可见光催化合成 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类化合物

白其凡 何静耀 祝小青 冯高峰 金城安*

(绍兴文理学院化学化工学院 绍兴 312000)

摘要 报道了一种可见光下, 钌催化苯基苄基醚重氮盐经脱氮、分子内自由基加成及芳香化合成 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类化合物的有效方法. 该方法反应条件温和、操作简单、高效, 为 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类化合物的合成提供了新途径.

关键词 可见光催化; 钌催化; 自由基环加成; 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃

Visible-Light Mediated Synthesis of 6*H*-Benzo[*c*]chromenes

Bai, Qifan He, Jingyao Zhu, Xiaoqing Feng, Gaofeng Jin, Cheng'an*

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000)

Abstract An effective visible-light mediated Ru-catalyzed protocol for accessing 6*H*-benzo[*c*]chromenes from benzyloxybenzenediazonium salt via a sequence of dediazonation, intramolecular radical cyclization and aromatization has been developed. The protocol features mild conditions, simple operation and high efficiency, providing a new approach for synthesizing 6*H*-benzo[*c*]chromenes.

Keywords visible light photoredox catalysis; Ru-catalysis; radical cycloaddition; 6*H*-benzo[*c*]chromene

6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃是一类重要的含氧杂环化合物, 其分子骨架结构广泛存在于天然产物和具有生物活性的药物分子中, 例如苦苣菜链格孢提取物 **1** 和 **2**^[1]、大麻酚 **3**^[2]以及活性分子 pulchrol **4**^[3]等(图 1). 传统上合成这类化合物主要通过 Suzuki-Miyaura, Negishi, Kumada-Corriu 以及 Hiyama 偶联反应得以实现^[4](Path 1), 然而这些方法底物不易制备且具有较大局限性, 不利于 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类衍生物的简单、绿色合成. 近几年来, 化学家们利用过渡金属催化 C—H 芳基化反应^[5](Path 2)、分子内 S_NAr 反应^[6](Path 3)以及 Diels-Alder 反应^[7](Path 4)分别实现了各种各样 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类化合物的有效合成(Scheme 1). 这些方法在很大程度上拓宽了 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类衍生物的合成途径, 也存在许多缺陷, 如需要添加化学计量的碱, 反应要在高温下进行等. 因此, 发展一种温和、高效的 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类化合物合成方法仍然具有现实意义.

可见光催化体系具有反应条件温和、高效绿色、能耗低等优点, 为有机合成注入了新活力^[8]. 特别是近几年来, 随着光催化反应的开发和广泛应用^[9], 可见光催

图 1 一些具有 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃结构的活性分子
Figure 1 Some active molecules with 6*H*-benzo[*c*]benzopyran structure

化在药物合成和功能分子结构修饰等方面显示出了较高的应用价值^[10]. 因此, 我们设想在温和的可见光催化体系中, 以苯基苄基醚重氮盐为原料, 经脱氮、分子内自由基加成/环化, 来合成 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类化合物.

* Corresponding author. E-mail: jca@usx.edu.cn

Received July 31, 2018; revised September 2, 2018; published online October 12, 2018.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21302130) and the Research Project of Shaoxing University (No. 2017LG1001).
国家自然科学基金(No. 21302130)、绍兴文理学院校级科研(No. 2017LG1001)资助项目.

图式 1 6H-苯并[c]苯并吡喃的合成方法
Scheme 1 Syntheses of 6H-benzo[c]chromene

1 结果与讨论

1.1 反应条件优化

首先, 我们以苯基苄基醚重氮盐 **1a** 作为模板底物, 以 $\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ 为光催化剂, 甲醇作溶剂, 体系经氮气保护, 在室温下用 36 W 白色节能灯照射反应管, 磁力搅拌反应. 反应 24 h 后, 以 56% 的收率成功分离得到目标产物 **2a** (表 1, Entry 1). 对不同的有机溶剂进行了考察, 发现在二氯甲烷(DCM)、丙酮(acetone) 溶剂中, 反应效果不好 (表 1, Entries 2, 3). 而在 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)、四氢呋喃(THF)、乙腈(MeCN)、乙酸乙酯(EtOAc) 等溶剂中, 反应收率均得到了提高 (表 1, Entries 4~7). 其中, 乙酸乙酯作溶剂反应效果最令人满意, 能以 96% 的分离收率获得目标产物 (表 1, Entry 7). 随后, 以乙酸乙酯作为溶剂, 对不同的光催化剂进行了筛选, 发现 $[\text{Ru}(\text{bpy})_3](\text{PF}_6)_2$ 、 $[\text{Ru}(\text{phen})_3]\text{Cl}_2$ 、Eosin Y 的催化效果都不如 $\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (表 1, Entries 8~10). 减少或者不添加光催化剂 $\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$, 都不利于反应进行 (表 1, Entries 11, 12). 此外, 光照对反应结果影响较大 (表 1, Entries 13, 14), 特别是在没有光照的情况下, 反应几乎没有发生. 综合上述优化情况, 确定最佳反应条件为 1% $\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ 为光催化剂, 乙酸乙酯为溶剂, 氮气保护和室温下, 36 W 白光照射反应体系, 搅拌 24 h.

1.2 底物适用性探究

在最佳反应条件下, 我们探究了不同取代基对反应的适用性, 结果如表 2 所示. 实验表明: 苯环上含有单取代基, 如卤素(**2c**, **2d**, **2h**, **2i**)、甲基(**2b**, **2e**, **2f**, **2j**)、甲氧基(**2g**)等官能团的底物均能顺利完成反应, 以 61%~90% 的分离收率得到目标产物. 值得注意的是: 含多取

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

Entry	Catalyst (mol%)	Solvent	Yield ^b /%
1	$\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (1.0)	MeOH	56
2	$\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (1.0)	DCM	25
3	$\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (1.0)	Acetone	49
4	$\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (1.0)	DMF	79
5	$\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (1.0)	THF	68
6	$\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (1.0)	MeCN	85
7	$\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (1.0)	EtOAc	96
8	$[\text{Ru}(\text{bpy})_3](\text{PF}_6)_2$ (1.0)	EtOAc	86
9	$[\text{Ru}(\text{phen})_3]\text{Cl}_2$ (1.0)	EtOAc	30
10	Eosin Y (1.0)	EtOAc	5
11	$\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (0.5)	EtOAc	70
12 ^c	—	EtOAc	0
13 ^d	$\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (1.0)	EtOAc	0
14 ^e	$\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (1.0)	EtOAc	89

^a Reaction conditions: **1a** (0.2 mmol), solvent (2 mL), catalyst, 36 W CF-lamps, r.t., under N_2 for 24 h. ^b Isolated yields. ^c Without catalyst. ^d Without light. ^e 24 W CF-lamps.

代基的底物也能顺利进行, 并以良好的收率得到相应的产物(**2k**~**2m**). 另一方面, 空间位阻效应对反应影响较大(**2f**, **2j**, **2l**, **2m**). 令人遗憾的是, 含吡啶杂环重氮盐在该体系下没有得到目标产物(**2n**), 而二苯基醚类重氮盐直接得到了脱氮产物二苯基醚(53%产率).

表 2 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类化合物的合成^a
Table 2 Synthesis of 6*H*-benzo[*c*]chromen-6-ones

^a Reaction conditions: **1** (0.2 mmol), EtOAc (2 mL), Ru(bpy)₃Cl₂ (1 mol%), 36 W CF-lamps, r.t., under N₂ for 24 h.

1.3 可能的反应机理

我们对反应机理进行了初步探究, 在最优条件下加入 2 equiv. 的自由基抑制剂 2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧基 (TEMPO) 或 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚 (BHT) 时, 反应不能发生 (Scheme 2), 表明该反应可能经历了自由基历程。

图式 2 机理初步探究实验

Scheme 2 Controlled experiments for reaction mechanism

结合实验结果和参考文献[8a, 11], 提出了可能的反应机理, 如 Scheme 3 所示。首先在可见光照射下, Ru-(bpy)₃Cl₂ 吸收光子变为激发态的 *Ru(bpy)₃²⁺, 然后激发态的 *Ru(bpy)₃²⁺ 将重氮盐还原得到自由基 **A** 和 Ru(bpy)₃³⁺, 自由基 **A** 经分子内加成环化得到中间体 **B**, 中间体 **B** 被正三价态的 Ru(bpy)₃³⁺ 氧化, 催化剂完成循环并生成中间体 **C**, **C** 脱去一分子氢质子得到 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃。

图式 3 可能的反应机理

Scheme 3 Plausible reaction mechanism

2 结论

报道了一种可见光下, 钌催化重氮盐经脱氮/环化合成 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类化合物的有效方法。反应可能经历了自由基历程。该方法条件温和、绿色高效、具有较好的底物适用性, 为 6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃类化合物

的合成提供了新思路.

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

^1H NMR 和 ^{13}C NMR 谱: Bruker ARX 400 型核磁共振波谱仪, 氘代氯仿为溶剂, TMS 为内标. 气相色谱-质谱联用仪, 型号为 6890N/5975 MSD. 展开剂为石油醚 (60~90 °C) 和乙酸乙酯, 柱层析硅胶 (200~300 目). 所用化学试剂均为市售化学纯或分析纯, 直接使用. 重氮盐根据文献[5c, 12]制备得到.

3.2 实验方法

在 10 mL 的耐压管中加入苯基重氮盐 (0.2 mmol), $\text{Ru}(\text{bpy})_3\text{Cl}_2$ (1.3 mg, 0.002 mmol), 乙酸乙酯 2 mL, 在氮气保护下, 用 36 W 白色节能灯照射反应管, 然后体系于室温搅拌 24 h, 反应结束后, 用乙酸乙酯稀释, 水洗 3 次, 有机相用无水硫酸钠干燥, 然后减压蒸馏浓缩, 柱层析分离得到目标产物 **2a**~**2n**.

6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃^[5f](**2a**): 无色液体, 收率 96%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.77 (dd, $J=7.7$, 1.6 Hz, 1H), 7.73 (d, $J=7.7$ Hz, 1H), 7.41 (td, $J=7.7$, 1.2 Hz, 1H), 7.31 (td, $J=7.5$, 1.2 Hz, 1H), 7.29~7.24 (m, 1H), 7.18 (dd, $J=7.5$, 0.6 Hz, 1H), 7.09 (td, $J=7.6$, 1.2 Hz, 1H), 7.03 (dd, $J=8.1$, 1.1 Hz, 1H), 5.15 (s, 2H).

9-甲基-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃^[5c](**2b**): 无色液体, 收率 82%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.76 (dd, $J=7.6$, 1.6 Hz, 1H), 7.55 (s, 1H), 7.28~7.24 (m, 1H), 7.14~7.06 (m, 3H), 7.02 (dd, $J=8.0$, 1.2 Hz, 1H), 5.12 (s, 2H), 2.44 (s, 3H).

9-氯-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃^[5c](**2c**): 无色液体, 收率 66%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.70 (d, $J=8.2$ Hz, 1H), 7.69 (d, $J=1.7$ Hz, 1H), 7.33~7.24 (m, 2H), 7.12~7.07 (m, 2H), 7.02 (dd, $J=8.1$, 1.1 Hz, 1H), 5.10 (s, 2H).

9-溴-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃^[5c](**2d**): 淡黄色液体, 收率 83%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.84 (d, $J=1.7$ Hz, 1H), 7.69 (dd, $J=7.8$, 1.4 Hz, 1H), 7.42 (dd, $J=8.0$, 1.8 Hz, 1H), 7.35~7.28 (m, 1H), 7.13~6.99 (m, 3H), 5.08 (s, 3H).

7-甲基-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃(**2e**): 白色固体, 收率 65%. m.p. 48~50 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.74 (dd, $J=7.7$, 1.0 Hz, 1H), 7.59 (d, $J=7.8$ Hz, 1H), 7.36~7.21 (m, 2H), 7.14 (d, $J=7.5$ Hz, 1H), 7.07 (t, $J=7.5$ Hz, 1H), 7.01 (d, $J=8.0$ Hz, 1H), 5.19 (s, 2H), 2.33 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 154.4, 133.1, 130.1, 129.8, 129.6, 129.3, 127.8, 123.5, 123.1, 122.1, 119.8, 117.2, 65.6, 18.5. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{14}\text{H}_{13}\text{O}$ [$\text{M}+\text{H}$]⁺

197.0966, found 197.0963.

10-甲基-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃(**2f**)和 8-甲基-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃(**2f'**) (**2f** : **2f'** = 1.16 : 1): 白色固体, 收率 61%. m.p. 43~48 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.84 (dd, $J=8.3$, 1.5 Hz, 1H), 7.75 (dd, $J=7.7$, 1.5 Hz, 1H), 7.64 (d, $J=7.9$ Hz, 0.88 H), 7.36~7.19 (m, 5.8H), 7.17~6.98 (m, 5.8H), 5.12 (s, 1.7H), 5.00 (s, 2H), 2.68 (s, 3H), 2.40 (s, 2.59H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 156.5, 154.5, 137.6, 134.5, 134.2, 132.2, 131.4, 129.3, 129.2, 128.9, 128.7, 127.9, 127.3, 127.1, 125.3, 124.5, 123.1, 123.0, 122.7, 122.1, 121.9, 121.5, 117.4, 117.3, 69.8, 68.5, 23.1, 21.3. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{14}\text{H}_{13}\text{O}$ [$\text{M}+\text{H}$]⁺ 197.0966, found 197.0961.

10-甲氧基-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃(**2g**)和 8-甲氧基-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃(**2g'**) (**2g** : **2g'** = 1 : 7.7): 淡黄色固体, 收率 70%. m.p. 52~58 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.69~7.64 (m, 2H), 7.21 (d, $J=1.0$ Hz, 1.2H), 7.08~7.06 (m, 1.4 H), 7.01~6.99 (m, 1.1H), 6.93 (d, $J=8.6$ Hz, 1H), 6.71 (d, $J=2.6$ Hz, 1 H), 5.11 (s, 2H), 5.03 (s, 0.26H), 3.96 (s, 0.39H), 3.86 (s, 3H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 159.4, 156.5, 155.2, 153.9, 134.5, 133.0, 129.5, 128.7, 128.6, 128.4, 123.5, 123.0, 122.9, 122.6, 122.2, 121.7, 118.8, 117.3, 117.2, 116.8, 114.8, 113.9, 111.4, 111.0, 68.9, 68.5, 55.6, 55.4. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{14}\text{H}_{13}\text{O}_2$ [$\text{M}+\text{H}$]⁺ 213.0916, found 213.0910.

3-氟-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃(**2h**): 无色液体, 收率 90%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.75~7.59 (m, 2H), 7.38 (t, $J=7.7$ Hz, 1H), 7.29 (dd, $J=7.5$, 0.9 Hz, 1H), 7.15 (d, $J=7.4$ Hz, 1H), 6.87~6.62 (m, 2H), 5.13 (s, 2H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 163.3 (d, $J=247$ Hz, 1C), 155.9 (d, $J=12.1$ Hz, 1C), 130.5, 129.5, 128.6, 127.6, 124.7, 124.4 (d, $J=10.0$ Hz, 1C), 121.7, 119.3 (d, $J=3.1$ Hz, 1C), 109.3 (d, $J=22.0$ Hz, 1C), 104.9 (d, $J=24.3$ Hz, 1C), 68.7. HRMS (ESI) calcd for $\text{C}_{13}\text{H}_{10}\text{FO}$ [$\text{M}+\text{H}$]⁺ 201.0716, found 201.0709.

2-氯-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃^[7](**2i**): 无色液体, 收率 83%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.59 (d, $J=2.6$ Hz, 1H), 7.55 (d, $J=7.6$ Hz, 1H), 7.32 (t, $J=7.6$ Hz, 1H), 7.23 (dt, $J=7.6$, 1.0 Hz, 1H), 7.06~7.10 (m, 2H), 6.84 (d, $J=8.6$ Hz, 1H), 5.10 (s, 2H).

2-甲基-6*H*-苯并[*c*]苯并吡喃^[7](**2j**): 无色液体, 收率 77%. ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.73 (d, $J=7.7$ Hz, 1H), 7.58 (d, $J=1.6$ Hz, 1H), 7.41 (t, $J=8.2$ Hz, 1H), 7.31 (td, $J=7.5$, 1.1 Hz, 1H), 7.18 (dd, $J=7.5$, 0.6 Hz, 1H), 7.08 (dd, $J=8.2$, 1.5 Hz, 1H), 6.94 (d, $J=8.2$ Hz, 1H),

5.12 (s, 2H), 2.40 (s, 3H).

2,9-二甲基-6H-苯并[c]苯并吡喃^[5c](**2k**): 浅黄色液体, 收率 85%. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 7.55~7.48 (m, 2H), 7.11~6.99 (m, 2H), 6.88 (d, $J=8.2$ Hz, 1H), 5.04 (s, 2H), 2.40 (s, 3H), 2.35 (s, 3H).

2,10-二甲基-6H-苯并[c]苯并吡喃(**2l**)和 2,8-二甲基-6H-苯并[c]苯并吡喃(**2l'**) (**2l**: **2l'**=1:1): 浅黄色液体, 收率 74%. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 7.64~7.59 (m, 2H), 7.54 (d, $J=1.6$ Hz, 1H), 7.27~7.17 (m, 3H), 7.12~6.96 (m, 5H), 6.91 (d, $J=8.2$ Hz, 1H), 5.08 (s, 2H), 4.97 (s, 2H), 2.69 (s, 3H), 2.44~2.36 (m, 9H); ¹³C NMR (101 MHz, CDCl₃) δ : 154.3, 152.4, 137.5, 134.5, 134.1, 132.1, 131.6, 131.3, 130.5, 129.9, 129.6, 129.4, 129.2, 129.1, 128.4, 127.5, 127.0, 125.3, 124.3, 123.4, 122.8, 122.7, 121.9, 116.9, 69.8, 68.5, 23.1, 21.2 (d, $J=3.6$ Hz, 2C), 20.9. HRMS (ESI) calcd for C₁₅H₁₅O [M+H]⁺ 211.1124, found 211.1132.

2-甲基-10-甲氧基-6H-苯并[c]苯并吡喃(**2m**)和 2-甲基-8-甲氧基-6H-苯并[c]苯并吡喃(**2m'**) (**2m**: **2m'**=1:3.65): 浅黄色液体, 收率 89%. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 7.60 (d, $J=8.6$ Hz, 1H), 7.44 (d, $J=1.7$ Hz, 1H), 7.25~7.19 (m, 0.4H), 7.03~6.83 (m, 4H), 6.78 (d, $J=7.9$ Hz, 0.3H), 6.67 (d, $J=2.6$ Hz, 1H), 5.03 (s, 2H), 4.95 (s, 0.6H), 3.91 (s, 0.8H), 3.81 (s, 3H), 2.36 (s, 0.8H), 2.34 (s, 3H); ¹³C NMR (101 MHz, CDCl₃) δ : 159.3, 156.5, 153.1, 151.2, 134.7, 133.2, 131.4, 130.7, 129.9, 129.2, 129.0, 128.3, 123.4, 123.1, 122.7, 121.9, 118.9, 117.4, 116.9, 116.5, 114.7, 113.9, 111.4, 110.1, 68.9, 68.6, 55.6, 55.4, 21.3, 21.0. HRMS (ESI) calcd for C₁₅H₁₅O₂ [M+H]⁺ 227.1072, found 227.1076.

辅助材料(Supporting Information) 目标产物的 ¹H NMR、¹³C NMR 核磁表征谱图. 这些材料可以免费从本刊网站(<http://sioc-journal.cn/>)上下载

References

- [1] (a) Evidente, A.; Punzo, B.; Andolfi, A.; Berestetskiy, A.; Motta, A. *J. Agric. Food Chem.* **2009**, *57*, 6656.
(b) Berestetskiy, A.; Cimmino, A.; Sofronova, J.; Dalinova, A.; Avolio, F.; Evidente, M.; Chisty, L.; Krivorotov, D.; Evidente, A. *J. Agric. Food Chem.* **2015**, *63*, 1196.
- [2] Radwan, M. M.; ElSohly, M. A.; Slade, D.; Ahmed, S. A.; Khan, I. A.; Ross, S. A. *J. Nat. Prod.* **2009**, *72*, 906.
- [3] Killander, D.; Sterner, O. *Eur. J. Org. Chem.* **2014**, 1594.
- [4] (a) Miyaura, N.; Suzuki, A. *Chem. Rev.* **1995**, *95*, 2457.
(b) Hassan, J.; Sévignon, M.; Gozzi, C.; Schulz, E.; Lemaire, M. *Chem. Rev.* **2002**, *102*, 1359.
- (c) Johansson Seechurn, C. C.; Kitching, M. O.; Colacot, T. J.; Snieckus, V. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2012**, *21*, 5062.
- (d) Cano, R.; Schmidt, A. F.; McGlacken, G. P. *Chem. Sci.* **2015**, *6*, 5338.
- [5] (a) Majumdar, K. C.; Chakravorty, S.; De, N. *Tetrahedron Lett.* **2008**, *49*, 3419.
(b) Liu, W.; Cao, H.; Xin, J.; Jin, L.; Lei, A. *Chem.-Eur. J.* **2011**, *17*, 3588.
(c) Zhou, J.; Huang, L. Z.; Li, Y. Q.; Du, Z. T. *Tetrahedron Lett.* **2012**, *53*, 7036.
(d) Villamizar, M. C. O.; Zubkov, F. I.; Galvis, C. E. P.; Méndez, L. Y. V.; Kouznetsov, V. V. *Org. Chem. Front.* **2017**, *4*, 1736.
(e) Guo, D. D.; Li, B.; Wang, D. Y.; Gao, Y. R.; Guo, S. H.; Pan, G. F.; Wang, Y. Q. *Org. Lett.* **2017**, *19*, 798.
(f) Cano, R.; Pérez, J. M.; Ramón, D. J.; McGlacken, G. P. *Tetrahedron* **2016**, *72*, 1043.
(g) Sun, C. L.; Gu, Y. F.; Huang, W. P.; Shi, Z. J. *Chem. Commun.* **2011**, *47*, 9813.
- [6] Singha, R.; Ahmed, A.; Nuree, Y.; Ghosh, M.; Ray, J. K. *RSC Adv.* **2015**, *5*, 50174.
- [7] He, Y.; Zhang, X.; Cui, L.; Wang, J.; Fan, X. *Green Chem.* **2012**, *14*, 3429.
- [8] (a) Dai, X.; Xu, X.; Li, X. *Chin. J. Org. Chem.* **2013**, *33*, 2046 (in Chinese).
(戴小军, 许孝良, 李小年, 有机化学, **2013**, *33*, 2046.)
(b) Xie, J.; Jin, H.; Xu, P.; Zhu, C. *Tetrahedron Lett.* **2014**, *55*, 36.
(c) Prier, C. K.; Rankic, D. A.; MacMillan, D. W. C. *Chem. Rev.* **2013**, *113*, 5322.
(d) Schultz, D. M.; Yoon, T. P. *Science* **2014**, *343*, 1239176.
(e) Xuan, J.; Zhang, Z. G.; Xiao, W. J. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2015**, *54*, 15632.
(f) Lang, X.; Zhao, J.; Chen, X.; *Chem. Soc. Rev.* **2016**, *45*, 3026.
(g) Chen, J. R.; Hu, X. Q.; Lu, L. Q.; Xiao, W. J. *Chem. Soc. Rev.* **2016**, *45*, 2044.
(h) Wu, J.; Li, J.; Li, H.; Zhu, C. *Chin. J. Org. Chem.* **2017**, *37*, 2203 (in Chinese).
(吴江, 李嘉雯, 李昊, 朱纯银, 有机化学, **2017**, *37*, 2203.)
(j) Bai, Q. F.; Jin, C.; He, J. Y.; Feng, G. *Org. Lett.* **2018**, *20*, 2172.
- [9] (a) Xie, J.; Jin, H.; Hashmi, A. S. K. *Chem. Soc. Rev.* **2017**, *46*, 5193.
(b) Wang, C. S.; Dixneuf, P. H.; Soulé, J. F. *Chem. Rev.* **2018**, *118*, 7532.
(c) Pei, P.; Zhang, F.; Yi, H.; Lei, A. *Acta Chim. Sinica* **2017**, *75*, 15 (in Chinese).
(裴朋昆, 张凡, 易红, 雷爱文, 化学学报, **2017**, *75*, 15.)
- [10] (a) Guo, W.; Lu, L. Q.; Wang, Y.; Wang, Y. N.; Chen, J. R.; Xiao, W. J. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2015**, *54*, 2265.
(b) Wang, D.; Zhang, L.; Luo, S. *Chin. J. Chem.* **2018**, *36*, 311.
(c) Feng, J.; Li, B.; Jiang, J.; Zhang, M.; Ouyang, W.; Li, C.; Fu, Y.; Gu, Z. *Chin. J. Chem.* **2018**, *36*, 11.
- [11] (a) Kwon, S. J.; Kim, D. Y. *Org. Lett.* **2016**, *18*, 4562.
(b) Xue, D.; Jia, Z. H.; Zhao, C. J.; Zhang, Y. Y.; Wang, C.; Xiao, J. *Chem.-Eur. J.* **2014**, *20*, 2960.
(c) Wassmundt, F. W.; Kiesman, W. F. J. *Org. Chem.* **1996**, *60*, 196.
(d) Cano-Yelo, H.; Deronzier, A. *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2* **1984**, 1093.
- [12] (a) Lee, J. C.; Yuk, J. Y.; Cho, S. H. *Synth. Commun.* **1995**, *25*, 1367.
(b) Maiorana, S.; Baldoli, C.; Licandro, E.; Casiraghi, L.; de Magistris, E.; Paio, A.; Provera, S.; Seneci, P. *Tetrahedron Lett.* **2000**, *41*, 7271.
(c) Schiemann, G.; Winkelmüller, W. *Org. Synth.* **1933**, 13.
(d) Broxton, T. J.; Bunnett, J. F.; Paik, C. H. *J. Org. Chem.* **1977**, *42*, 643.

(Lu, Y.)