

MCM-41@FeCl₃催化吡啶与烯酰胺的 Friedel-Crafts烷基化反应：一种可回收的高区域选择性体系

晋海洋, 张永飞, 惠永海*

岭南师范学院化学化工学院, 清洁能源材料化学广东普通高校重点实验室, 广东 湛江

收稿日期: 2025年11月4日; 录用日期: 2025年11月26日; 发布日期: 2025年12月5日

摘要

基于有序介孔材料固有的限域效应与高比表面积特性, 其所固载的催化剂能够协同实现活性位点的高效利用与反应传质过程的显著强化。本研究采用MCM-41固载FeCl₃催化剂, 成功应用于吡啶与烯酰胺的Friedel-Crafts烷基化反应, 从而高效、高区域选择性地合成了一系列含双生物碱骨架的吡啶酰胺类化合物, 收率最高可达99%。此外, 该催化体系展现出优异的稳定性, 在连续五次循环使用后, 其催化活性未出现显著下降。

关键词

MCM-41, 固载催化剂, 吡啶, 烯酰胺, 傅克反应

MCM-41@FeCl₃ for the Friedel-Crafts Alkylation of Indoles with Enamides: A Recyclable System toward Highly Regioselective Products

Haiyang Jin, Yongfei Zhang, Yonghai Hui*

Key Laboratory of Clean Energy Materials Chemistry of Guangdong Higher Education Institute, College of Chemistry and Chemical Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

Received: November 4, 2025; accepted: November 26, 2025; published: December 5, 2025

*通讯作者。

文章引用: 晋海洋, 张永飞, 惠永海. MCM-41@FeCl₃ 催化吡啶与烯酰胺的 Friedel-Crafts 烷基化反应: 一种可回收的高区域选择性体系[J]. 有机化学研究, 2025, 13(4): 372-379. DOI: 10.12677/jocr.2025.134036

Abstract

Leveraging the inherent confinement effect and high specific surface area of ordered mesoporous materials, the supported catalysts enable the synergistic enhancement of active site utilization and reaction mass transfer. In this study, an MCM-41-supported FeCl_3 catalyst was successfully applied to the Friedel-Crafts alkylation of indoles with enamides. This strategy afforded a series of indole-amide compounds incorporating bis-alkaloid scaffolds with high efficiency and remarkable regioselectivity, achieving yields of up to 99%. Furthermore, the catalytic system demonstrated excellent stability, maintaining its activity without significant loss over five consecutive reaction cycles.

Keywords

MCM-41, Immobilized Solid Catalyst, Indole, Enamide, Friedel-Crafts Reaction

Copyright © 2025 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

吲哚与 γ -丁内酰胺是两类重要的含氮杂环骨架, 广泛存在于众多具有显著生物活性的天然产物与药物分子中[1]-[4]。将这两个优势药效团融合于同一分子中, 可构建出具有多种生物活性的新型化合物, 其在注意缺陷多动障碍(ADHD)、心律失常及哮喘综合征等疾病的治疗中展现出潜力[5]。因此, 发展高效、绿色的方法合成此类结构在药物化学领域具有重要意义。

吲哚与烯酰胺的傅克烷基化反应是构建此类结构的有效策略之一。传统的吲哚傅克烷基化反应多采用缺电子烯烃作为烷基化试剂, 而对于富电子的烯酰胺, 其作为烷基化试剂的应用则因反应活性较低而面临挑战[6]。近年来, 研究者们相继开发了多种催化体系以实现这一转化, 包括路易斯酸[6]-[8]、布朗斯特酸[9]-[13]和碘[14]等催化剂。尽管这些方法取得了较好的催化效果, 但仍存在一些局限, 例如均相金属催化剂可能导致产物金属残留、在后处理过程中需要大量有机溶剂进行萃取, 以及大多数催化剂难以回收再利用等。因此, 开发一种兼具高活性、高选择性、环境友好且催化剂可循环使用的新型催化体系, 仍是当前研究的重要目标。

多相催化, 特别是基于有序介孔分子筛(如 MCM-41)的负载型催化剂, 能够巧妙地将均相催化剂的高活性与多相催化剂易于分离回收的优点相结合, 是实现绿色与可持续合成的理想途径之一。本课题组前期对有序介孔分子筛催化 Knoevenagel condensation [15]、[3 + 3] cycloaddition [16]和多组分反应[17] [18]等进行了研究, 并取得了较好的成果。在此基础上, 本研究设计并制备了 MCM-41 负载铁催化剂, 用于高效、高选择性地实现吲哚与烯酰胺的傅克烷基化反应。该催化体系同时兼顾了优异的区域选择性与良好的循环稳定性, 为高附加值吲哚酰胺类衍生物的合成提供了一条极具应用潜力的新路径。

2. 实验部分

2.1. 试剂与仪器

吲哚和 1-乙烯基吡咯烷-2-酮及其衍生物和乙腈等试剂均购于 Adamas-Beta 试剂公司, 用前未经处理。

GF254 nm 薄层层析板和柱层析用硅胶(200~300 目)购于青岛海洋化工厂。

反应过程通过薄层色谱(TLC)进行监测。使用 INOVA-400 型核磁共振谱仪,通过氢核磁共振(^1H NMR)与碳核磁共振(^{13}C NMR)谱图表征产物结构。核磁测试溶剂为 CDCl_3 。 ^1H NMR 化学位移参考 TMS (δ 0.00) 或者 CDCl_3 (δ 7.26), ^{13}C NMR 化学位移参考 CDCl_3 (δ 77.16), 化学位移单位为 ppm。

2.2. MCM-41@ FeCl_3 催化剂的制备

以实验室自制的 MCM-41@席夫碱为载体,通过浸渍法负载 FeCl_3 , 制得 MCM-41@ FeCl_3 催化剂, 制备流程如图 1 所示。典型的制备过程如下:将 0.5 g MCM-41@席夫碱载体加入至含有 1 mmol $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的 40 mL 乙醇溶液中,随后在氮气保护下回流 6 小时。待反应液冷却至室温后过滤,所得固体用无水乙醇洗涤至滤液呈无色,以除去未配位的金属离子,经干燥后得到目标催化剂 MCM-41@ FeCl_3 。

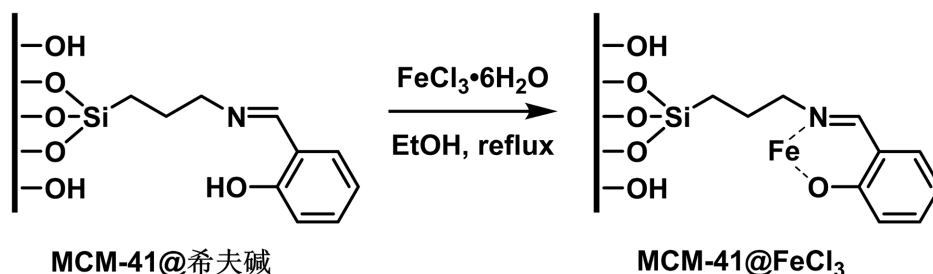


Figure 1. Preparation of the MCM-41@ FeCl_3 catalyst

图 1. MCM-41@ FeCl_3 催化剂的制备流程

2.3. MCM-41@ FeCl_3 催化吲哚衍生物与烯酰胺的傅克反应

以标准反应为例:依次将 MCM-41@ FeCl_3 催化剂(10 mg)、吲哚(0.2 mmol)、1-乙烯基吡咯烷-2-酮(0.2 mmol)和乙腈(0.5 mL)加入到反应试管中。反应混合物于室温下搅拌 2.5 小时,并通过薄层色谱(TLC)监测反应进程。待反应完成后,以石油醚/乙酸乙酯为流动相,通过硅胶柱层析对混合物进行纯化,得到目标产物。其化学结构经核磁共振氢谱(^1H NMR)确证。

1-(1-(1H-吲哚-3-基)乙基)吡咯烷-2-酮 (3a) [6]。白色固体, m.p. 164~165°C. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 8.89 (s, 1H), 7.62 (d, J = 8.0 Hz, 1H), 7.37 (d, J = 8.0 Hz, 1H), 7.16~7.20 (m, 1H), 7.12 (s, 1H), 7.05~7.09 (m, 1H), 5.79 (q, J = 6.8 Hz, 1H), 3.22~3.28 (m, 1H), 2.83~2.89 (m, 1H), 2.38~2.51 (m, 2H), 1.73~1.91 (m, 2H), 1.58 (d, J = 6.8 Hz, 3H).

1-(1-(5-氯-1H-吲哚-3-基)乙基)吡咯烷-2-酮 (3b) [10]。白色固体, m.p. 174°C. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 9.07 (s, 1H), 7.57 (d, J = 4.0 Hz, 1H), 7.30 (d, J = 8.0 Hz, 1H), 7.17 (s, 1H), 7.13 (d, J = 8.0 Hz, 1H), 5.71 (q, J = 6.8 Hz, 1H), 3.24~3.30 (m, 1H), 2.83~2.88 (m, 1H), 2.46 (t, J = 8.0 Hz, 2H), 1.78~1.96 (m, 2H), 1.57 (d, J = 6.8 Hz, 3H).

1-(1-(5-溴-1H-吲哚-3-基)乙基)吡咯烷-2-酮 (3c) [6]。白色固体, m.p. 167°C. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 8.90 (s, 1H), 7.72 (s, 1H), 7.27 (s, 2H), 7.15 (s, 1H), 5.70 (q, J = 6.8 Hz, 1H), 3.24~3.30 (m, 1H), 2.83~2.89 (m, 1H), 2.46 (t, J = 8.0 Hz, 2H), 1.79~1.96 (m, 2H), 1.57 (d, J = 6.8 Hz, 3H).

1-(1-(5-甲氧基-1H-吲哚-3-基)乙基)吡咯烷-2-酮 (3d) [12]。黄色油状物. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 8.15 (s, 1H), 7.25 (d, J = 8.0 Hz, 1H), 7.11 (d, J = 4.0 Hz, 2H), 6.86 (dd, J_1 = 8.8 Hz, J_2 = 2.4 Hz, 1H), 5.75 (q, J = 7.2 Hz, 1H), 3.82 (s, 3H), 3.24~3.30 (m, 1H), 2.84~2.90 (m, 1H), 2.37~2.51 (m, 2H), 1.78~1.94 (m, 2H), 1.59 (d, J = 6.8 Hz, 3H).

1-(1-(5-甲基-1H-吡咯-3-基)乙基)吡咯烷-2-酮 (3e) [6]。黄色油状物。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 8.78 (s, 1H), 7.29 (s, 1H), 7.18 (d, $J = 8.8$ Hz, 1H), 6.99 (s, 1H), 6.92 (dd, $J_1 = 8.4$ Hz, $J_2 = 1.2$ Hz, 1H), 5.67 (q, $J = 6.8$ Hz, 1H), 3.13~3.19 (m, 1H), 2.75~2.81 (m, 1H), 2.38~2.34 (m, 2H), 2.32 (s, 3H), 1.63~1.86 (m, 2H), 1.48 (d, $J = 6.8$ Hz, 3H)。

1-(1-(4-甲基-1H-吡咯-3-基)乙基)吡咯烷-2-酮 (3f) [12]。黄色固体, m.p. 180~181°C。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 8.84 (s, 1H), 7.22 (d, $J = 8.4$ Hz, 1H), 7.18 (d, $J = 4.0$ Hz, 1H), 7.07 (t, $J = 8.0$ Hz, 1H), 6.85 (d, $J = 6.8$ Hz, 1H), 5.87 (q, $J = 8.0$ Hz, 1H), 3.18~3.24 (m, 1H), 2.85~2.90 (m, 1H), 2.60 (s, 3H), 2.43 (t, $J = 8.0$ Hz, 2H), 1.77~1.92 (m, 2H), 1.59 (d, $J = 6.8$ Hz, 3H)。

1-(1-(6-甲基-1H-吡咯-3-基)乙基)吡咯烷-2-酮 (3g) [12]。黄色油状物。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 8.87 (s, 1H), 7.49 (d, $J = 8.0$ Hz, 1H), 7.15 (s, 1H), 7.03 (s, 1H), 6.91 (dd, $J_1 = 8.0$ Hz, $J_2 = 1.2$ Hz, 1H), 5.76 (q, $J = 6.8$ Hz, 1H), 3.21~3.27 (m, 1H), 2.82~2.88 (m, 1H), 2.42~2.46 (m, 5H), 1.70~1.93 (m, 2H), 1.56 (d, $J = 6.8$ Hz, 3H)。

1-(1-(7-甲基-1H-吡咯-3-基)乙基)吡咯烷-2-酮 (3h) [12]。白色固体, m.p. 182°C。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 8.84 (s, 1H), 7.45~7.47 (m, 1H), 7.12 (s, 1H), 6.99~7.02 (m, 2H), 5.77 (q, $J = 6.8$ Hz, 1H), 3.21~3.27 (m, 1H), 2.82~2.88 (m, 1H), 2.50 (s, 3H), 2.41~2.46 (m, 2H), 1.70~1.94 (m, 2H), 1.57 (d, $J = 7.2$ Hz, 3H)。

1-(1-(1-甲基-吡咯-3-基)乙基)吡咯烷-2-酮 (3i) [6]。黄色油状物。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 7.60 (d, $J = 8.0$ Hz, 1H), 7.28 (d, $J = 8.4$ Hz, 1H), 7.21~7.24 (m, 1H), 7.07~7.11 (m, 1H), 6.79 (s, 1H), 5.76 (q, $J = 6.8$ Hz, 1H), 3.76 (s, 3H), 3.23~3.29 (m, 1H), 2.85~2.91 (m, 1H), 2.36~2.49 (m, 2H), 1.72~1.95 (m, 2H), 1.58 (d, $J = 7.2$ Hz, 3H)。

1-(1-(1H-吡咯-3-基)乙基)氮杂环庚烷-2-酮 (3j) [6]。黄色油状物。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 8.46 (s, 1H), 7.60 (d, $J = 8.0$ Hz, 1H), 7.36 (d, $J = 8.0$ Hz, 1H), 7.19 (t, $J = 7.6$ Hz, 1H), 7.13 (s, 1H), 7.08 (t, $J = 7.2$ Hz, 1H), 6.30 (q, $J = 6.8$ Hz, 1H), 3.01~3.17 (m, 2H), 2.61 (t, $J = 6.0$ Hz, 2H), 1.90~1.96 (m, 1H), 1.58~1.70 (m, 4H), 1.51 (d, $J = 7.2$ Hz, 4H)。

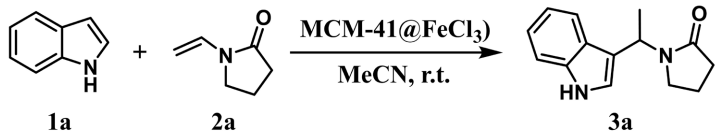
N-[1-(1H-吡咯-3-基)乙基]乙酰胺 (3k) [8]。黄色油状物。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3 , TMS) δ 8.49 (s, 1H), 7.64 (d, $J = 8.0$ Hz, 1H), 7.37 (d, $J = 7.6$ Hz, 1H), 7.23 (t, $J = 7.2$ Hz, 1H), 7.12 (t, $J = 7.2$ Hz, 2H), 5.80 (s, 1H), 5.46 (m, 1H), 1.96 (s, 3H), 1.62 (d, $J = 6.4$ Hz, 3H)。

3. 结果与讨论

3.1. 反应条件筛选与优化

本研究选择吡咯(0.2 mmol)和 1-乙基吡咯烷-2-酮(0.2 mmol)作为模型底物, 为获得目标傅克反应的最佳转化效率, 我们系统性地筛选并评估了催化剂种类、溶剂效应和催化剂用量等多个关键参数。反应结果总结于表 1。首先, 我们在乙腈溶剂中对比研究了 MCM-41 负载不同路易斯酸的催化性能(entry 1-3)。结果显示, MCM-41@ CrCl_3 和 CM-41@ ZnCl_2 在该反应中几乎无活性, 而 MCM-41@ FeCl_3 则表现出优异的催化性能, 产率高达 99%, 表明 Fe(III)是该反应的高效活性中心。为考察溶剂效应对反应的影响, 我们固定使用 10 mg MCM-41@ FeCl_3 催化剂, 在 2.5 小时反应时间内测试了不同溶剂(entry 1, 4, 5)。结果表明, 溶剂乙腈表现最佳, 产率达 99%。我们进一步优化了催化剂用量(entry 1, 6, 7)。然而, 当催化剂用量从 10 mg 降低至 5 mg 时(entry 6), 产率下降至 85%。有趣的是, 当催化剂用量进一步增加至 15 mg 时(entry 7), 即使反应时间缩短至 2.0 小时, 产率仍能达到 99%。综合考量催化效率与经济性, 使用 10 mg 催化剂反应 2.5 小时被确定为最优条件, 其在保证高产率的同时避免了催化剂的过度使用。

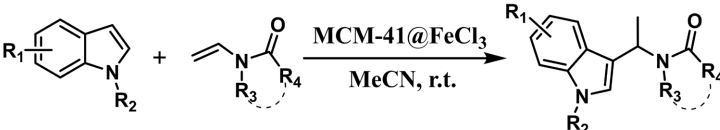
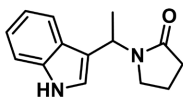
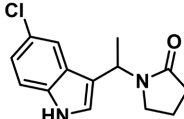
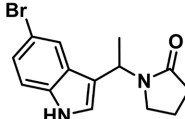
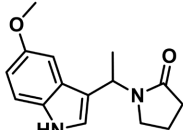
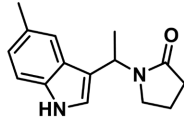
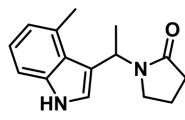
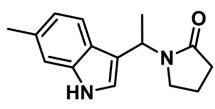
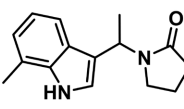
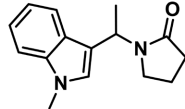
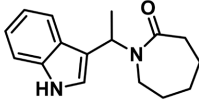
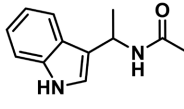
Table 1. Optimization of reaction conditions^a**表 1.** 反应条件优化^a

				
Entry	Catalyst	Solvent	Time (h)	Yield (%) ^b
1	MCM-41@FeCl ₃ (10 mg)	MeCN	2.5	99
2	MCM-41@CrCl ₃ (10 mg)	MeCN	2.5	trace
3	MCM-41@ZnCl ₂ (10 mg)	MeCN	2.5	0
4	MCM-41@FeCl ₃ (10 mg)	EtOH	2.5	15
5	MCM-41@FeCl ₃ (10 mg)	toluene	2.5	40
6	MCM-41@FeCl ₃ (5 mg)	MeCN	2.5	85
7	MCM-41@FeCl ₃ (15 mg)	MeCN	2.0	99

注: ^a0.2 mmol 吲哚, 0.2 mmol 1-乙烯基吡咯烷-2-酮, 1.0 mL 溶剂, 室温。 ^b柱层析产率。 ^c反应 6 h。

3.2. 底物拓展

Table 2. Substrate scope^a**表 2.** 底物拓展^a

				
 3a (99%)	 3b (99%)	 3c (98%)		
 3d (99%)	 3e (99%)	 3f (87%)		
 3g (99%)	 3h (99%)	 3i (89%)		
 3j (90%)	 3k (98%)			

注: ^a0.2 mmol 吲哚, 0.2 mmol 1-乙烯基吡咯烷-2-酮, 1.0 mL 溶剂, 室温, 反应 2.5 h, 柱层析产率。

在确定最优反应条件后,我们随后研究了吲哚衍生物与烯酰胺的傅克反应(表 2)。在吲哚衍生物与 1-乙烯基吡咯烷-2-酮的傅克反应中,带有弱吸电子基团(Cl、Br)的吲哚能良好兼容反应,能够分别以 99% 和 98% 的优异收率得到目标产物(3b 和 3c);当吲哚结构单元中含供电子基团(如甲氧基、甲基)时,能以良好收率获得目标产物 3d~3i。此外,甲基在吲哚苯环上的取代位点对反应活性存在轻微影响:4-甲基与 N-甲基取代的吲哚获得中等偏好的收率,这可能源于电子效应与空间效应的共同作用(3f, 3i)。当使用 1-乙烯基氮杂环庚烷-2-酮和 N-乙烯基乙酰胺替代 1-乙烯基吡咯烷-2-酮时,分别获得 90% 与 98% 的收率(3j, 3k)。

3.3. 催化循环实验

通过吲哚与 1-乙烯基吡咯烷-2-酮的标准反应对 MCM-41@FeCl₃ 的可循环使用性能进行了评估。反应完成后,通过离心分离回收催化剂,并经二氯甲烷洗涤以及 60℃ 干燥 12 小时后,在标准条件下投入下一轮反应。该催化剂循环使用 5 次后依然保持优异的催化活性(图 2)。

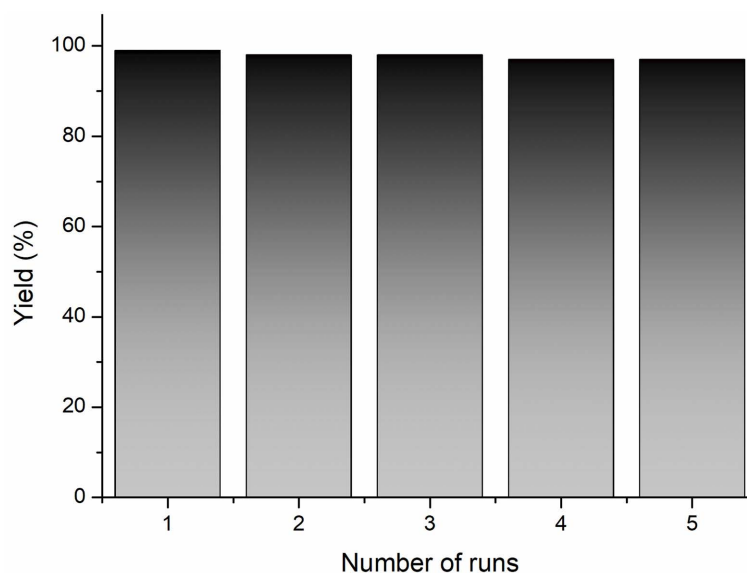


Figure 2. Recycling of the catalyst

图 2. 催化循环实验

3.4. 反应机理推测

根据吲哚与烯酰胺类化合物的反应[7]和固载氯化铁催化有机反应机制[19],我们推测出如下所示的反应机理(图 3)。在路易斯酸 Fe(III)的作用下,1-乙烯基吡咯烷-2-酮(1a)转化为亚胺离子中间体(I),该中间体通过傅克烷基化反应机制与吲哚反应,得到最终产物 3a。

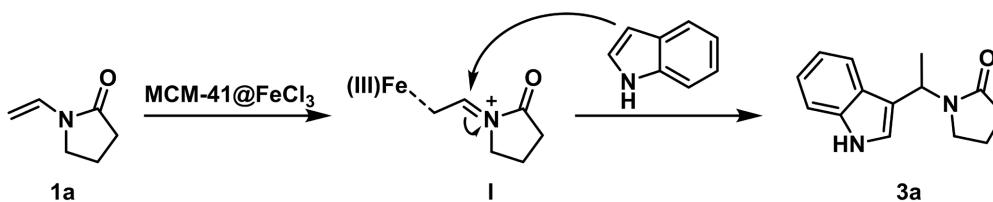


Figure 3. Plausible mechanism

图 3. 反应机理推测

3.5. 与已报道催化体系的性能对比分析

为评估本工作中的 MCM-41@FeCl₃ 在吡啶与烯酰胺类化合物的傅克烷基化反应中的综合性能, 我们将其与文献中报道的几种代表性催化体系进行了系统对比(表 3)。本研究中的 MCM-41@FeCl₃ 具有优异的催化活性, 而且可以回收再利用。

Table 3. Comparison of catalytic performance

表 3. 催化性能对比

Entry	Catalyst	Reaction conditions	Yield (%) ^b	Ref.
1	PWA	H ₂ O, r.t., 4 h	76~98	13
2	Fe(NO ₃) ₃ + TBAI	H ₂ O, r.t., 7 h	31~89	6
3	FeCl ₃	CH ₂ Cl ₂ , 40°C, 0.5 h	78~99	7
4	TBPA ⁺ ·SbCl ₆ ⁻	CHCl ₃ , r.t., 0.5 h	61~85	8
5	MCM-41@FeCl ₃	MeCN, r.t., 2.5 h	87~99	This work

4. 结论

本文以吡啶和烯酰胺类化合物为起始物料, 在有序介孔分子筛 MCM-41 负载氯化铁催化剂(MCM-41@FeCl₃)催化下, 快速简便高效的合成了一系列吡啶酰胺类化合物。在该反应中, 我们利用 MCM-41@FeCl₃ 做催化剂, 操作简便, 反应条件温和, 催化剂性能稳定且可回收再利用。

致 谢

岭南师范学院项目(No. QL2401, ZL1908)。

参考文献

- [1] Silva Moratório de Moraes, R., Mestre Botelho, A.B., Tavares de Almeida Pinto, G., Couto Rodrigues, S., Miranda Martins, M.T., Alves Soares, D.L., *et al.* (2025) Chemistry, Applications, and Synthesis Methods of Indole Derivatives: A Comprehensive Review. *The Chemical Record*. <https://doi.org/10.1002/tcr.202500121>
- [2] Zeng, W., Han, C., Mohammed, S., Li, S., Song, Y., Sun, F., *et al.* (2024) Indole-Containing Pharmaceuticals: Targets, Pharmacological Activities, and SAR Studies. *RSC Medicinal Chemistry*, **15**, 788-808. <https://doi.org/10.1039/d3md00677h>
- [3] Li, W., Xu, Q., Miao, Q. and Xiao, B. (2024) Dual Photoredox/Nickel Catalysis Enables Diastereoselective Synthesis of Multisubstituted γ -Lactams Using Alkyl-GeMe₃ as Radical Precursors. *The Journal of Organic Chemistry*, **89**, 16269-16281. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.3c02348>
- [4] Teng, H., Huang, H. and Wang, C. (2012) Catalytic Asymmetric Construction of Spiro(γ -Butyrolactam- γ -Butyrolactone) Moieties through Sequential Reactions of Cyclic Imino Esters with Morita-Baylis-Hillman Bromides. *Chemistry—A European Journal*, **18**, 12614-12618. <https://doi.org/10.1002/chem.201201475>
- [5] Kenda, B., Quesnel, Y., Ates, A., Michel, P., Turet, L. and Mercier, J. (2006) 2-Oxo-1-Pyrrolidine Derivatives, Processes for Preparing Them and Their Therapeutic Use on the Central Nervous System. WO2006128693A1. 2006-07-12.
- [6] Jiang, R., Wu, X., Zhu, X., Xu, X. and Ji, S. (2010) Ferric(III) Nitrate: An Efficient Catalyst for the Regioselective Friedel-Crafts Reactions of Indoles and Tert-Enamides in Water. *European Journal of Organic Chemistry*, **31**, 5946-5950. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201000994>
- [7] Niu, T., Huang, L., Wu, T. and Zhang, Y. (2011) FeCl₃-Promoted Alkylation of Indoles by Enamides. *Organic & Biomolecular Chemistry*, **9**, 273-277. <https://doi.org/10.1039/c0ob00709a>
- [8] Huo, C., Kang, L., Xu, X., Jia, X., Wang, X., Xie, H., *et al.* (2014) Triarylammonium Salt Facilitated Friedel-Crafts Reaction of Indoles with Enamides and Vinyl Ethers. *Tetrahedron Letters*, **55**, 954-958. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2013.12.055>
- [9] Jia, Y., Zhong, J., Zhu, S., Zhang, C. and Zhou, Q. (2007) Chiral Brønsted Acid Catalyzed Enantioselective Friedel-

- Crafts Reaction of Indoles and A-aryl Enamides: Construction of Quaternary Carbon Atoms. *Angewandte Chemie International Edition*, **46**, 5565-5567. <https://doi.org/10.1002/anie.200701067>
- [10] Xu, X., Ji, S., Zhang, Y., Jiang, J., Chu, X., Jiang, R., *et al.* (2012) Friedel-Crafts Alkylation of Indoles by Tert-Enamides in Acetic Acid. *Synlett*, **23**, 751-754. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1290605>
- [11] Xu, H., Zi, Y., Xu, X., Wang, S. and Ji, S. (2013) TFA-Catalyzed C-N Bond Activation of Enamides with Indoles: Efficient Synthesis of 3,3-Bisindolylpropanoates and Other Bisindolylalkanes. *Tetrahedron*, **69**, 1600-1605. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2012.11.098>
- [12] Chu, X., Wang, S. and Ji, S. (2013) Recyclable NaHSO₄ Catalyzed Alkylation of Tert-Enamides with Indoles or Amines in Water: Facile Construction of Pharmaceutically Analogous Bis-Alkaloid Scaffolds. *RSC Advances*, **3**, 8380-8387. <https://doi.org/10.1039/c3ra40833g>
- [13] 李建鹏, 张世奇, 高天明, 张永飞, 王赞, 夏加亮, 韩冰, 惠永海. 磷钼酸室温催化吲哚与 1-乙烯基吡咯烷-2-酮的傅克反应研究[J]. *有机化学研究*, 2019, 7(4): 103-108.
- [14] Jiang, R., Xu, H., Xu, X., Chu, X. and Ji, S. (2011) Direct Alkylation of Indoles and Amines by Tert-Enamides: Facile Access to Pharmaceutically Active 2-Oxo-1-Pyrrolidine Analogues. *Organic & Biomolecular Chemistry*, **9**, 5659-5669. <https://doi.org/10.1039/c1ob05546a>
- [15] Hui, Y., Xia, J., Li, J., Wang, Y. and Zhang, Y. (2022) Ionic Liquid-Functional MCM-41 as a High Effective Catalyst for the Synthesis of Isatyridene Malononitrile via Knoevenagel Condensation. *Journal of Saudi Chemical Society*, **26**, Article ID: 101399. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101399>
- [16] Hui, Y., Li, J., Yu, B., Xing, X., Gao, T., Qian, X., *et al.* (2022) Amine-Functionalized MCM-41 as an Efficient Catalyst for the Synthesis of Sulfur/Dinitrogen-Fused Heterocycles via [3 + 3] Cycloaddition in Water. *New Journal of Chemistry*, **46**, 6804-6810. <https://doi.org/10.1039/d1nj06124k>
- [17] Hui, Y., Zhang, Y., Li, J., Yu, B., Han, B., Wang, Y., *et al.* (2021) One-Pot Synthesis of Spiro[Indoline-3,2'-Pyrrolidin]-Ones Catalyzed by Mesoporous Molecular Sieve MCM-41. *Tetrahedron*, **93**, Article ID: 132283. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2021.132283>
- [18] Hui, Y., Zhang, Y., Luo, Y., Li, J., Wang, Y., Gao, T., *et al.* (2020) Facile Synthesis of Spiro Thiazolidinone via Cyclic Ketones, Amines and Thioglycolic Acid by MCM-41-Schiff Base-CuSO₄·5H₂O. *Research on Chemical Intermediates*, **47**, 521-532. <https://doi.org/10.1007/s11164-020-04283-9>
- [19] 刘雪松, 于顺明. 固载化 FeCl₃ 催化合成螺环苯并吡喃[2, 3-b]吲哚类衍生物[J]. *有机化学研究*, 2020, 8(2): 15-23.