

铜/Selectfluor 共催化的苄基碳氢键 Ritter 胺基化反应

钱纯节^{†,a,b} 何博洋^{†,b} 刘兴宇^b 王 平^a
高广春^{*,b} 刘石惠^{*,b}
(^a 浙江工业大学药学院 杭州 310014)
(^b 嘉兴大学医学院 浙江嘉兴 314001)

摘要 报道了一种铜/Selectfluor 共催化的苄基碳氢键 Ritter 胺基化方法。该方法底物范围广泛,同时还具有高的区域选择性和化学选择性,避免使用强氧化剂和复杂的反应体系,在简单温和的反应条件下即可实现各种底物的苄基碳氢键胺基化。

关键词 碳氢活化; 铜催化; Ritter 胺基化

Copper/Selectfluor Co-catalyzed Ritter-Type Benzylic C—H Amination

Qian, Chunjie^{†,a,b} He, Boyang^{†,b} Liu, Xingyu^b Wang, Ping^a
Gao, Guangchun^{*,b} Liu, Shihui^{*,b}
(^a College of Pharmaceutical Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)
(^b College of Medicine, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001)

Abstract A copper/Selectfluor co-catalyzed Ritter-type benzylic C—H amination has been developed. The method has a wide substrate scope, and it also possesses high regioselectivity and chemoselectivity. It avoids the use of strong oxidants and complex reaction systems, enabling the amination of benzylic C—H bonds in various substrates under simple and mild reaction conditions.

Keywords C—H activation; copper catalysis; Ritter-type amination

苄基碳氢键在生物活性分子中很常见,在 200 种最畅销的药物中,约有 25% 含有这种基本结构^[1]。通常,小分子药物中的苄基位置是容易被细胞色素 P450 氧化酶代谢的位点^[2],这些碳氢键的选择性官能团化可能会改变其代谢稳定性,并调节生物活性^[3]。胺基在药物设计中具有重要的作用,可以通过胺基的引入来优化药物分子的生物活性、溶解性、稳定性和药代动力学特性,从而提高药物的疗效和安全性^[4]。如果有一种通用的苄基碳氢键胺基化策略可用,则可以加快在各种结构多样性化合物中的药物发现。

Ritter 型胺基化反应是实现碳氢键胺化的有效策略

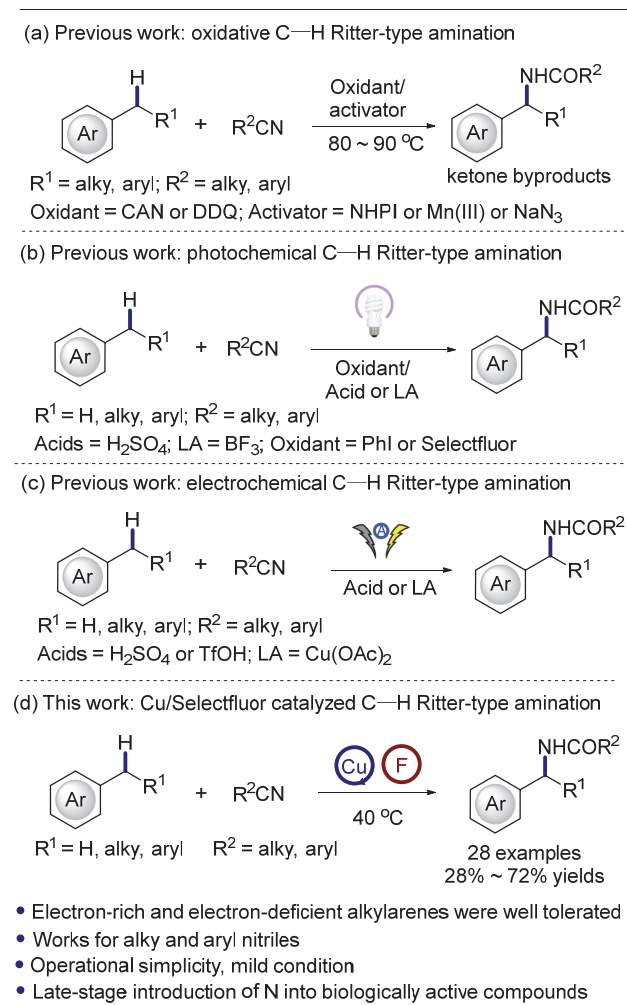
之一^[5]。Ishii 课题组^[6]报道的使用 *N*-羟基邻苯二甲酰亚胺(NHPI)作为添加剂和硝酸铈铵(CAN)作为氧化剂的 Ritter 型胺化以形成酰胺;周永波课题组^[7]发展的 Mn(OAc)₃/DDQ (DDQ=2,3-二氯-5,6-二氰对苯醌)的反应条件可以将此类反应的底物范围扩展至二苯乙烷类化合物(Scheme 1a)。然而,苛刻的反应条件限制了反应底物的适用范围;此外,该方法伴随较多过度氧化的酮类副产物^[6-8],进一步制约了其实际应用。近期, König 课题组^[9]开发了一种可见光催化的碳氢键 Ritter 型胺基化方法,该方法通过可见光激发三价碘-三氟化硼(I^{III}-BF₃)络合物,使得苄基 C—H 键形成碳正离子,进而

* Corresponding authors. E-mail: gaogcjx@163.com; liushihui12310@foxmail.com

Received September 10, 2024; revised December 2, 2024; published online January 3, 2025.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 22001096), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LQ21B020008), the Project of Jiaxing Science and Technology Plan-Special Project for Young Scientific and Technological Talents (No. 2023AY40031), the Qin Shen Scholar Program of Jiaxing University (No. CD70623026) and the Jiaxing University "Hundred Youth" Training Talents (No. CD70621018).
国家自然科学基金(No. 22001096)、浙江省自然科学基金(No. LQ21B020008)、嘉兴市科技计划专项(No. 2023AY40031)、嘉兴大学勤慎青年学者(No. CD70623026)和嘉兴大学“百青”培养人才(No. CD70621018)资助项目。

[†] 共同第一作者(The authors contributed equally to this work).



图式 1 苄基碳氢键 Ritter 型胺基化方法
Scheme 1 Ritter-type benzylic C—H amination

发生 Ritter 型反应; 在此基础上, 龚磊课题组^[10]使用更为简单的可见光/Selectfluor 催化体系, 在硫酸作为共催化剂的条件下, 也可以实现 Ritter 型反应(Scheme 1b); 近期, Doyle 课题组^[11]通过使用高氧化态光催化剂和新型氢原子转移试剂也能实现苄基 C—H 键的 Ritter 型反应。此外, 电化学方法在实现 C—H 键 Ritter 型反应中取得不小成效。Lambert 课题组^[12]在三氨基环丙烯离子(TAC)作为催化剂的条件下, 通过电子光催化 Ritter 型反应开发了苄基 C—H 键胺化反应, 以产生酰胺; 随后叶金星^[13]、孙培培^[14]和周向葛^[15]等课题组开发的电催化方法将反应条件进一步简化, 在电催化条件下仅通过额外加入质子酸(硫酸、三氟甲磺酸)或路易斯酸(醋酸酐)即可催化反应(Scheme 1c)。但是, 以上方法对于反应装置(光反应器、电化学反应装置等)都有一定的要求, 特别是对于大规模生产而言, 会引起一系列的应用难题, 无法满足广泛应用的条件下。为了克服以上限制, 以扩大这些方法的实用性, 刘国生、余金权等课题组^[16-17]开发

了一系列铜催化的自由基反应方法, 用 *N*-氟苯磺酰亚胺或 Selectfluor 作为氧化剂进行选择性 C—H 键官能团化, 该策略具有高的位点选择性, 反应条件简便易操作, 可以实现多种官能团化。然而, 这一策略多用于自由基接力的偶联反应, 对于需要碳正离子参与的 Ritter 型反应尚未涉及。

在此, 我们报道了一种铜/Selectfluor 共催化的苄基碳氢键 Ritter 胺基化方法, 该方法将 Selectfluor 介导的氢原子转移过程与铜(II)催化的自由基-极性交叉过程相结合, 产生的碳正离子再与腈类发生 Ritter 型反应得到酰胺产物, 表现出广泛的底物范围的同时还具有极高的区域选择性和化学选择性, 避免使用强氧化剂和复杂的反应体系, 在简单温和的反应条件下即可实现各种底物的苄基碳氢键胺基化(Scheme 1d)。

1 结果与讨论

首先研究了 1-乙基萘(1a)与溶剂乙腈(2a)的胺基化反应(表 1)。在前期对苄基 C—H 键酯化反应的研究中^[17], 意外发现 [Ir{dF(CF₃)ppy}₂(dtbbpy)]PF₆ (0.5 mol%), Cu(OAc)₂ (10 mol%), 2,9-二甲基-1,10-菲啰啉(10 mol%)以及 Selectfluor (2 equiv.)在 12 W Blue Leds, 40 °C 的条件下, 可以以 23% 的收率得到胺基化产物 3a (Entry 1), 于是选择此条件对胺基化反应进行初步探索。控制实验发现, 光催化剂(Entry 2)、光源(Entry 3)以及配体(Entries 4~7)对反应影响较小, 于是依次对金属催化剂、氧化剂和溶剂等影响因素进行了一系列考查。研究结果表明, 金属催化剂和氧化剂的种类对反应的影响较为显著: CuCl₂ 表现出最佳的催化活性(Entries 8~14), 并且在 30 mol% 的用量下催化效果最佳(Entry 16)。与 *N*-氟代双苯磺酰胺(NFSI)和过硫酸铵(APS)相比, Selectfluor 的反应效果更佳(Entries 17, 18 vs Entry 16), 且 Selectfluor 的用量对反应的影响较大(Entries 19, 20 vs Entry 16)。控制实验进一步证明金属催化剂和氧化剂在反应过程中起着重要作用(Entries 22, 23)。此外, 反应浓度对反应结果也有一定影响(Entry 19)。最终确定了最优反应条件(Entry 21): CuCl₂ (30 mol%)、Selectfluor (2.0 equiv.)、N₂ 保护条件下 40 °C 反应 24 h, 以 63% 的分离收率得到了目标产物 3a。

在最优反应条件基础上, 以溶剂乙腈作为氮源, 对苄基碳氢键底物的适用性进行了研究(表 2, a)。各种苄基碳氢键底物, 包括未经取代的 1-乙基萘(1a)、2-乙基萘(1b)和乙基苯(1c)都能顺利得到预期的乙酰胺基化产物。另外, 反应对于对位含有不同取代基的底物 1d~1i 也能很好地兼容, 供电子基团(1d)及吸电子基团(1e~1f)的底物均能良好适用。酯(1g)、酰胺(1h)和酰亚胺(1i)

表 1 反应条件的优化^a

Table 1 Optimization of reaction conditions

Entry	Photocatalyst	Oxidant	Metal	Ligand	Yield ^b /%
1	[Ir{dF(CF ₃)ppy} ₂ (dtbbpy)]PF ₆	Selectfluor	Cu(OAc) ₂	2,9-Me ₂ -1,10-phen	23
2	—	Selectfluor	Cu(OAc) ₂	2,9-Me ₂ -1,10-phen	22
3 ^c	[Ir{dF(CF ₃)ppy} ₂ (dtbbpy)]PF ₆	Selectfluor	Cu(OAc) ₂	2,9-Me ₂ -1,10-phen	24
4	[Ir{dF(CF ₃)ppy} ₂ (dtbbpy)]PF ₆	Selectfluor	Cu(OAc) ₂	—	23
5 ^c	—	Selectfluor	Cu(OAc) ₂	bpy	20
6 ^{c,d}	—	Selectfluor	Cu(OAc) ₂	PPBO	16
7 ^c	—	Selectfluor	Cu(OAc) ₂	—	23
8 ^c	—	Selectfluor	CuCl ₂	—	43
9 ^c	—	Selectfluor	CuBr ₂	—	29
10 ^c	—	Selectfluor	Cu(CF ₃ COO) ₂ •H ₂ O	—	31
11 ^c	—	Selectfluor	Cu(OTf) ₂	—	27
12 ^c	—	Selectfluor	CuCl	—	37
13 ^c	—	Selectfluor	CuBr	—	39
14 ^c	—	Selectfluor	FeCl ₃	—	n.d. ^e
15 ^{c,f}	—	Selectfluor	CuCl ₂	—	44
16 ^{c,g}	—	Selectfluor	CuCl ₂	—	53
17 ^{c,g}	—	NFSI	CuCl ₂	—	44
18 ^{c,g}	—	APS	CuCl ₂	—	n.d. ^e
19 ^{c,h}	—	Selectfluor	CuCl ₂	—	35
20 ^{c,i}	—	Selectfluor	CuCl ₂	—	Trace
21 ^{c,j}	—	Selectfluor	CuCl ₂	—	63
22 ^{c,j}	—	—	CuCl ₂	—	n.d. ^e
23 ^{c,j}	—	Selectfluor	—	—	n.d. ^e

^a Reaction conditions: 12 W Blue Leds, **1a** (0.5 mmol), [Ir{dF(CF₃)ppy}₂(dtbbpy)]PF₆ (0.5 mol%), Cu(OAc)₂ (10 mol%), 2,9-Me₂-1,10-phen (10 mol%), Selectfluor (1.0 mmol), CH₃CN (2.5 mL); the reaction mixture was degassed via freeze pump thaw (×3 times) and refilled with N₂, 40 °C, 24 h, unless otherwise noted. ^b Isolated yields. ^c In darkness. ^d PPBO: N¹-(1,1'-biphenyl)-2-yl)-N²-benzyloxalamide. ^e Not detected. ^f CuCl₂ (20 mol%). ^g CuCl₂ (30 mol%). ^h Selectfluor (1.0 equiv.). ⁱ Selectfluor (3.0 equiv.). ^j CH₃CN (0.2 mol/L).

底物也能以较高的收率得到目标产物。含有咪唑结构的底物(**1j**)也能适用。甲基取代的底物(**1k**~**1p**)在此条件下也能得到相应的产物,长烷基链底物(**1q**和**1r**)以及环状底物(**1s**和**1t**)也表现出良好的反应性。令人感到意外的是,该反应体系能够对达格列净中间体(**1u**)、卡格列净中间体(**1v**)和布洛芬甲酯(**1w**)进行结构修饰,进一步证实了我们开发的方法的实用性。同样尝试了其他腈类化合物作为氮源(表 2, b)。在上述最优反应条件的基础上,烷基腈和芳基腈均能转化为相应的酰胺产物 **4b**~**4f**。

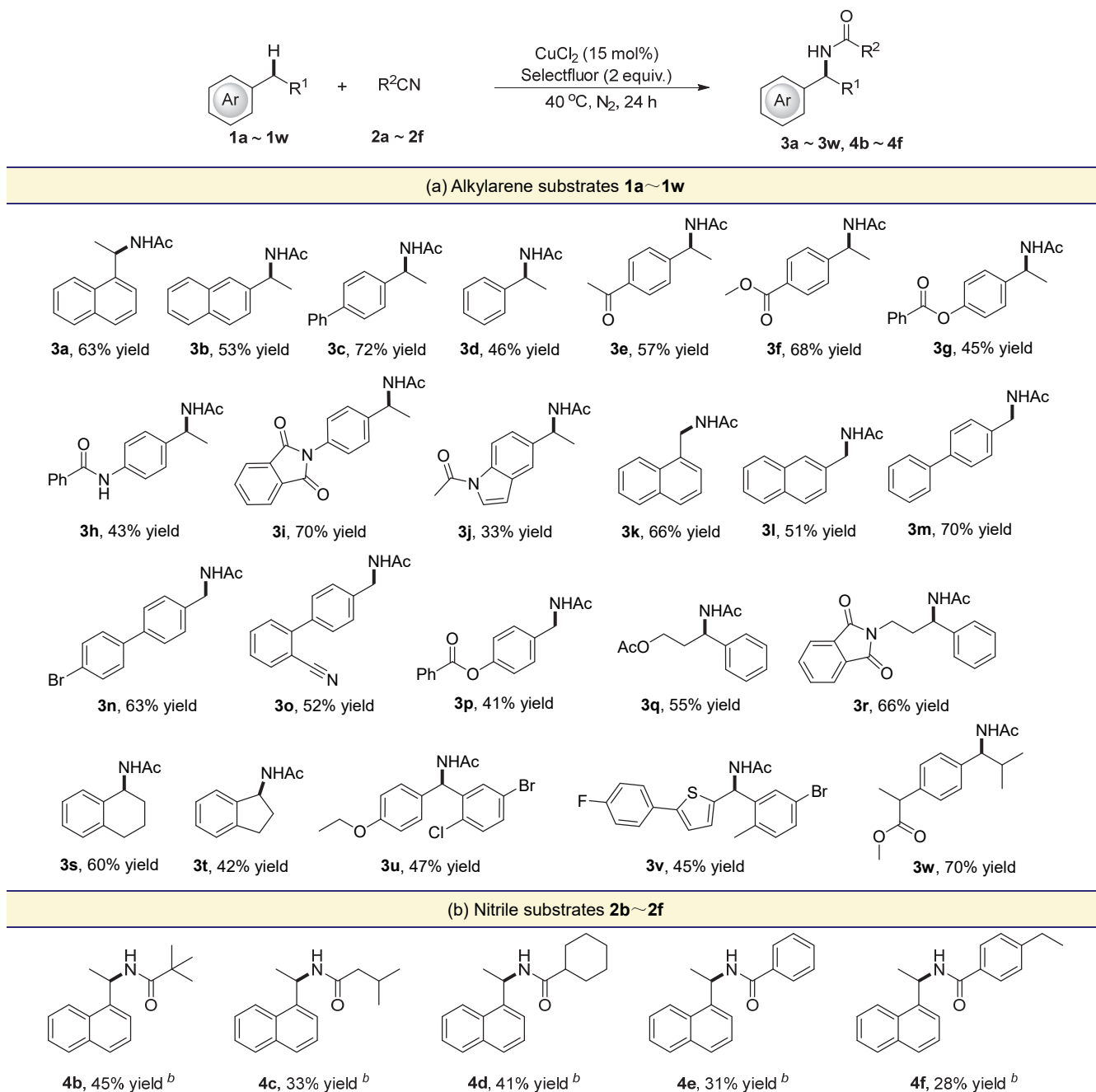
根据文献基础和机制实验,作者提出如下可能的反应机理(Scheme 2): Cu(I)催化剂被 Selectfluor (**A**)氧化生

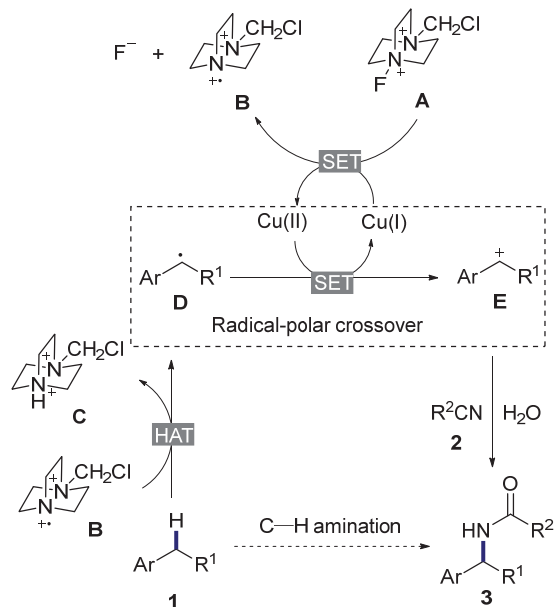
成 Cu(II),同时产生相应的氮正离子自由基 **B**,**B**可以有效地实现化合物 **1**的氢原子转移而产生自由基 **D**和化合物 **C**。经过课题组前期研究及相关报道^[18-20],Cu(II)可以实现自由基到碳正离子的自由基极性翻转(radical-polar crossover, RPC)过程,产生的碳正离子随后与腈类发生 Ritter 型胺化反应即可得到目标产物 **3**。

2 结论

综上所述,开发了一种铜/Selectfluor 共催化的苄基碳氢键 Ritter 胺基化方法。该方法首先通过 Selectfluor 介导的氢原子转移过程产生苄基自由基,再由铜(II)催化促使自由基发生自由基-极性交叉过程转化为苄基碳

表 2 苄基碳氢键 Ritter 胺基化反应的底物范围^a
Table 2 Substrate scope in the Ritter-type amination of benzylic C—H bonds





图式 2 铜/Selectfluor 共催化的苄基碳氢键 Ritter 胺基化反应的机理预测

Scheme 2 Proposed mechanism for Cu/Selectfluor co-catalyzed Ritter-type benzylic C—H amination

振仪测得, 氘代氯仿(^1H NMR 和 ^{13}C NMR 中参考 δ 7.26 和 77.00)或氘代二甲基亚砜(^1H NMR 和 ^{13}C NMR 中参考 δ 2.50 和 40.00)为溶剂. 高分辨质谱数据的测定采用美国沃特世 LCT Premier XE 型液质联用仪. 碳氢键底物和糖类化合物从 Energy Chemical®和 Adamas beta® 购买.

3.2 实验方法

将苄基碳氢键化合物 **1**(如果为固体, 0.5 mmol, 1.0 equiv.)、 CuCl_2 (0.15 mmol, 30 mol%)和 Selectfluor (1.0 mmol, 2.0 equiv.)加到配备有特氟龙隔膜和磁力搅拌子的 5 mL 反应瓶中. 将反应瓶密封并置于 N_2 气氛下, 通过隔膜注射 CH_3CN (2.5 mL, 0.2 mol/L)、苄基碳氢键化合物 **1**(如果为液体, 0.5 mmol, 1.0 equiv.)入反应瓶中. 将密封的反应瓶置于 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 下反应 24 h. 反应完成后, 用饱和 NaHCO_3 水溶液稀释反应混合物, 乙酸乙酯(20 mL $\times$ 3)萃取, 合并有机相, 用饱和食盐水(30 mL)洗涤, 无水硫酸钠干燥、过滤, 减压浓缩除去反应溶剂, 残余物经硅胶柱层析纯化[石油醚/乙酸乙酯作为洗脱剂]得到目标化合物 **3** 和 **4**.

N-(1-(萘-1-基)乙基)乙酰胺(**3a**)^[21]: 洗脱剂: *V*(石油醚)/*V*(乙酸乙酯)=2/1, 白色固体, m.p. $98\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$. 67 mg, 产率 63%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 8.10 (d, $J=8.1$ Hz, 1H), 7.87 (d, $J=7.7$ Hz, 1H), 7.80 (d, $J=7.9$ Hz, 1H), 7.60~7.41 (m, 4H), 5.98~5.88 (m, 1H), 5.74 (br, 1H), 1.96 (s, 3H), 1.67 (d, $J=8.0$ Hz, 3H); ^{13}C NMR

(100 MHz, CDCl_3) δ : 168.9, 138.2, 133.8, 131.1, 128.7, 128.3, 126.5, 125.8, 125.1, 123.4, 122.5, 44.6, 23.3, 20.6.

N-(1-(萘-2-基)乙基)乙酰胺(**3b**)^[22]: 洗脱剂: *V*(石油醚)/*V*(乙酸乙酯)=2/1, 白色固体, m.p. $156\sim 158\text{ }^\circ\text{C}$. 56 mg, 产率 53%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.82 (d, $J=7.5$ Hz, 3H), 7.75 (s, 1H), 7.46 (dt, $J=14.3$, 8.0 Hz, 3H), 5.85 (br, 1H), 5.33~5.24 (m, 1H), 2.01 (s, 3H), 1.58 (d, $J=6.7$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 169.1, 140.4, 133.3, 132.7, 128.5, 127.8, 127.6, 126.2, 125.9, 124.7, 124.5, 48.8, 23.5, 21.6.

N-(1-([1,1'-联苯]-4-基)乙基)乙酰胺(**3c**)^[23]: 洗脱剂: *V*(石油醚)/*V*(乙酸乙酯)=2/1, 白色固体, m.p. $149\sim 151\text{ }^\circ\text{C}$. 86 mg, 产率 72%. ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 8.33 (d, $J=7.6$ Hz, 1H), 7.72~7.53 (m, 4H), 7.52~7.42 (m, 2H), 7.36 (dd, $J=17.2$, 7.3 Hz, 3H), 5.00~4.89 (m, 1H), 1.85 (s, 3H), 1.36 (d, $J=6.8$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 168.2, 144.1, 140.0, 138.6, 128.9, 127.3, 126.6, 47.5, 22.7, 22.4.

N-(1-苯乙基)乙酰胺(**3d**)^[24]: 洗脱剂: *V*(石油醚)/*V*(乙酸乙酯)=2/1, 白色固体, m.p. $74\sim 76\text{ }^\circ\text{C}$. 38 mg, 产率 46%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.42~7.19 (m, 5H), 5.78 (br, 1H), 5.18~5.08 (m, 1H), 1.97 (s, 3H), 1.48 (d, $J=5.6$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 169.2, 143.2, 128.5, 127.2, 126.1, 48.7, 23.3, 21.7.

N-(1-(4-乙酰苯基)乙基)乙酰胺(**3e**)^[24]: 洗脱剂: *V*(石油醚)/*V*(乙酸乙酯)=2/1, 白色固体, m.p. $89\sim 91\text{ }^\circ\text{C}$. 58 mg, 产率 57%. ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 8.38 (d, $J=7.8$ Hz, 1H), 7.90 (d, $J=8.3$ Hz, 2H), 7.42 (d, $J=8.2$ Hz, 2H), 4.98~4.88 (m, 1H), 2.55 (s, 3H), 1.84 (s, 3H), 1.33 (d, $J=7.1$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 197.5, 168.4, 150.4, 135.4, 129.2, 128.3, 126.2, 126.1, 47.8, 26.7, 22.6, 22.3.

4-(1-乙酰胺乙基)苯甲酸甲酯(**3f**)^[23]: 洗脱剂: *V*(石油醚)/*V*(乙酸乙酯)=2/1, 白色固体, m.p. $94\sim 96\text{ }^\circ\text{C}$. 75 mg, 产率 68%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.95 (d, $J=7.9$ Hz, 2H), 7.33 (d, $J=7.8$ Hz, 2H), 6.33 (d, $J=7.2$ Hz, 1H), 5.17~5.04 (m, 1H), 3.87 (s, 3H), 1.95 (s, 3H), 1.43 (d, $J=6.9$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 169.4, 166.8, 148.6, 129.8, 128.9, 126.0, 52.0, 48.5, 23.2, 21.7.

4-(1-乙酰胺乙基)苯基苯甲酸酯(**3g**): 洗脱剂: *V*(石油醚)/*V*(乙酸乙酯)=2/1, 白色固体, m.p. $184\sim 187\text{ }^\circ\text{C}$. 64 mg, 产率 45%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 8.18 (d, $J=7.1$ Hz, 2H), 7.62 (d, $J=7.4$ Hz, 1H), 7.50 (t, $J=7.5$ Hz, 2H), 7.36 (d, $J=8.3$ Hz, 2H), 7.16 (d, $J=8.4$ Hz, 2H),

6.08 (d, $J=6.3$ Hz, 1H), 5.22~5.07 (m, 1H), 1.96 (s, 3H), 1.48 (d, $J=6.8$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 169.2, 165.2, 149.9, 140.8, 133.6, 130.1, 129.3, 128.5, 127.4, 121.8, 48.2, 23.3, 21.6. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{17}\text{H}_{18}\text{NO}_3$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 284.1281, found 284.1287.

N-(4-(1-乙酰胺乙基)苯基)苯甲酰胺(**3h**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=1/1$, 白色固体, m.p. 220~223 °C. 61 mg, 产率 43%. ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 10.22 (br, 1H), 8.25 (d, $J=7.9$ Hz, 1H), 7.95 (d, $J=7.3$ Hz, 2H), 7.70 (d, $J=8.2$ Hz, 2H), 7.63~7.56 (m, 1H), 7.53 (t, $J=7.4$ Hz, 2H), 7.27 (d, $J=8.2$ Hz, 2H), 4.95~4.83 (m, 1H), 1.84 (s, 3H), 1.33 (d, $J=6.9$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 168.1, 165.4, 140.0, 137.6, 134.9, 131.5, 128.4, 127.6, 126.2, 120.3, 47.3, 22.7, 22.4. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{17}\text{H}_{19}\text{N}_2\text{O}_2$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 283.1441, found 283.1444.

N-(1-(4-(1,3-二氧杂吲哚-2-基)苯基)乙基)乙酰胺(**3i**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=1/1$, 白色固体, m.p. 234~236 °C. 108 mg, 产率 70%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.95 (dd, $J=5.1, 2.9$ Hz, 2H), 7.79 (dd, $J=5.2, 2.9$ Hz, 2H), 7.44 (dd, $J=21.1, 8.3$ Hz, 4H), 5.79 (d, $J=6.9$ Hz, 1H), 5.25~5.13 (m, 1H), 1.99 (s, 3H), 1.52 (d, $J=6.9$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 168.3, 167.1, 144.9, 134.7, 131.5, 130.2, 127.2, 126.4, 123.4, 47.6, 22.6, 22.4.

N-(1-(1-乙酰基-1*H*-吲哚-5-基)乙基)乙酰胺(**3j**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=1/1$, 白色固体, m.p. 201~204 °C. 40 mg, 产率 33%. ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 8.39 (d, $J=7.8$ Hz, 1H), 8.27 (d, $J=8.2$ Hz, 1H), 8.17 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 8.09 (s, 1H), 7.47 (ddd, $J=20.9, 15.3, 7.4$ Hz, 3H), 5.14~5.02 (m, 1H), 2.87 (s, 3H), 1.87 (s, 3H), 1.44 (d, $J=6.9$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 170.4, 168.3, 140.4, 138.4, 136.9, 127.4, 125.6, 123.6, 120.0, 117.4, 116.3, 116.1, 47.7, 27.5, 22.7. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{14}\text{H}_{17}\text{N}_2\text{O}_2$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 245.1285, found 245.1290.

N-(萘-1-基甲基)乙酰胺(**3k**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 127~129 °C. 66 mg, 产率 66%. ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 8.39 (br, 1H), 8.07 (d, $J=7.6$ Hz, 1H), 7.95 (d, $J=7.9$ Hz, 1H), 7.85 (d, $J=7.2$ Hz, 1H), 7.64~7.52 (m, 2H), 7.50~7.35 (m, 2H), 4.72 (d, $J=5.5$ Hz, 2H), 1.90 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 169.0, 134.7, 133.3, 130.9, 128.5, 127.6, 126.2, 125.8, 125.6, 125.4, 123.5, 40.2, 22.6. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{13}\text{H}_{14}\text{NO}$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 200.1070,

found 200.1077.

N-(萘-2-基甲基)乙酰胺(**3l**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 111~113 °C. 51 mg, 产率 51%. ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 8.45 (br, 1H), 7.87 (d, $J=7.9$ Hz, 3H), 7.74 (s, 1H), 7.54~7.45 (m, 2H), 7.42 (d, $J=8.5$ Hz, 1H), 4.42 (d, $J=5.7$ Hz, 2H), 1.91 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 169.2, 137.2, 132.9, 132.0, 127.9, 127.5, 126.1, 125.9, 125.6, 125.3, 42.3, 22.6.

N-([1,1'-联苯]-4-基甲基)乙酰胺(**3m**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 162~164 °C. 79 mg, 产率 70%. ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 8.38 (br, 1H), 7.63 (dd, $J=11.0, 8.3$ Hz, 4H), 7.46 (t, $J=7.6$ Hz, 2H), 7.35 (dd, $J=11.4, 4.6$ Hz, 3H), 4.29 (d, $J=5.8$ Hz, 2H), 1.89 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 169.1, 140.0, 138.9, 138.7, 128.9, 127.9, 127.3, 126.6, 126.6, 41.8, 22.6.

N-((4'-溴-[1,1'-联苯]-4-基)甲基)乙酰胺(**3n**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 171~173 °C. 96 mg, 产率 63%. ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 8.39 (br, 1H), 7.63 (t, $J=7.1$ Hz, 5H), 7.34 (d, $J=7.8$ Hz, 2H), 4.28 (d, $J=5.7$ Hz, 2H), 1.89 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 169.1, 139.4, 139.1, 137.3, 131.8, 128.6, 128.0, 126.5, 120.8, 41.8, 22.6. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{BrNO}$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 304.0332, found 304.0337.

N-((2'-氰基-[1,1'-联苯]-4-基)甲基)乙酰胺(**3o**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 129~131 °C. 65 mg, 产率 52%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.75 (d, $J=7.7$ Hz, 1H), 7.64 (t, $J=7.5$ Hz, 1H), 7.50 (d, $J=8.3$ Hz, 2H), 7.44 (dd, $J=14.1, 6.2$ Hz, 2H), 7.38 (d, $J=7.8$ Hz, 2H), 6.18 (br, 1H), 4.46 (d, $J=5.4$ Hz, 2H), 2.02 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 170.2, 145.0, 138.9, 137.2, 133.7, 132.9, 129.9, 129.0, 128.1, 127.6, 118.7, 111.1, 43.3, 23.2.

4-(乙酰胺甲基)苯基苯甲酸酯(**3p**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 177~178 °C. 55 mg, 产率 41%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 8.20 (d, $J=7.1$ Hz, 2H), 7.65 (t, $J=7.4$ Hz, 1H), 7.52 (t, $J=7.7$ Hz, 2H), 7.36 (d, $J=8.4$ Hz, 2H), 7.19 (d, $J=8.5$ Hz, 2H), 5.73 (br, 1H), 4.46 (d, $J=5.7$ Hz, 2H), 2.05 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 169.2, 164.7, 149.4, 137.4, 134.0, 129.8, 129.0, 128.4, 121.7, 41.6, 22.6.

3-乙酰胺-3-苯丙基乙酸酯(**3q**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 89~91 °C. 65

mg, 产率 55%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.40~7.20 (m, 5H), 5.93 (br, 1H), 5.13 (dd, $J=14.2$, 6.8 Hz, 1H), 4.14~3.98 (m, 2H), 2.24~2.10 (m, 2H), 2.00 (d, $J=10.0$ Hz, 6H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 171.0, 169.3, 141.1, 128.8, 127.7, 126.5, 61.4, 50.7, 34.7, 23.4, 20.9.

N-(3-(1,3-二氧杂吡啶-2-基)-1-苯基丙基)乙酰胺(**3r**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=1/1$, 白色固体, m.p. 191~195 $^{\circ}\text{C}$. 106 mg, 产率 66%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.72 (d, $J=30.8$ Hz, 4H), 7.28~7.16 (m, 4H), 7.11 (t, $J=6.9$ Hz, 1H), 6.17 (d, $J=7.8$ Hz, 1H), 5.17~5.08 (m, 1H), 3.73 (dt, $J=14.0$, 7.5 Hz, 2H), 2.25 (d, $J=6.6$ Hz, 2H), 2.03 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 169.5, 168.2, 140.9, 133.8, 131.9, 128.6, 127.3, 126.3, 123.1, 50.9, 35.0, 33.8, 23.4. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{19}\text{H}_{19}\text{N}_2\text{O}_3$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 323.1390, found 323.1399.

N-(1,2,3,4-四氢萘-1-基)乙酰胺(**3s**)^[21]: 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 146~148 $^{\circ}\text{C}$. 57 mg, 产率 60%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.33~7.24 (m, 1H), 7.16 (dd, $J=8.7$, 5.0 Hz, 2H), 7.14~7.05 (m, 1H), 5.78 (br, 1H), 5.24~5.12 (m, 1H), 2.92~2.68 (m, 2H), 2.01 (s, 3H), 1.81 (d, $J=11.6$ Hz, 4H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 169.2, 137.6, 136.6, 129.1, 128.7, 127.2, 126.2, 47.4, 30.1, 29.2, 23.5, 19.9.

N-(2,3-二氢-1*H*-茚-1-基)乙酰胺(**3t**)^[21]: 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 152~154 $^{\circ}\text{C}$. 37 mg, 产率 42%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.34~7.17 (m, 4H), 5.72 (br, 1H), 5.47 (q, $J=7.6$ Hz, 1H), 3.02~2.93 (m, 1H), 2.91~2.81 (m, 1H), 2.63~2.52 (m, 1H), 2.02 (s, 3H), 1.87~1.74 (m, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 169.8, 143.4, 143.1, 127.9, 126.7, 124.8, 124.0, 54.7, 34.0, 30.2, 23.4.

N-(5-溴-2-氯苯基)(4-乙氧基苯基)甲基乙酰胺(**3u**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 179~182 $^{\circ}\text{C}$. 90 mg, 产率 47%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.50 (s, 1H), 7.33 (d, $J=8.3$ Hz, 1H), 7.19 (d, $J=8.1$ Hz, 1H), 7.05 (d, $J=7.8$ Hz, 2H), 6.80 (d, $J=7.7$ Hz, 2H), 6.66 (d, $J=7.0$ Hz, 1H), 6.32 (d, $J=7.1$ Hz, 1H), 3.97 (q, $J=6.6$ Hz, 2H), 1.95 (s, 3H), 1.38 (t, $J=6.6$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 169.3, 158.4, 141.2, 132.3, 131.5, 131.4, 131.0, 130.8, 128.7, 120.6, 114.5, 63.3, 54.1, 22.9, 14.7. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{17}\text{H}_{18}\text{BrClNO}_2$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 382.0204, found 382.0211.

N-(5-溴-2-甲基苯基)(5-(4-氟苯基)噻吩-2-基)甲基乙酰胺(**3v**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 183~186 $^{\circ}\text{C}$. 94 mg, 产率 45%. ^1H NMR

(400 MHz, CDCl_3) δ : 7.54~7.46 (m, 2H), 7.44 (s, 1H), 7.35 (d, $J=7.9$ Hz, 1H), 7.13~6.94 (m, 4H), 6.67 (s, 1H), 6.50 (d, $J=7.5$ Hz, 1H), 6.20 (d, $J=7.2$ Hz, 1H), 2.30 (s, 3H), 2.08 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 169.0, 163.6, 161.1, 143.5, 143.4, 141.3, 135.0, 132.4, 130.8, 130.2, 128.7, 127.3, 127.0, 122.7, 119.9, 115.9, 115.7, 49.7, 23.1, 18.8. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{20}\text{H}_{18}\text{BrFNOS}$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 418.0271, found 418.0277.

2-(4-(1-乙酰胺-2-甲基丙基)苯基)丙酸甲酯(**3w**)^[13]: 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 105~107 $^{\circ}\text{C}$. 97 mg, 产率 70%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.30~7.14 (m, 4H), 6.05 (d, $J=8.0$ Hz, 1H), 4.73 (t, $J=8.2$ Hz, 1H), 3.75~3.69 (m, 1H), 3.65 (s, 3H), 2.08~2.00 (m, 1H), 1.98 (s, 3H), 1.48 (d, $J=6.6$ Hz, 3H), 0.96 (d, $J=5.9$ Hz, 3H), 0.82 (d, $J=6.0$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 175.0, 169.4, 140.5, 139.2, 127.5, 127.2, 58.8, 52.0, 44.9, 33.2, 23.4, 19.7, 18.8, 18.50.

N-(1-(萘-1-基)乙基)新戊酰胺(**4b**)^[26]: 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 143~145 $^{\circ}\text{C}$. 57 mg, 产率 45%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 8.05 (d, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.86 (d, $J=7.5$ Hz, 1H), 7.80 (d, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.57~7.39 (m, 4H), 5.94~5.86 (m, 1H), 5.84 (s, 1H), 1.66 (d, $J=6.4$ Hz, 3H), 1.17 (s, 9H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 177.2, 138.5, 131.2, 128.7, 128.3, 126.4, 125.8, 125.1, 123.5, 122.4, 44.5, 38.6, 27.5, 20.5.

3-甲基-*N*-(1-(萘-1-基)乙基)丁酰胺(**4c**): 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 151~153 $^{\circ}\text{C}$. 42 mg, 产率 33%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 8.10 (d, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.86 (d, $J=7.4$ Hz, 1H), 7.79 (d, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.56~7.41 (m, 4H), 6.01~5.88 (m, 1H), 5.77 (d, $J=6.7$ Hz, 1H), 2.18~2.06 (m, 1H), 2.00 (d, $J=6.7$ Hz, 2H), 1.66 (d, $J=6.6$ Hz, 3H), 0.92 (dd, $J=15.3$, 6.5 Hz, 7H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 171.3, 138.2, 133.9, 131.1, 128.7, 128.3, 126.5, 125.8, 125.1, 123.5, 122.5, 46.1, 44.3, 26.1, 22.42, 22.36, 20.5. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{17}\text{H}_{22}\text{NO}$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 256.1696, found 256.1701.

N-(1-(萘-1-基)乙基)环己甲酰胺(**4d**)^[26]: 洗脱剂: $V(\text{石油醚})/V(\text{乙酸乙酯})=2/1$, 白色固体, m.p. 159~161 $^{\circ}\text{C}$. 58 mg, 产率 41%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 8.06 (d, $J=8.2$ Hz, 1H), 7.86 (d, $J=7.5$ Hz, 1H), 7.79 (d, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.56~7.47 (m, 3H), 7.44 (t, $J=7.6$ Hz, 1H), 5.96~5.86 (m, 1H), 5.75 (d, $J=7.5$ Hz, 1H), 2.08~1.98 (m, 1H), 1.89~1.69 (m, 5H), 1.65 (d, $J=6.7$ Hz, 4H), 1.51~1.36 (m, 2H), 1.27~1.13 (m, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 174.9, 138.4, 133.9, 131.2, 128.7,

128.3, 126.4, 125.8, 125.1, 123.5, 122.4, 45.6, 44.2, 29.7, 29.5, 25.64, 25.61, 20.5.

N-(1-(萘-1-基)乙基)苯甲酰胺(**4e**)^[27]: 洗脱剂: *V*(石油醚)/*V*(乙酸乙酯)=2/1, 白色固体, m.p. 183~185 °C. 43 mg, 产率 31%. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 8.17 (d, *J*=8.2 Hz, 1H), 7.88 (d, *J*=7.7 Hz, 1H), 7.82 (d, *J*=8.2 Hz, 1H), 7.73 (d, *J*=7.9 Hz, 2H), 7.60 (d, *J*=7.1 Hz, 1H), 7.56~7.42 (m, 4H), 7.37 (t, *J*=7.4 Hz, 2H), 6.46 (d, *J*=7.1 Hz, 1H), 6.18~6.07 (m, 1H), 1.78 (d, *J*=6.9 Hz, 3H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ: 166.4, 138.1, 134.4, 133.9, 131.4, 131.2, 128.7, 128.5, 126.9, 126.6, 125.9, 125.2, 123.4, 122.6, 45.2, 20.6.

4-乙基-*N*-(1-(萘-1-基)乙基)苯甲酰胺(**4f**): 洗脱剂: *V*(石油醚)/*V*(乙酸乙酯)=2/1, 白色固体, m.p. 187~189 °C. 42 mg, 产率 28%. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 8.17 (d, *J*=8.3 Hz, 1H), 7.88 (d, *J*=7.5 Hz, 1H), 7.82 (d, *J*=8.2 Hz, 1H), 7.66 (d, *J*=8.2 Hz, 2H), 7.60 (d, *J*=7.1 Hz, 1H), 7.56~7.43 (m, 3H), 7.21 (d, *J*=8.1 Hz, 2H), 6.31 (d, *J*=7.6 Hz, 1H), 6.17~6.08 (m, 1H), 2.66 (q, *J*=7.6 Hz, 2H), 1.78 (d, *J*=6.7 Hz, 3H), 1.21 (t, *J*=7.6 Hz, 3H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ: 166.4, 148.1, 138.2, 133.9, 131.7, 131.2, 128.7, 128.4, 128.0, 127.0, 126.6, 125.8, 125.2, 123.5, 122.6, 45.1, 28.7, 20.6, 15.3. HRMS (ESI) calcd for C₂₁H₂₂NO [M+H]⁺ 304.1696, found 304.1699.

辅助材料(Supporting Information) 化合物 **3**, **4** 的核磁图谱. 这些材料可以免费从本刊网站(<http://sioc-journal.cn/>)上下载.

References

- [1] McGrath, N. A.; Brichacek, M.; Njardarson, J. T. *J. Chem. Educ.* **2010**, *87*, 1348.
- [2] Meunier, B.; de Visser, S. P.; Shaik, S. *Chem. Rev.* **2004**, *104*, 3947.
- [3] (a) Tanwar, L.; Börgel, J.; Ritter, T. *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 17983.
(b) Yang, H.; Wang, F.; Jiang, X.; Zhou, Y.; Xu, X.; Tang, P. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2018**, *57*, 13266.
(c) Clark, J. R.; Feng, K.; Sookezian, A.; White, M. C. *Nat. Chem.* **2018**, *10*, 583.
- [4] (a) Massolo, E.; Pirola, M.; Benaglia, M. *Eur. J. Org. Chem.* **2020**, *2020*, 4641.
(b) de Figueiredo, R. M.; Suppo, J.-S.; Campagne, J.-M. *Chem. Rev.* **2016**, *116*, 12029.
(c) Pattabiraman, V. R.; Bode, J. W. *Nature* **2011**, *480*, 471.
- [5] Ritter, J. J.; Minieri, P. P. *J. Am. Chem. Soc.* **1948**, *70*, 4045.
- [6] Sakaguchi, S.; Hirabayashi, T.; Ishii, Y. *Chem. Commun.* **2002**, *52*, 516.
- [7] Zhang, Y.; Dong, J.; Liu, L.; Liu, L.; Zhou, Y.; Yin, S. F. *Org. Biomol. Chem.* **2017**, *15*, 2897.
- [8] Nair, V.; Suja, T. D.; Mohanan, K. *Tetrahedron Lett.* **2005**, *46*, 3217.
- [9] Narobe, R.; Murugesan, K.; Haag, C.; Schirmer, T. E.; König, B. *Chem. Commun.* **2022**, *58*, 8778.
- [10] Chen, Y.; Yang, B.; Li, Q.-Y.; Lin, Y.-M.; Gong, L. *Chem. Commun.* **2023**, *59*, 118.
- [11] Ruos, M. E.; Kinney, R. G.; Ring, O. T.; Doyle, A. G. *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145*, 18487.
- [12] Shen, T.; Lambert, T. H. *J. Am. Chem. Soc.* **2021**, *143*, 8597.
- [13] Zhang, L.; Fu, Y.; Shen, Y.; Liu, C.; Sun, M.; Cheng, R.; Zhu, W.; Qian, X.; Ma, Y.; Ye, J. *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 4138.
- [14] Chu, Q.; Zhou, Y.; Ji, C.; Liu, P.; Sun, P. *Synthesis* **2023**, *55*, 2969.
- [15] Xu, Y.; Li, Q.; Ye, R.; Xu, B.; Zhou, X. *J. Org. Chem.* **2023**, *88*, 9518.
- [16] Zhang, Z.; Chen, P.; Liu, G. *Chem. Soc. Rev.* **2022**, *51*, 1640.
- [17] Zhuang, Z.; Sheng, T.; Qiao, J. X.; Yeung, K.-S.; Yu, J.-Q. *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, *146*, 17311.
- [18] Zhang, Y.; Jiang, Y.; Wang, Y.; Sun, T.; Meng, Y.; Huang, Y.; Lv, X.; Gao, J.; Zhang, X.; Zhang, S.; Liu, S. *Org. Lett.* **2022**, *24*, 2679.
- [19] Sun, T.; Zhang, Y.; Meng, Y.; Wang, Y.; Zhu, Q.; Jiang, Y.; Liu, S. *Chin. J. Org. Chem.* **2022**, *42*, 1414 (in Chinese).
(孙天义, 张依凡, 孟远健, 王怡, 朱琦峰, 姜玉新, 刘石惠, 有机化学, **2022**, *42*, 1414.)
- [20] (a) Hu, H.; Chen, S.-J.; Mandal, M.; Pratik, S. M.; Buss, J. A.; Krska, S. W.; Cramer, C. J.; Stahl, S. S. *Nat. Catal.* **2020**, *3*, 358.
(b) Chen, S.-J.; Golden, D. L.; Krska, S. W.; Stahl, S. S. *J. Am. Chem. Soc.* **2021**, *143*, 14438.
(c) Li, Q. Y.; Gockel, S. N.; Lutovsky, G. A.; DeGlopper, K. S.; Baldwin, N. J.; Bundesmann, M. W.; Tucker, J. W.; Bagley, S. W.; Yoon, T. P. *Nat. Chem.* **2022**, *14*, 94.
- [21] Pérez-Venegas, M.; Juaristi, E. *Tetrahedron* **2018**, *74*, 6453.
- [22] Zhang, L.; Chen, B.; He, P.; Li, G.; Zhang, L.-C.; Gao, S. *Synlett* **2022**, *33*, 1515.
- [23] Liang, Y.; Zhan, X.; Li, F.; Bi, H.; Fan, W.; Zhang, S.; Li, M.-B. *Chem. Catal.* **2023**, *3*, 100582.
- [24] Sanz, R.; Martínez, A.; Guilarte, V.; Álvarez-Gutiérrez, J. M.; Rodríguez, F. *Eur. J. Org. Chem.* **2007**, *2007*, 4642.
- [25] Torre, O.; Gotor-Fernández, V.; Gotor, V. *Tetrahedron: Asymmetry* **2006**, *17*, 860.
- [26] Asahara, H.; Kida, T.; Iwamoto, T.; Hinoue, T.; Akashi, M. *Tetrahedron* **2014**, *70*, 197.
- [27] Xu, P.; Qi, F.-L.; Han, F.-S.; Wang, Y.-H. *Chem. Asian J.* **2016**, *11*, 2030.

(Lu, Y.)