

含硒吡喃酮和查尔酮的溶剂调控电化学合成综合实验设计

哈斯木江·巴拉提, 胡彩凤, 黄雅雯, 陈沐, 胡新伟, 阮志雄*

广州医科大学药学院, 广州 511436

摘要: 电化学有机合成是一种环境友好、温和且高效的合成方法, 被广泛用于氧化、还原以及氧化还原反应体系, 表现出巨大的潜力。本实验以1-(2-甲氧基苯基)-3-苯基丙基-2-合-1-酮和二苯基二硒醚(PhSeSePh)为原料, 通过溶剂调控电化学策略构筑C—Se键, 分别合成含硒吡喃酮和查尔酮类化合物, 以探究含硒化合物的新型电化学合成方法。我们结合课题组的科研成果, 设计了一种溶剂调控的电化学合成含硒化合物的综合实验方案。该电化学实验涉及初始原料的合成、电化学反应过程、循环伏安法测试、电化学产物的结构表征、晶体培养等丰富的实验操作环节, 有助于提升学生的实验操作能力、硅胶柱层析法分离纯化技术, 以及结构分析技能。该实验方案立足于绿色有机合成, 综合应用有机化学与电化学交叉学科知识, 开发含硒杂环化合物的新型合成方法。

关键词: 电化学合成; 吡喃酮; 查尔酮; 有机硒化物; 综合实验

中图分类号: G64; O6

Comprehensive Experimental Design for Solvent-Controlled Electrochemical Synthesis of Selenium-Containing Pyranone and Chalcone

Balati Hasimujiang, Caifeng Hu, Yawen Huang, Mu Chen, Xinwei Hu, Zhixiong Ruan *

School of Pharmaceutical Sciences, Guangzhou Medical University, Guangzhou 511436, China.

Abstract: Electrochemical organic synthesis is an environmentally friendly, mild, and efficient methodology that has gained widespread acceptance in oxidation, reduction, and redox reaction systems, showcasing significant potential. This experiment focused on the synthesis of selenium-containing pyranones and chalcones using 1-(2-methoxyphenyl)-3-phenylpropyl-2-oxo-1-one and diphenyl diselenide (PhSeSePh) as starting materials, employing a solvent controlled electrochemical strategy to construct C—Se bonds and explore innovative electrochemical synthesis methods for selenium-containing compounds. Drawing on the research achievements of our group, we have designed a comprehensive experiment for the solvent-regulated electrochemical synthesis of these compounds. The experimental framework involves various operational steps, such as substrate preparation, electrochemical synthesis analysis, cyclic voltammetry studies, structural characterization of target products, and crystal cultivation. This hands-on approach enhances students' practical skills in experimental techniques, silica gel column chromatography separation and purification, and structural analysis. Our experimental design emphasizes green organic synthesis, integrating interdisciplinary knowledge from both organic chemistry and electrochemistry to develop novel synthetic methods for selenium-containing heterocyclic compounds.

Key Words: Electrochemical synthesis; Pyranone; Chalcone; Organic selenides; Comprehensive experiment

收稿: 2024-04-07; 录用: 2024-07-24; 网络发表: 2024-08-01

*通讯作者, Email: zruan@gzhu.edu.cn

基金资助: 国家自然科学基金(22271067); 广州医科大学2023年度本科教学质量与教学改革工程建设项目(2023ZLGC065); 博士后科研启动费(Q0301-133)

硒是生物体中不可或缺的微量元素之一,主要以多肽或氨基酸的形式分布于血液和组织器官中,人体某些抗氧化酶,如谷胱甘肽过氧化物酶,需要硒元素参与合成。将硒元素引入有机小分子中可改变化合物原有的化学和物理性质,在医药、农药、有机合成和材料领域中广泛应用。值得注意的是,含硒杂环类有机化合物通常具有独特的药理和生物活性,如抗菌、抗肿瘤、抗病毒、心血管保护和免疫调节等^[1]。因此,有机硒化物,特别是杂环有机硒化物,近年来受到有机化学家和药学家的广泛关注^[2],研究含硒化合物的合成具有重大的意义。当前,杂环有机硒化物的合成主要依赖于过渡金属催化剂或强氧化剂^[3-5],具有一定的局限性。开发一种高效、实用且绿色的杂环有机硒化物合成方法显得尤为重要。

电化学合成技术是一种绿色的新型化学合成手段,它通过调节电流或电压的大小控制电子的转移,实现化合物的直接或间接氧化和还原。在电化学合成过程中使用可持续的电流,将电流作为“氧化剂”,化合物在电极表面电流的作用下参与氧化和还原反应,可避免有毒有害化学氧化剂或还原剂的使用,具有绿色、经济和高效的优势^[6-8]。在过去的几十年里,通过电化学合成策略合成有机小分子,尤其是官能团化的有机小分子,已成为有机合成领域的研究热点。因此,将电化学合成策略应用于杂环有机硒化物的合成中,为该类分子的高效绿色合成提供了新的方向。

本团队结合课题组的研究方向^[9],利用近期在电化学合成领域取得的研究成果,设计了一种溶剂调控的电化学合成含硒吡喃酮和查尔酮的新型本科综合实验(图1)。我们对该电化学合成方法进行了电化学分析,提出了合理的反应机理,并对目标产物进行结构表征。该电化学实验利用简单的电化学反应装置,通过溶剂调控实现了C-Se键的构筑,最终成功合成含硒吡喃酮和查尔酮类化合物。在实验过程中,学生掌握了使用薄层色谱监测反应进度、柱层析技术分离目标产物,以及利用核磁共振和高分辨质谱技术对产物进行结构表征,同时初步了解循环伏安法原理。在本科实践教学环节中引入有机电化学合成概念,一方面提高了学生对有机小分子的高效、绿色合成的认知与能力,另一方面也满足了培养电化学合成专业技术人才、推进电化学合成技术革新的迫切需求。同时,由于本科教学实验较少涉及含有硒(Se)元素的杂环化合物的合成。因此,通过该实验设计可以更好地激发同学们对不常见杂环分子的认知。

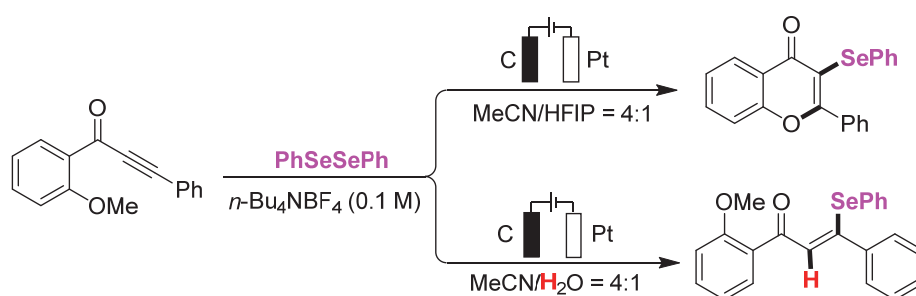


图1 溶剂调控含硒吡喃酮和查尔酮的电化学合成

1 实验原理

1.1 研究思路

吡喃酮和查尔酮是一类重要的含氧原子的有机小分子,在药物化学、农药、医药、有机材料以及催化等领域被广泛的应用。目前已报道的大部分含硒吡喃酮的合成方法主要依赖于过渡金属催化剂和强氧化剂。本实验中,采用绿色的电化学溶剂调控手段,创新性地构建含硒吡喃酮和查尔酮结构,避免了过渡金属催化剂和化学氧化剂的使用。该电化学合成方法的基本路线如下:以炔基酮和二苯基二硒醚为底物,通过使用不同反应溶剂在室温条件下对反应液进行直接电解完成硒代吡喃酮和查尔酮的快速合成(图2)。该反应具有绿色、条件温和、高效、可操作性强且便于教学实施等优点。

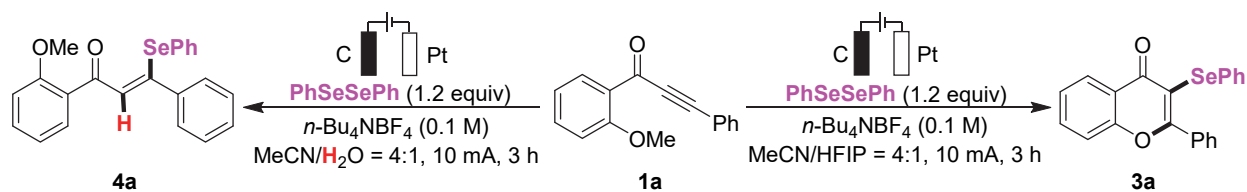


图2 电化学合成含硒吡喃酮(3a)和查尔酮(4a)

1.2 反应机理

1.2.1 循环伏安法

循环伏安法在电化学转化过程中起至关重要的作用，并协助反应机理研究的推测。我们在标准反应条件下对标准底物1-甲氧基-2-(苯基乙炔基)苯(1a)和二苯基二硒醚(2a)进行氧化电势的测试，测试了两种底物的氧化电位。

如图3所示，标准底物1-(2-甲氧基苯基)-3-苯基丙-2-炔-1-酮(1a)的氧化电位约为2.01 V (vs. Ag/AgCl)，二苯基二硒醚2a的氧化峰约为1.38 V (vs. Ag/AgCl)，远低于标准底物1-(2-甲氧基苯基)-3-苯基丙-2-炔-1-酮(1a)的氧化峰。以上测试结果表明，硒化试剂二苯基二硒醚2a相比于标准底物1-(2-甲氧基苯基)-3-苯基丙-2-炔-1-酮(1a)容易在阳极被氧化参与反应。

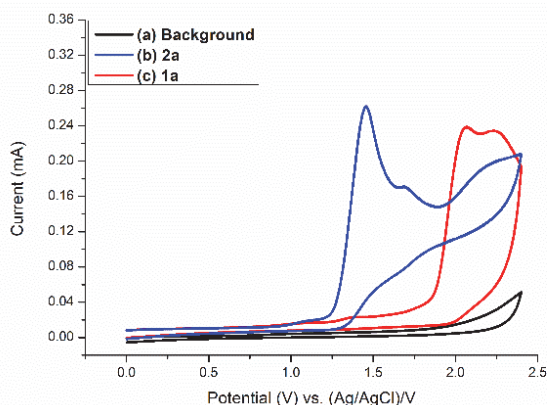


图3 电化学原料的循环伏安图

测试条件：工作电极为石墨，辅助电极为铂，乙腈为溶液，辅助电解质为 $n\text{-Bu}_4\text{NBF}_4$ ($0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)，扫描速度为 $100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$

电子版为彩图，下同

1.2.2 可能的反应机理

在有机电化学合成中，根据电解方式和电子传递方式的不同，把电解模式可分为直接电解和间接电解。在直接电解模式中，底物在电极表面参与反应得到电子或者失去电子，原位产生活性中间体，随后发生相应的化学转化，最终生成目标产物。在间接电解过程中，反应体系需要一种媒介或介质，这种媒介或介质先在电极表面发生电子转移，生成活性的中间体，然后活性中间体再跟底物起作用发生电子转移，随后通过一系列的氧化还原反应生成目标化合物和媒介或介质，电催化剂或介质再次参与反应实现电化学循环。本实验采用直接电解的方法，在电极表面发生反应，该反应中的硒化试剂二苯基二硒醚直接在电解表面参与反应，通过一系列的转化后生成含硒目标产物。

根据循环伏安法实验结果和已发表的相关文献^[10]，我们对该电化学硒化环化反应提出了可能的反应机理(图4)。在该电化学硒化反应中，底物二苯基二硒醚2a参与阳极氧化和阴极还原，生成苯硒自由基、苯硒阳离子A和苯硒阴离子B。首先，底物2a在阳极氧化生成自由基正离子中间体A'

中间体A'生成苯硒基阳离子A和苯硒基自由基。标准底物1a跟苯硒基阳离子A结合生成中间体C，中间体C合环后生成中间体D，随后在苯硒基阴离子B的作用下脱甲基后生成目标产物3a和PhSeMe。同时，苯硒基阴离子B进攻标准底物1a的碳碳三键生成中间体E，中间体E质子化后生成含硒查尔酮的产物4a。

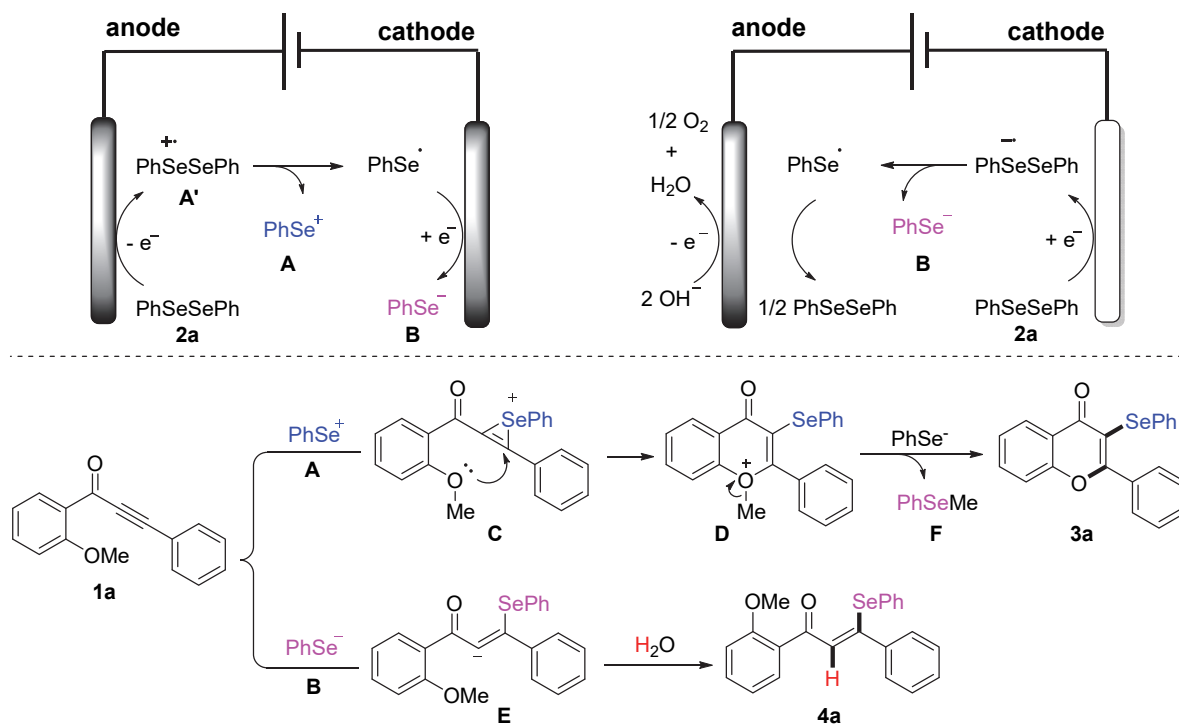


图4 可能的反应机理

2 实验所用试剂与仪器

2.1 试剂耗材

邻甲氧基苯甲酰氯、苯乙炔、双三苯基磷二氯化钿、碘化亚铜、四氢呋喃、三乙胺、二苯基二硒醚、四丁基四氟硼酸铵、乙腈、六氟异丙醇、二氯甲烷、无水硫酸镁、氘代氯仿(98%D)(以上试剂为分析纯，购自安耐吉化学、上海毕得医药等试剂公司)；石油醚(PE, 60–90 °C)、乙酸乙酯(EA)(以上溶剂为分析纯，购自广州佳钻生物科技有限公司)；柱层析硅胶(300–400目，购自山西诺泰)；石墨片(规格为1.0 cm × 1.0 cm × 0.2 cm，购自北京晶龙特碳有限公司)，铂片(规格为1.0 cm × 1.0 cm × 0.01 cm，天津艾达)。

2.2 仪器

400 MHz核磁共振仪(JEOL, 日本)、高分辨质谱仪HR-MS(JEOL, 日本)、MPD-3003S直流稳压电源(伊利诺斯工具制品)、B13-3型恒温定时磁力搅拌器(上海司乐)、RV10型旋转蒸发仪(IKA, 德国)、分析天平(赛多利斯, 德国)、WFH-204BS手提式紫外分析仪(杭州齐威仪器)、移液枪(Thermo, 美国)、真空系统、100 mL和250 mL的圆底烧瓶、10 mL的三颈圆底烧瓶、分液漏斗、锥形瓶、硅胶柱，电极夹、磁子、注射器、反口胶塞、针头等。

3 实验步骤

3.1 炔基酮底物的制备

取干燥的100 mL两口圆底烧瓶，分别加入PdCl₂(PPh₃)₂ (2 mol% (摩尔百分比)，140 mg)和CuI

(4 mol%, 80 mg)用氩气保护, 再加入20 mL四氢呋喃和5 mL三乙胺, 随后加入邻甲氧基苯甲酰氯(10 mmol, 1.71 g)搅拌5 min后, 加入苯乙炔(12 mmol, 1.22 g), 将反应体系在50 °C的油浴锅里搅拌6 h。通过采用薄层层析法(TLC)跟踪反应进程确认反应有没有结束, 反应结束后, 将反应体系用硅藻土或粗硅胶(100–200目)过滤, 用二氯甲烷冲洗3次, 收集滤液, 真空浓缩溶剂。将残余物通过硅胶柱色谱法进行纯化, 以石油醚(PE)和乙酸乙酯(EA)为洗脱液($V_{PE} : V_{EA} = 100 : 1 \rightarrow 15 : 1$), 得到棕色液状的产物**1a** (2.20 g, 收率93%, 见图5)。

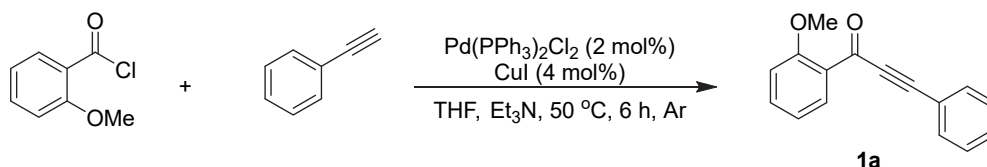


图5 炔基酮底物的合成路线

3.2 电化学合成装置的搭建

实验通过直接电解原理利用未分隔电解池得到含硒目标产物。如图6所示, 该电化学装置所需要的配件有两个电极片、两根电极夹、三个橡胶塞、干燥的10 mL三颈烧瓶、搅拌子、恒电流仪和磁力搅拌器。首先把电极片夹在电极夹, 然后把电极夹跟已打孔好的橡胶塞匹配好分别插入三口瓶的左右瓶口, 随后称取所需的反应物并加入搅拌子, 添加溶剂将反应瓶固定在夹子上进行通电反应。

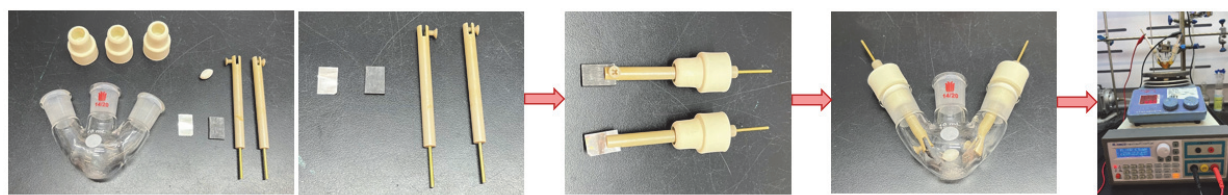


图6 电化学合成装置的搭建步骤

3.3 含硒吡喃酮的电化学合成

电化学合成需要电解池, 在电化学合成中化学反应通过外界电源的作用下进行, 其与传统的化学反应有所不同, 不需多余的氧化剂或还原剂。电化学装置一般分为两种: 一种是在电化学合成领域常用的未分隔电解池, 因未分隔电解池操作简单更受大家的热爱; 另外一种是分隔电解池, 为了避免阴极和阳极的反应相互影响, 分隔电解池的阳极和阴极被一层隔膜分开。含硒吡喃酮的电化学合成路线如图7所示, 该反应在未分隔的10 mL三颈烧瓶中进行(电解装置如图8a)。操作如下: 取干燥的10 mL三颈烧瓶, 装入干净的搅拌子。分别称取118 mg的1-(2-甲氧基苯基)-3-苯基丙基-2-合-1-酮(1.0 equiv., 0.5 mmol), 187 mg的二苯基二硒醚(1.2 equiv., 0.6 mmol)和165 mg的电解质 $n\text{-Bu}_4\text{NBF}_4$ (0.5 mmol), 并依次添加到反应瓶内, 随后固定在铁架台上。用移液枪吸取5.0 mL乙腈于反应瓶中, 然后将铂片电极(1.0 cm × 1.0 cm × 0.01 mm)和石墨电极(1.0 cm × 1.0 cm × 2 mm)的橡胶塞插入反应瓶, 再将反应瓶置于磁力搅拌器中进行搅拌2–3 min完全溶解。将铂电极与直流电源的负极相接, 石墨电极与电源的正极相接, 启动直流电源进行电解, 把电流设定为10 mA, 室温下反应3 h。采用薄层层析法跟踪反应进程(图8b), 反应完全结束后, 把反应液转移到50 mL的圆底烧瓶, 再加3–4勺的粗硅胶(100–200目), 真空浓缩溶剂, 将粗产物通过硅胶柱色谱法进行纯化, 以石油醚(PE)和乙酸乙酯(EA)为洗脱液($V_{PE} : V_{EA} = 100 : 1 \rightarrow 20 : 1$), 过柱分离得到淡黄色固体状的硒化环化产物**3a** (179 mg, 收率95%,)。当把电流调到15 mA时, 反应以89%的收率在2 h内转化完目标产物**3a**。

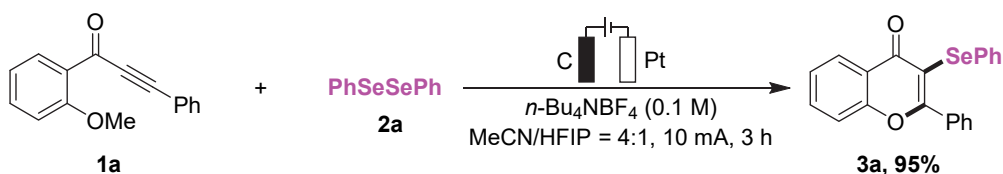


图7 含硒吡喃酮的电化学合成路线

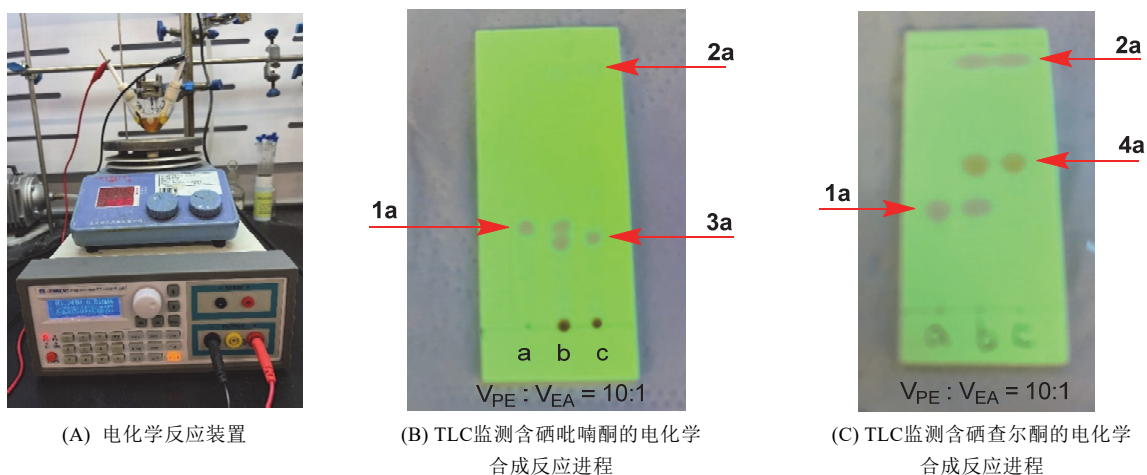


图8 电化学反应装置和TLC监测电化学合成反应进程

图B、C中, a: 原料1a; b: 混合点; c: 反应体系

3.4 含硒查尔酮的电化学合成

如图8a所示, 该合成在10 mL三颈烧瓶中进行。操作如下: 取干燥的10 mL三颈烧瓶, 装入干净的搅拌子。分别称取118 mg的1-(2-甲氧基苯基)-3-苯基丙基-2-合-1-酮(1.0 equiv., 0.5 mmol), 187 mg的二苯基二硒醚(1.2 equiv., 0.6 mmol)和165mg的电解质 $n\text{-Bu}_4\text{NBF}_4$ (0.5 mmol), 并依次添加到反应瓶内, 随后固定在铁架台上。用移液枪吸取4.0 mL乙腈于反应瓶中搅拌2–3 min完全溶解再加1.0 mL的蒸馏水, 然后将铂片电极(1.0 cm × 1.0 cm × 0.01 mm)和石墨电极(1.0 cm × 1.0 cm × 2 mm)的电机夹插入反应瓶, 再将反应瓶置于磁力搅拌器中进行搅拌。将铂电极与直流电源的负极相接, 石墨电极与电源的正极相接, 把电流设定为10 mA, 启动直流电源进行电解, 室温下反应3 h。采用TLC跟踪反应进程程度(图8c), 反应完全结束后, 把反应液转移到50 mL的圆底烧瓶, 再加3–4勺的粗硅胶(100–200目), 真空浓缩溶剂, 通过硅胶柱色谱法进行纯化, 以石油醚(PE)和乙酸乙酯(EA)为洗脱液($V_{\text{PE}} : V_{\text{EA}} = 100 : 1 \rightarrow 20 : 1$), 分离得到黄色固体硒化环化产物4a (179 mg, 收率91%, 图9)。

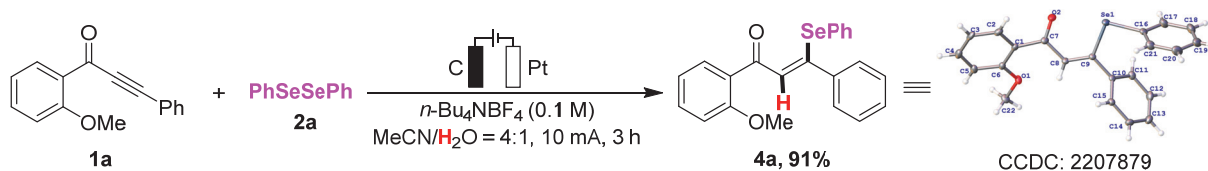


图9 含硒查尔酮的电化学合成路线

4 结果与讨论

4.1 电化学产物的表征

取30.0 mg左右的纯化好的电化学生物目标产物样品溶于适量的氘代氯仿(CDCl_3)中, 一般氘代氯仿

用量0.6 mL最佳, 然后转移到核磁管中充分摇匀, 室温下利用核磁测定其氢谱(^1H NMR), 碳谱(^{13}C NMR), 再用高分辨质谱仪(HR-MS)测定其分子量, 进一步分析确定结构。

电化学方法合成的含硒吡喃酮产物**3a**的核磁共振氢谱、核磁共振碳谱和高分辨质谱表征数据分析及谱图如下:

化合物**3a**的核磁共振氢谱(^1H NMR)数据分析, 如图10所示, ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) $\delta_{\text{H}} = 8.25$ (d, $J = 7.8$ Hz, 1H), 7.68 (dd, $J = 13.5, 7.3$ Hz, 3H), 7.48 (d, $J = 8.2$ Hz, 2H), 7.46–7.40 (m, 3H), 7.33–7.28 (m, 2H), 7.16–7.11 (m, 3H)。

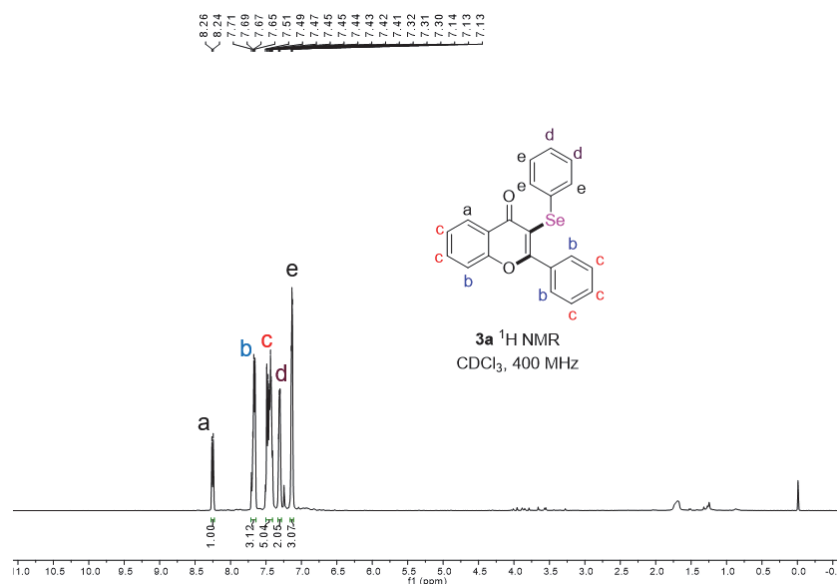


图10 化合物**3a**的核磁共振氢谱图

化合物**3a**的核磁共振碳谱(^{13}C NMR)数据分析, 如图11所示, ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) $\delta_{\text{C}} = 176.1, 168.0, 156.1, 134.3, 134.1, 131.4, 131.1, 131.0, 130.9, 129.4, 129.2, 128.1, 126.8, 125.8, 122.5, 118.0, 114.1$ 。

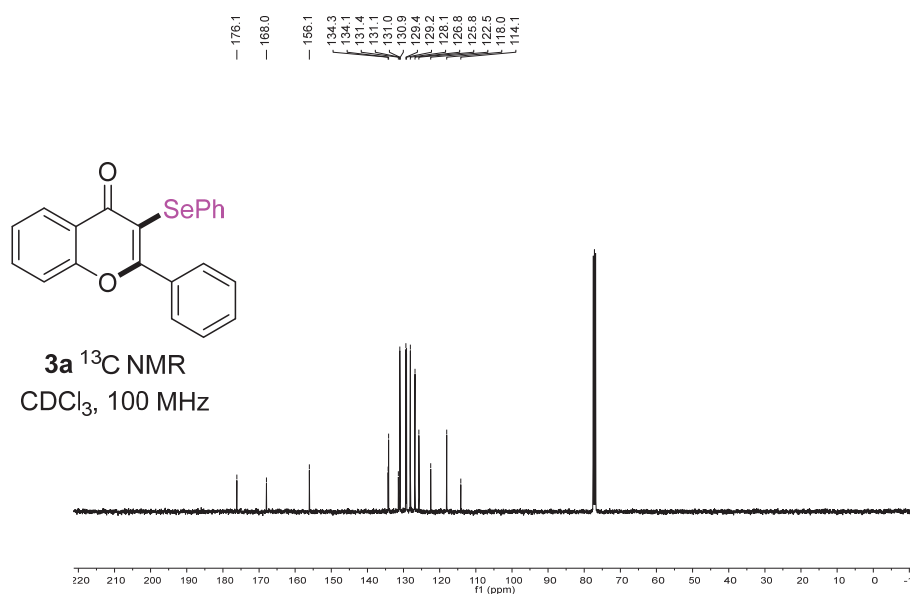


图11 化合物**3a**的核磁共振碳谱图

电化学方法合成的含硒吡喃酮产物**3a**的高分辨质谱图如图12所示, HR-MS (ESI) m/z : $[M + H]^+$ 理论值为379.0232; 实际测定值为379.0226, 测试结果在误差允许范围之内。

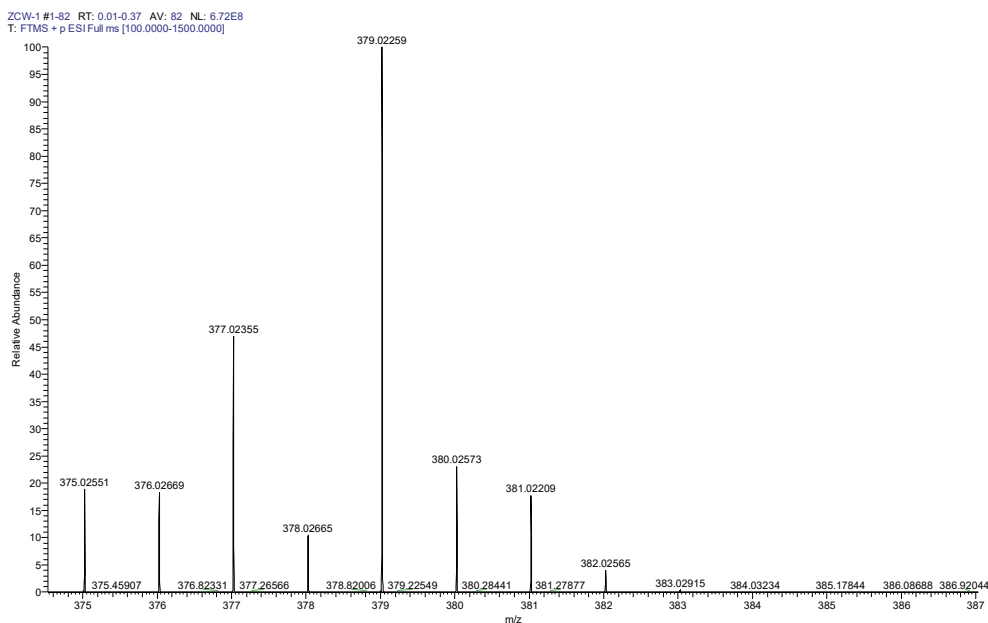


图12 化合物**3a**的高分辨质谱图

电化学方法合成的含硒查尔酮产物**4a**的核磁共振氢谱、核磁共振碳谱和高分辨质谱表征数据分析及谱图如下:

化合物**4a**的核磁共振氢谱($^1\text{H NMR}$)数据分析, 如图13所示, $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3) $\delta_{\text{H}} = 7.85$ (dd, $J = 6.0, 3.7$ Hz, 1H), 7.60–7.56 (m, 1H), 7.49–7.42 (m, 1H), 7.25 (d, $J = 7.5$ Hz, 2H), 7.11–7.04 (m, 7H), 7.01–6.94 (m, 3H), 3.88 (s, 3H)。

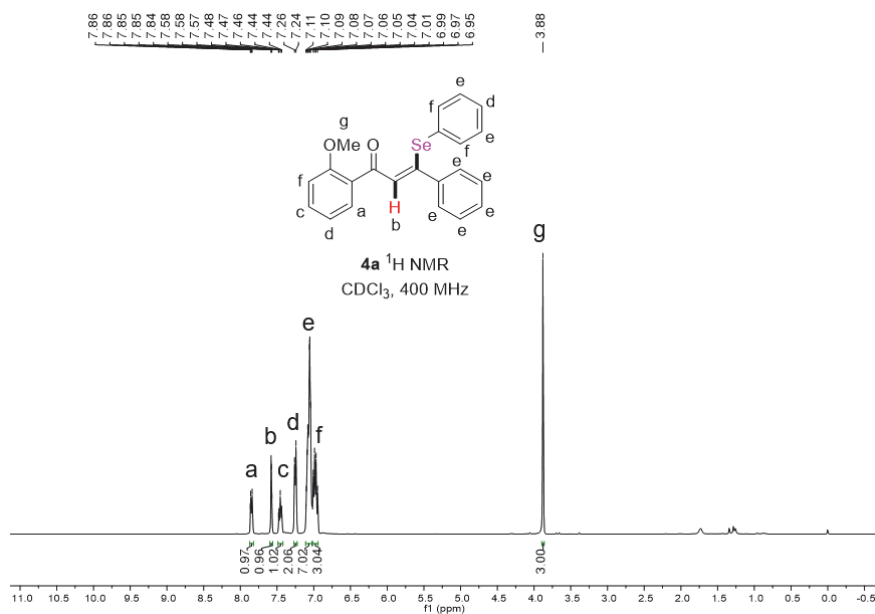


图13 化合物**4a**的核磁共振氢谱图

化合物**4a**的核磁共振谱(^{13}C NMR)数据分析, 如图14所示, ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ_{C} = 189.9, 162.5, 158.3, 140.0, 136.1, 133.4, 131.3, 130.7, 129.1, 128.9, 128.4, 128.0, 127.8, 127.5, 126.3, 121.0, 111.7, 55.8。

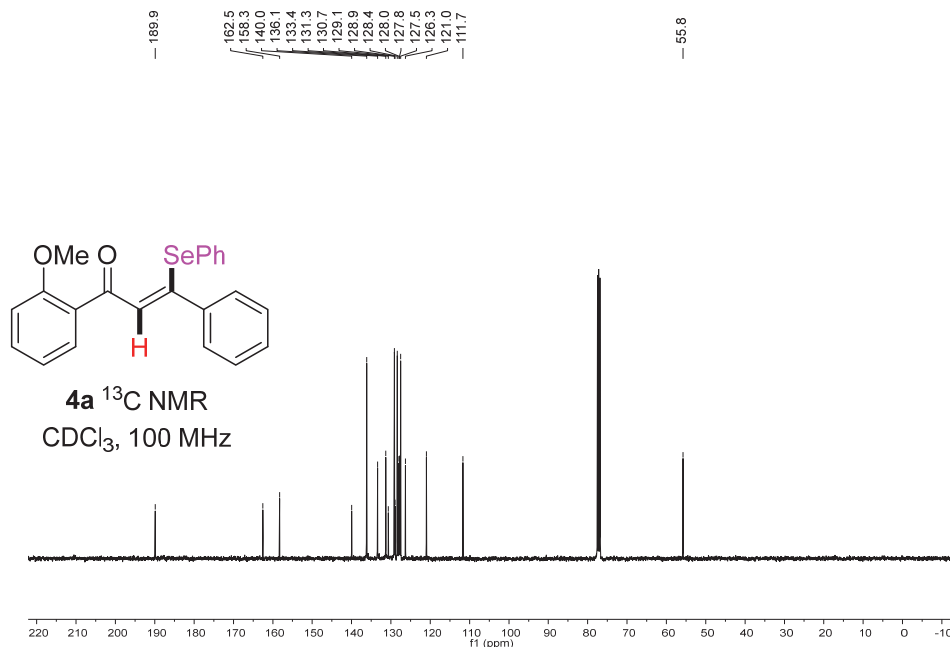


图14 化合物**4a**的核磁共振谱图

电化学方法合成的含硒查尔酮产物**4a**的高分辨质谱图谱如图15所示, HR-MS (ESI) m/z : $[\text{M} + \text{H}]^+$ 和 $[\text{M} + \text{Na}]^+$ 理论值分别为395.0545和417.0364; 实际测定值分别为395.0544和417.0360, 测试结果在误差允许范围之内。

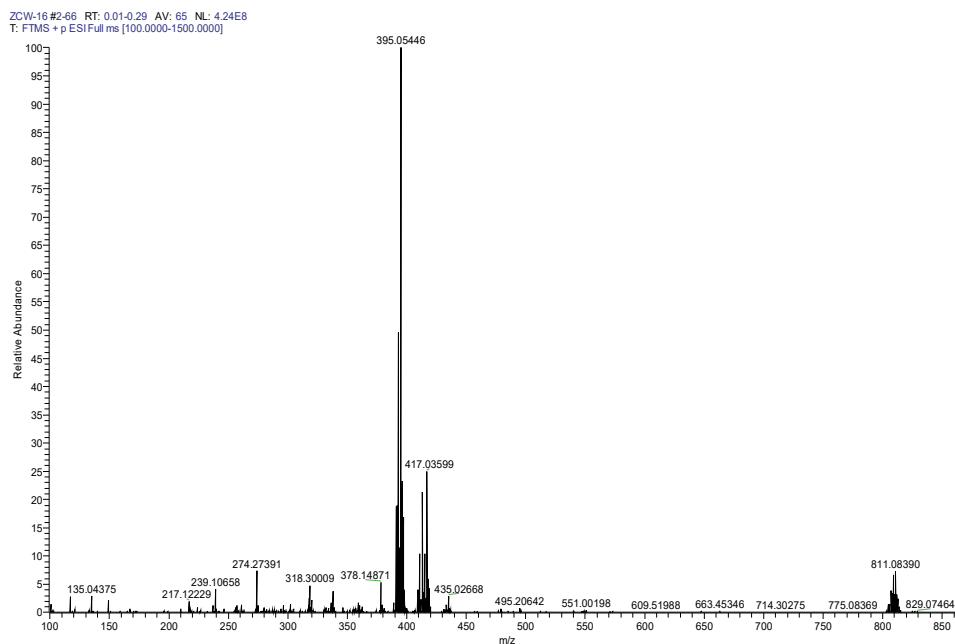


图15 化合物**4a**的高分辨质谱图

4.2 含硒查尔酮产物4a的单晶培养和X射线单晶衍射

取三支2 mL的离心管，分别称取30 mg左右的目标产物4a加入到离心管中，先用1 mL的二氯甲烷把固体完全溶剂，再加入0.5 mL的乙腈，用封口膜密封离心管口，在封口膜上扎3-4个小孔，有利于溶剂挥发，放置于通风橱，静置3-5天，待溶剂缓慢挥发后，观察单晶析出情况，选择晶型较好的一只进行X射线衍射。实验结果表明，当二氯甲烷和乙腈做混合溶剂养单晶时，单晶析出效果较好，离心管壁可以清晰看到明显的片状晶体。将晶型较好的单晶进行X射线衍射，数据解析后，可以观察到含硒查尔酮结构，硒原子与查尔酮骨架的连接方式及各原子的空间分布以我们所设想的结构一致(图9)。

4.3 实验讨论

本实验利用简单绿色的电化学合成方法通过溶剂调控分别高效的合成了含硒吡喃酮和查尔酮化合物。该反应在10 mL三口圆底烧瓶，分别以石墨片为阳极电极材料和铂片为阴极电极材料，利用不同反应溶剂在恒电流10 mA反应3 h，即能以良好的收率得到相应的含硒目标产物吡喃酮(3a)和查尔酮(4a)。

最重要的是，该电化学实验方案融入了以“科学问题为目标导向”的探究型实验模式，把“绿色合成”理念和有机电化学合成方法的基本原理和过程带入到本科实验教学。

4.4 通电量和电流效率的计算^[11]

通常，可用下式来计算电化学反应的电量(Q):

$$Q = I \cdot t \quad (1)$$

式中， Q 为电量，C； I 为电流，A； t 为通电时间，s。

无论是在实验室小规模的电化学合成，还是工业化的电解生产，实际电解得到的产物往往总比理论产物少，这就存在着电流效率问题。

通常，我们把实际生成物质的量与按法拉第定律计算应生成物质的量之比称作电流效率，如下式所示

$$\text{电流效率} = \frac{\text{实际产量}}{\text{理论产量}} \times 100\% \quad (2)$$

5 课后思考

- (1) 在电化学合成中，影响电量的因素有哪些？
- (2) 根据电量公式，计算电流为15 mA的电量为多少？
- (3) 根据电量公式，计算该反应在5 mA的电流下所需要的反应时间？
- (4) 化合4a的特征峰有哪些？

6 教学建议

- (1) 当使用电极夹时，要检查电极片是否牢固，避免在反应过程中电极片掉落。
- (2) 建议把底物合成和电化学两部分内容分别安排两个课时，同时电化学合成部分可以以小组形式进行。建议将化合物表征环节安排到课后。

7 结语

本实验利用在有机化学合成领域最热的合成方法——电化学合成方法，以廉价易得的原料为底物，通过溶剂调控来得到高产率的含硒吡喃酮和查尔酮，在含硒杂环化合物合成领域提供了新型合成方法。该电化学实验方案涉及到初始原料的合成、电化学反应过程、循环伏安法测试、电化学生产物的结构表征、晶体培养等多样性的实验操作环节，对学生的合成操作能力和过程分析等重要的技

能进行系统的训练和提高, 为学生进行化学科学研究打好扎实的理论基础。总之, 该电化学实验方案具有较好的前沿性和综合的操作性, 适用于高年级本科生的实践教学。

参 考 文 献

- [1] Hou, W.; Xu, H. *J. Med. Chem.* **2022**, 65, 4436.
- [2] Nogueira, C. W.; Zeni, G.; Rocha, J. B. *Chemical Rev.* **2004**, 104, 6255.
- [3] Godoi, B.; Schumacher, R. F.; Jurinic, C. K.; Belladonna, A. L. *Synthesis* **2021**, 53, 2545.
- [4] Kundu, D. *RSC advances* **2021**, 11, 6682.
- [5] Ma, Y. T.; Liu, M. C.; Zhou, Y. B.; Wu, H. Y. *Adv. Synth. Catal.* **2021**, 363, 5386.
- [6] 王振华, 马聪, 方萍, 徐海超, 梅天胜. *化学学报*, **2022**, 80, 1115.
- [7] Yuan, Y.; Yang, J.; Lei, A. *Acc. Chem. Res.* **2021**, 50, 10058.
- [8] Zhu, C.; Ang, N. W. J.; Meyer, T. H.; Qiu, Y.; Ackermann, L. *ACS Cent. Sci.* **2021**, 7, 415.
- [9] Hasimujiang, B.; Zhu, J.; Xu, W.; Wang, H.; Hu, X.; Ruan, Z. *Adv. Synth. Catal.* **2023**, 365, 2929.
- [10] Sun, L.; Yuan, Y.; Yao, M.; Wang, H.; Wang, D.; Gao, M.; Chen, Y. H.; Lei, A. *Org. Lett.* **2019**, 21, 1297.
- [11] 马淳安. *有机电化学合成导论*. 北京: 科学出版社, 2002: 154–159.