

钯催化4-乙烯基苯并噁嗪酮和茚-2-甲醛串联环化反应 ——介绍一个有机化学综合实验

张茜苑, 董锐, 杨洋, 丁佳鹏, 苗志伟*

南开大学化学学院, 元素有机化学国家重点实验室, 天津 300071

摘要: 有机化学综合实验是化学教育中不可或缺的一环, 它不仅能够显著提高本科生的基本实验技能, 而且有助于加深本科生对专业知识的理解和掌握, 为未来的学术探索和职业生涯奠定坚实的基础。本文介绍了一个有机化学综合实验, 以茚-2-甲醛和4-乙烯基苯并噁嗪酮为反应物, 利用钯催化串联环化反应合成12-乙烯基-7,12-二氢苯并[双]茚并[1,2-*e*]氮杂卓化合物, 并且使用高分辨质谱(HRMS)、核磁共振氢谱(^1H NMR)和碳谱(^{13}C NMR)等技术手段对产物结构进行表征。

关键词: 有机化学综合实验; 串联环化反应; 钯催化; 合成与结构表征

中图分类号: G64; O6

Palladium-Catalyzed Tandem Cyclization of 4-Vinylbenzoxazinone and Indene-2-carbaldehyde: A Comprehensive Organic Chemistry Experiment

Xiyuan Zhang, Rui Dong, Yang Yang, Jiapeng Ding, Zhiwei Miao *

State Key Laboratory of Elemento-Organic Chemistry, College of Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China.

Abstract: Comprehensive organic chemistry experiments constitute a fundamental component of chemical education, serving to significantly enhance undergraduates' basic laboratory skills while deepening their understanding of specialized knowledge. This foundation proves crucial for future academic pursuits and professional development. We present herein an integrated organic chemistry experiment involving the palladium-catalyzed tandem cyclization of 4-vinylbenzoxazinone and indene-2-carbaldehyde to synthesize 12-vinyl-7,12-dihydrobenzo[*b*]indeno[1,2-*e*]azepine. The product structure was characterized using high-resolution mass spectrometry (HRMS), along with ^1H and ^{13}C nuclear magnetic resonance spectroscopy.

Key Words: Comprehensive organic chemistry experiment; Tandem cyclization; Palladium catalysis; Synthesis and structural characterization

有机化学综合实验对于化学及相关专业高年级本科生的培养具有至关重要的作用, 它是学生在完成基础有机化学课程和实验后, 进一步深化理解和应用有机化学知识的重要环节。有机化学综合实验通常涉及多个有机化学的基本概念和反应类型, 要求学生将理论知识与实际操作相结合, 从而

收稿: 2024-10-21; 录用: 2025-01-16; 网络发表: 2025-05-22

*通讯作者, Email: miaoziwei@nankai.edu.cn

基金资助: 国家自然科学基金面上项目(22071113); 福建省南平市科技项目(N2020Z008); 南开大学沧州渤海新区绿色化工研究院基金项目(NCC2020FH01)

加强学生对有机化学基础知识的掌握^[1-3]。在实验过程中学生将课本学习到的各种有机合成技术、分离纯化方法以及化合物的结构鉴定技术，如核磁共振氢谱(¹H NMR)、碳谱(¹³C NMR)和高分辨质谱(HRMS)等理论知识在实践中得到应用，从而能够为未来的学术研究或生产实践打下坚实的基础。本文所介绍的有机化学综合实验来自南开大学化学学院“基础学科拔尖学生培养试验计划”(以下简称“拔尖计划”)^[4]实施过程中取得的研究成果，是以培养本科生的科研思维和实验技能为目的而设计的一个有机化学综合实验。

12-乙基基-7,12-二氢苯并[双]茚并[1,2-*e*]氮杂卓化合物作为一类苯并七元氮卓类衍生物(图1)，在有机合成化学领域展现出了广泛的应用前景。这类化合物因其显著的抗肿瘤、抗菌和抗疟疾等生物活性^[5-7]而备受瞩目，因此发展此类化合物的高效合成方法具有十分重要的意义。本文介绍的有机化学综合实验采用4-乙基基苯并噁嗪酮和茚-2-甲醛作为反应物，通过钯催化的串联环化反应来合成苯并七元氮卓类衍生物。该合成路线综合性强、涉及多个复杂实验操作步骤，要求实验者具备一定的专业知识和科学素养，令其成为进一步锻炼化学专业高年级本科生实验能力的理想选择。通过参与这一实验，学生能够显著提升自己的实验操作技能，并在实践中锻炼科研能力。

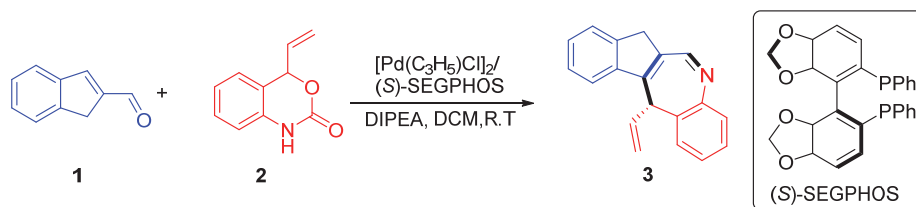


图1 12-乙基基-7,12-二氢苯并[双]茚并[1,2-*e*]氮杂卓化合物的合成路线

1 实验目的

- (1) 熟练掌握多步有机合成实验的操作步骤；
- (2) 熟知如何监测反应进程以及如何分离纯化化合物；
- (3) 掌握使用高分辨质谱、核磁共振氢谱和碳谱鉴定化合物结构的方法；
- (4) 明确实验室安全守则和危险应对措施。

2 仪器和试剂

实验所需的实验仪器和实验试剂见表1、表2。

表1 实验仪器

实验仪器名称	仪器型号	仪器制造商
电子天平	ME104T/02	梅特勒托利多科技(中国)有限公司
旋转蒸发仪	BUCHI-R3	瑞士步琦有限公司
高分辨质谱仪(ESI-HRMS)	Varian 7.0型	美国瓦里安技术中国有限公司
暗箱式紫外分析仪	ZF-20D	河南巩义市予华仪器有限责任公司
核磁共振波谱仪	AVANCE NEO 400M	布鲁克(德国)
磁力搅拌器	Hei-Tec	海道尔夫仪器设备(上海)有限公司
电热恒温鼓风干燥箱	YH-3D	上海一恒科学仪器有限公司
高效液相色谱仪	SPD-20A	岛津(日本)
循环水式多用真空泵	SHZ-D (III)	河南巩义市英峪仪器厂

表2 实验试剂

实验试剂名称	实验试剂纯度	实验试剂生产商
1-茛酮	AR	天津希恩斯生化科技股份有限公司
三氟化硼乙醚	48%	安徽泽升科技有限公司
原甲酸三乙酯	97%	天津希恩斯生化科技股份有限公司
<i>N,N</i> -二异丙基乙胺	AR	北京百灵威科技有限公司
硼氢化钠	AR	北京百灵威科技有限公司
盐酸	AR	上海毕得医药科技股份有限公司
邻氨基苯甲醇	AR	上海毕得医药科技股份有限公司
二碳酸二叔丁酯	AR	天津希恩斯生化科技股份有限公司
氯铬酸吡啶盐	AR	上海毕得医药科技股份有限公司
乙烯基溴化镁	AR	安徽泽升科技有限公司
碳酸钾	AR	上海毕得医药科技股份有限公司
烯丙基氯化钨二聚体	> 99%	上海毕得医药科技股份有限公司
(<i>S</i>)-(+)-5,5-双(二苯基膦)-4,4'-二-1,3-胡椒环	> 99%	上海毕得医药科技股份有限公司

3 实验步骤

3.1 茛-2-甲醛的合成^[8]

将原甲酸三乙酯3.3 mL (20 mmol)溶于10 mL二氯甲烷, 冷却至-30 °C逐滴加入三氟化硼乙醚溶液3.0 mL (24 mmol) 置于0 °C搅拌15 min后, 冷却至-78 °C将1-茛酮(**S-1**) 1.32 g (10 mmol)溶于10 mL二氯甲烷通过注射器加入到上述体系中, 随后滴加*N,N*-二异丙基乙胺(DIPEA) 5.2 mL (30 mmol)搅拌1 h后, 置于0 °C再搅拌1 h。用薄层层析色谱($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=5:1$)监测反应原料完全消耗后, 将40 mL饱和NaHCO₃溶液加入反应体系中, 再加入20 mL的二氯甲烷(DCM)萃取水相两次, 合并有机相后用无水MgSO₄固体粉末干燥有机相, 通过抽滤过滤干燥剂, 旋转蒸发仪浓缩, 冷却后得黄色固体, 用混合溶剂($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{二氯甲烷}}=4:1$)对黄色固体进行洗涤, 清除黄色油状物杂质, 然后快速过滤分离得到白色固体产物**S-2** 1.45 g, 收率62%。

将**S-2** 1.64 g (7 mmol)溶于10 mL的甲醇, 0 °C加入硼氢化钠0.266 g (14 mmol)搅拌2 h, 再加入35 mL的盐酸(6 mol·L⁻¹)搅拌2 h。用薄层层析色谱($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=5:1$)监测反应原料完全消耗后, 将30 mL饱和NH₄Cl溶液加入反应体系中, 再加入20 mL的乙酸乙酯萃取水相两次, 合并有机相后用无水MgSO₄固体粉末干燥有机相, 通过抽滤过滤干燥剂, 旋转蒸发仪浓缩, 用硅胶柱层析纯化($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=5:1$ 为流动相), 分离得茛-2-甲醛为黄色油状物0.6 g, 收率60% (图2)。

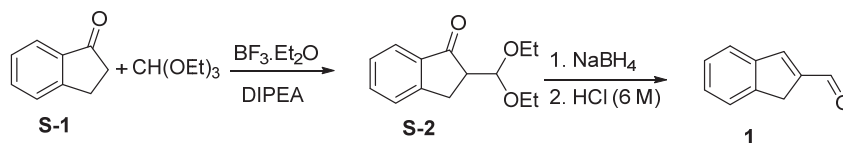


图2 茛-2-甲醛1的合成路线

3.2 4-乙烯基苯并噁嗪酮的合成^[9]

将邻氨基苯甲醇(**S-3**) 1.23 g (10 mmol)溶于25 mL的1,2-二氯乙烷中, 再加入二碳酸二叔丁酯((Boc)₂O) 2.4 g (11 mmol), 置于85 °C搅拌2 h, 用薄层层析色谱($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=5:1$)监测反应原料完全消耗后, 生成叔丁氧羰基保护的苯环邻位的氨基苯甲醇**S-4**的粗产物。体系恢复到室温后加入氯铬酸吡啶盐(PCC) 2.58 g (12 mmol)搅拌4 h, 用薄层层析色谱($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=5:1$)监测反应原料完

全消耗后, 旋转蒸发仪浓缩, 用硅胶柱层析纯化($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=10:1$ 为流动相), 分离得叔丁基(2-甲醛苯基)氨基甲酸酯**S-5**为黄色油状物1.77 g, 两步收率为80%。

将上述合成的叔丁基(2-甲醛苯基)氨基甲酸酯**S-5** 1.77 g (8 mmol)加入100 mL的叔丁克管中, 使其溶解在20 mL四氢呋喃中, 置于 -40°C 在氩气保护下加入乙烯基溴化镁16 mL (16 mmol, 浓度为 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的四氢呋喃溶液)搅拌2 h。用薄层层析色谱($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=5:1$)监测反应原料完全消耗后, 将30 mL饱和 NaHCO_3 溶液加入反应体系中, 再加入20 mL的乙酸乙酯萃取水相两次, 合并有机相后用无水 MgSO_4 固体粉末干燥有机相, 通过抽滤过滤干燥剂, 旋转蒸发仪浓缩得叔丁基-(2-(1-羟基烯丙基)苯基)氨基甲酸酯**S-6**的粗产物。在100 mL的圆底烧瓶中将**S-6**的粗产物溶解在20 mL甲醇中, 加入粉末状的 K_2CO_3 固体1.7 g (8 mmol), 置于 50°C 搅拌2 h。用薄层层析色谱($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=5:1$)监测反应原料完全消耗后, 将10 mL的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 稀盐酸加入反应体系中, 再加入20 mL的乙酸乙酯萃取水相两次, 合并有机相后用无水 MgSO_4 固体粉末干燥有机相, 通过抽滤过滤干燥剂, 旋转蒸发仪浓缩, 冷却后得棕黄色固体, 用混合溶剂($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=4:1$)对棕黄色固体进行洗涤, 溶解棕色油状杂质, 快速过滤分离得4-乙烯基苯并噁嗪酮**2**为淡黄色固体0.73 g, 四步总收率为42% (图3)。

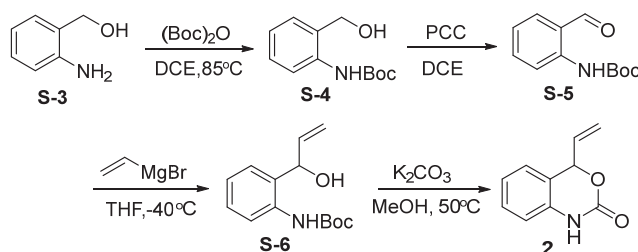


图3 4-乙烯基苯并噁嗪酮合成路线

3.3 茛-2-甲醛和4-乙烯基苯并噁嗪酮的[3+4]环加成反应^[10]

在50 mL叔丁克管中加入 $[\text{Pd}(\text{C}_3\text{H}_5)\text{Cl}]_2$ (36.5 mg, 10% mol)和(*S*)-(+)-5,5-双(二苯基膦)-4,4-二-1,3-胡椒环(122 mg, 20 mol% (摩尔百分比)), 通入氩气保护后加入10 mL的二氯甲烷室温搅拌0.5 h。将茛-2-甲醛**1** (1.5 mmol)和*N,N*-二异丙基乙胺(DIPEA) (20 mol%)溶于5 mL二氯甲烷通过注射器加入叔丁克管中, 搅拌15 min后, 再将4-乙烯基苯并噁嗪酮**2** (1.0 mmol)溶于5 mL二氯甲烷通过注射器加入叔丁克管中, 室温搅拌反应7 h并利用薄层色谱监测反应进程。待原料4-乙烯基苯并噁嗪酮消耗完全后, 旋转蒸发仪浓缩体系, 用硅胶柱层析纯化($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}:V_{\text{三乙胺}}=5:1:0.1$ 为流动相), 分离得产物**3** 167 mg, 收率为65% (图4)。

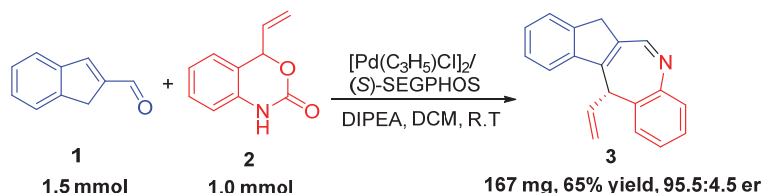


图4 茛-2-甲醛和4-乙烯基苯并噁嗪酮的[3+4]环加成反应

4 结果与讨论

4.1 茛-2-甲醛**1**的结构表征

使用高分辨质谱、核磁共振氢谱和碳谱表征了化合物**1**的分子结构。其中, $^1\text{H NMR}$ 中 δ 3.68为茛环上亚甲基的两个氢, δ 7.64–7.33为苯环上四个氢, δ 7.75为烯烃上的氢, δ 9.99为醛基上的氢。 $^{13}\text{C NMR}$ 中 δ 35.5为茛环上亚甲基 sp^3 碳的化学位移, δ 147.9–124.3为双键和芳环碳的化学位移, δ 188.3

为醛羰基碳的化学位移。 $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3): δ 9.99 (s, 1H), 7.75 (s, 1H), 7.64–7.60 (m, 1H), 7.58–7.54 (m, 1H), 7.44–7.35 (m, 2H), 3.68 (d, $J = 1.9$ Hz, 2H)。 $^{13}\text{C NMR}$ (100 MHz, CDCl_3): δ 188.3, 147.9, 147.0, 145.1, 142.2, 128.9, 127.2, 124.9, 124.3, 35.5。 HRMS (ESI+) m/z calcd. for $\text{C}_{10}\text{H}_9\text{O}$ $[\text{M}+\text{H}]^+$: 145.0648; found: 145.0646。

4.2 4-乙炔基苯并噁嗪酮2的结构表征

使用高分辨质谱、核磁共振氢谱和碳谱表征了化合物2的分子结构。其中, $^1\text{H NMR}$ 中 δ 5.42和5.38对应乙炔基上的双键末端的两个氢, δ 5.84为烯丙位的氢, δ 6.09为乙炔基上的双键内测的氢, δ 7.33–6.95对应苯环上的四个芳香取代的氢, δ 9.68为氮上的氢。 $^{13}\text{C NMR}$ 中 δ 80.3的信号峰为烯丙位 sp^3 碳的化学位移, δ 119.7和135.0对应乙炔基的双键碳, δ 153.6对应羰基碳。 $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3) δ 9.68 (s, 1H), 7.33–7.24 (m, 1H), 7.14–7.03 (m, 2H), 6.95 (d, $J = 7.9$ Hz, 1H), 6.09 (ddd, $J = 17.0, 10.5, 6.5$ Hz, 1H), 5.84 (d, $J = 6.5$ Hz, 1H), 5.42 (d, $J = 10.5$ Hz, 1H), 5.38 (d, $J = 17.0$ Hz, 1H)。 $^{13}\text{C NMR}$ (101 MHz, CDCl_3) δ 153.6, 135.0, 133.9, 129.5, 124.9, 123.4, 119.7, 119.7, 114.8, 80.3。 HRMS (ESI+) m/z calcd. for $\text{C}_{18}\text{H}_{18}\text{NO}$ $[\text{M}+\text{H}]^+$: 176.0706; found: 176.0705。

4.3 12-乙炔基-7,12-二氢苯并[双]茛并[1,2-e]氮杂卓化合物3的结构表征

使用高分辨质谱、利用核磁共振氢谱和碳谱表征了化合物3的分子结构。其中, $^1\text{H NMR}$ 中 δ 3.72和3.54对应五元环亚甲基上的两个氢, δ 4.77对应七元环上烯丙位的氢, δ 4.86–5.80对应乙炔基上的三个双键氢, δ 7.23–7.66对应两个苯环上的八个芳香氢, δ 8.52对应七元环碳氮双键上的氢。 $^{13}\text{C NMR}$ 中 δ 38.4为五元环亚甲基碳的化学位移, δ 46.7为七元环上烯丙位 sp^3 碳的化学位移, δ 151.4–115.1为双键和苯环碳的化学位移, δ 155.5为七元环亚胺碳的化学位移。 $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3) δ 8.52 (s, 1H), 7.66 (d, $J = 7.5$ Hz, 1H), 7.56–7.49 (m, 2H), 7.44–7.29 (m, 4H), 7.25–7.23 (m, 1H), 5.80 (ddd, $J = 16.9, 10.1, 5.8$ Hz, 1H), 4.93 (dt, $J = 10.1, 1.3$ Hz, 1H), 4.86 (dt, $J = 17.0, 1.4$ Hz, 1H), 4.77 (d, $J = 5.8$ Hz, 1H), 3.72 (d, $J = 22.7$ Hz, 1H), 3.54 (d, $J = 22.7$ Hz, 1H)。 $^{13}\text{C NMR}$ (101 MHz, CDCl_3) δ 155.5, 151.4, 147.0, 145.1, 143.2, 134.0, 133.6, 132.8, 129.9, 129.5, 128.6, 127.6, 127.6, 127.0, 124.7, 120.1, 115.1, 46.7, 38.4。 HRMS (ESI) m/z calcd for $\text{C}_{19}\text{H}_{16}\text{N}^+$ $[\text{M} + \text{H}]^+$ 258.1277, found 258.1278。通过高效液相色谱测定对映体比率(er值)为95.5 : 4.5。(色谱测定条件: 采用多糖衍生物正相涂敷型手性AD-H色谱柱, 流动相为 $V_{\text{正己烷}} : V_{\text{异丙醇}} = 9 : 1$, 流速为 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 柱温为 25°C , 检测波长为254 nm; 出峰保留时间: 主峰为13.4 min, 次峰为6.8 min)。

4.4 反应机理讨论

化合物3的反应机理如图5所示^[10]: 零价钯与配体(S)-SEGPHOS络合形成钯-配体手性催化剂($\text{Pd}(0)/\text{L}$)后, 能与4-乙炔基苯并噁嗪酮2的末端炔烃配位发生氧化加成反应, 通过脱羧反应生成钯稳定的两性离子 π -烯丙基中间体I。强碱性的中间体I能够脱去茛的C(sp^3)碳上的氢形成亲核性的阴离子II。II能够加成到 π -烯丙基Pd中间体I'生成关键中间体III, 随后通过缩合形成亚胺生成七元环中间体IV。由于四取代双键比三取代双键在热力学上更稳定, 在DIPEA作用下中间体IV发生异构化, 得到目标产物3(图5)。

5 实验教学实施建议

南开大学化学学院利用“夏季小学期”针对高年级本科生开展科研训练, 集中安排课时长、操作步骤多、创新性强的有机化学综合实验。每学期参加有机化学综合实验的学生有30名, 教学安排以2–3人为一组进行实验。因为该实验合成路线较长, 总计五天完成合成及表征实验。实验进度安排如下: 前三天分别合成反应的起始原料茛-2-甲醛1和4-乙炔基苯并噁嗪酮2, 由于合成目标化合物3的反应时间较长, 需要室温下搅拌7 h, 第四天上午先开启反应, 下午安排核磁、质谱、高效液相色谱的理论学习及上机操作学习, 到下午检测反应是否完成。第五天上午进行化合物3的后处理纯化过

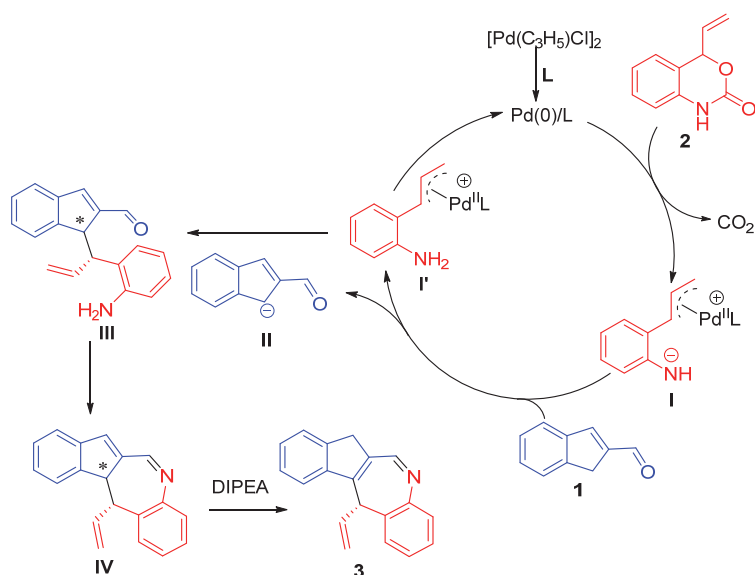


图5 合成化合物3的反应机理

程，该反应的特点是反应的化学选择性好，副产物很少，因此采用“隔夜”操作对反应没有大的不良影响；第五天下午对合成的化合物进行分析，并对测试结果进行数据分析，最后教师引导学生对实验进行归纳总结。此外建议指导教师和助教注意以下几点，以优化教学流程并确保实验的安全性和教学效果：

(1) 预实验准备：实验课教师应亲自进行预实验，了解反应大致过程，包括反应条件、试剂用量、反应时间和温度，以及任何可能的副反应。该步骤对于预防潜在的安全风险和确保实验的可重复性至关重要。

(2) 预习与安全教育：在实验前，要求学生提前阅读相关文献，理清实验原理与步骤。同时，教师应向全体学生声明实验室安全守则，令其掌握紧急情况的基本处理措施，以应对可能发生的突发情况。

(3) 理论讲解：在实验课上，教师应提供深入的反应机理讲解，包括可能的中间体、过渡态和反应动力学，帮助学生将理论知识与实验操作相结合，加深对化学反应本质的理解。

(4) 培养创新能力和独立分析能力：鼓励学生利用SCI Finder等数据库调研现有的合成方法，挑战传统思维，提出创新的合成策略。实验完成后，学生应在教师的指导下，尽量独立进行核磁共振氢谱等谱图的解析，并由此合理猜测化合物结构，从而锻炼其科研能力和批判性思维。

(5) 实验记录与分析：教师应指导学生如何准确记录实验过程中的观察结果，包括反应条件、现象和数据。同时，引导学生使用ChemDraw等专业软件进行数据分析和图表绘制，以提高实验报告的专业性和准确性。

(6) 实验操作注意事项：在使用格氏试剂和浓盐酸等危险化学品时，教师应详细讲解其安全操作规程，包括如何正确处理、储存和使用这些试剂，以及在紧急情况下的应对措施。

通过这些精心设计的教学建议，不仅能够确保实验的顺利进行，还能够有效地提升学生的实验技能、创新能力和科研素养，为他们的职业生涯或者是学术道路做好铺垫。

6 结语

本文所推荐的“钯催化4-乙烯基苯并噁嗪酮和茚-2-甲醛串联环化反应”实验，是为高年级本科生精心打造的综合实验课程。该实验对化学专业本科生的意义不仅在于巩固他们的理论知识，还能

培养动手能力和独立思考的能力。在实际操作中，学生们可以将课堂上学到的反应原理、化学方程式和实验技术应用于真实的实验情境，增强对化学反应本质的理解。同时，通过合理规划实验流程和执行多步骤的实验操作，学生们将掌握如何设计和优化实验方案，并学会在实验过程中解决实际遇到的问题，从而提升他们的科研水平和解决实际问题的能力。这种训练有助于培养学生的逻辑思维、数据分析能力和批判性思维。实验还为学生之间提供了宝贵的合作机会，通过与同学和老师的互动，能够提高团队协作能力、沟通技巧和项目管理经验。这些综合能力的培养将为学生未来从事科研、工业或其他与化学相关的职业奠定坚实的基础，使学生能够更好地适应未来的挑战和机遇。

参 考 文 献

- [1] 孙孝斌, 苗志伟. 化学教育, **2021**, *42* (18), 137.
- [2] 黄静, 孙胜男, 张瑞龙, 梁雨爽, 苗志伟. 大学化学, **2023**, *38* (2), 192.
- [3] 罗一诚, 高延峰, 林维晟, 苗志伟. 大学化学, **2023**, *38* (10), 250.
- [4] 王佰全. 大学化学, **2019**, *34* (10), 18.
- [5] Lin, H. C.; Chiou, G.; Chooi, Y. H.; McMahon, T. C.; Xu, W.; Garg, N. K.; Tang, Y. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, *54*, 3004.
- [6] Li, H.; Gilchrist, C. L. M.; Phan, C. S.; Lacey, H. J.; Vuong, D.; Moggach, S. A.; Lacey, E.; Piggott, A. M.; Chooi, Y. H. *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 7145.
- [7] Dehbandi, B.; Hossaini, Z.; Mirjafari, Z.; Zardoost, M. R. *J. Heterocyclic. Chem.* **2020**, *57*, 4200.
- [8] Donslund, B. S.; Monlehn, A.; Palazzo, T. A.; Christensen, M. L.; Dahlgaard, A.; Erickson, J. D.; Jørgensen, K. A. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *57*, 1246.
- [9] Leth, L. A.; Glaus, F.; Meazza, M.; Fu, L.; Thøgersen, M. K.; Bitsch, E. A.; Jørgensen, K. A. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 15272.
- [10] Zhang, X. Y.; Gao, Y. F.; Miao, Z. W. *Adv. Synth. Catal.* **2023**, *365*, 381.