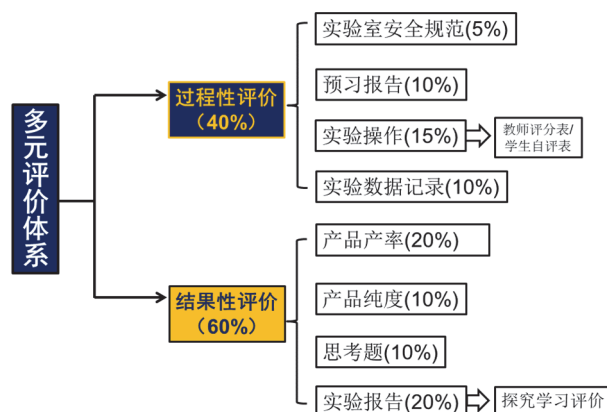


图11 多元化评价体系的建立

5 结语

本实验以2-氯甲基-4,6-二叔丁基苯酚的合成为基础,使学生了解了复杂环境共轭效应稳定的碳正离子亲核取代反应;掌握了复杂反应装置的链接(气体发生装置、气体干燥装置、有害气体吸收装置、蒸馏装置)和有机合成的综合操作(气固反应、固液分离、重结晶、结构表征等);塑造了学生文化自信和民族自信的核心价值,增强了学生的规范意识、责任意识和环保意识。

教学实践表明, 学生通过实验前查阅文献设计实验方案、问题探讨和分工协作等方式, 做到了对实验原理和实验过程心中有数, 掌握了正确的科研方法, 进行了逻辑闭环的思维训练。通过引入多元化评价的方法, 以过程性评价和结果性评价结合的方式, 从学科知识、学科技能、学科素养三个维度科学评价学生的学习效果。

参 考 文 献

- [1] 房芳, 于月娜, 王春燕, 刘华伟. 大学化学, **2022**, *37* (7), 2111008.
- [2] 边磊, 李田, 关玲, 徐烜峰, 张奇涵. 化学教育(中英文), **2022**, *43* (2), 64.
- [3] 边磊, 王婕妤, 李田, 关玲, 徐烜峰, 张奇涵. 化学教育(中英文), **2022**, *43* (24), 50.
- [4] 李佳佳, 张翔侯, 袁智涵, 钱正阳, 朱健. 大学化学, **2024**, *39* (5), 11.
- [5] 何绮婷. 大学化学, **2024**, *39* (12), 215.
- [6] 张思雨, 郝天辉, 王则月, 姚贲, 凌剑, 赵静峰. 大学化学, **2020**, *35* (4), 168.
- [7] 唐雨榕, 时允仁, 徐溢, 秦波, 徐彦芹, 蔡云飞. 大学化学, **2024**, *39* (5), 296.
- [8] 李运超, 陈珊莹, 慕可, 霍康宁, 李淑欣, 李晶怡, 魏盈, 范楼珍. 大学化学, **2024**, *39* (2), 47.
- [9] 张永民, 郭爽, 朱明月, 刘梦辉, 李思依. 大学化学, **2024**, *39* (2), 21.
- [10] 文巍, 李朝星, 叶芳秀, 李静烽, 郭其祥. 大学化学, **2021**, *36* (12), 2102054.
- [11] 韩冬雪, 孙会靓, 牛利. 大学化学, **2024**, *39* (8), 191.
- [12] 石志红, 边刚, 张红医, 张博然. 大学化学, **2023**, *38* (8), 136.
- [13] 蔡军, 李文, 史梅, 胡文兵. 大学化学, **2022**, *37* (12), 2111085.
- [14] 睦苏奇, 钱扬义. 大学化学, **2008**, *23* (5), 41.
- [15] 方思敏, 黄微, 于冠华, 魏聪, 高明丽, 李光水, 田红军, 李婉. 大学化学, **2024**, *39* (8), 282.
- [16] 陈天云, 肖瑞麟, 顾欣晟, 邵云一, 卢求钧. 大学化学, **2024**, *39* (5), 363.
- [17] 胡水, 李厚金, 臧真明, 李莲云, 赖琰. 大学化学, **2024**, *39* (4), 314.
- [18] 闫世成. 大学化学, **2024**, *39* (11), 350.
- [19] Scurr, M.; Pembroke, T.; Bloom, A.; Roberts, D.; Thomson, A.; Smart, K.; Bridgeman, H.; Adams, R.; Brewster, A.; Jones, R.; *et al.* *Clin. Cancer Res.* **2017**, *23* (22), 6771.
- [20] Visco, C.; Chiappella, A.; Nassi, L.; Patti, C.; Ferrero, S.; Barbero, D.; Evangelista, A.; Spina, M.; Molinari, A.; Rigacci, L.; *et al.* *Lancet Haematol.* **2017**, *4* (1), 15.
- [21] 曾和平. 有机化学实验. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 103–104.