高价碘试剂介导的 8-氨基喹啉 C(5)位碳-氢键亲核氟化反应

陈倩雯[†] 杨耀成[†] 王霞 张谦 李栋*

(湖北工业大学材料与化学工程学院 武汉 430068)

摘要 8-氨基喹啉的 C(5)位碳-氢键氟化反应近年来受到广泛关注, 但大多需要使用过渡金属催化剂和亲电氟化试剂来实现. 在高价碘试剂的介导下实现了无过渡金属催化条件下的 8-氨基喹啉 C(5)位碳-氢键亲核氟化反应. 使用廉价易得且安全稳定的氟化银作为亲核氟化试剂, 反应无需惰性气体保护, 条件简单, 操作方便, 区域选择性好, 底物范围较广, 为喹啉类化合物的氟化提供了一种有潜在应用价值的新方法.

关键词 高价碘; 8-氨基喹啉; 亲核氟化; 氟化银

Hypervalent Iodine Reagent-Mediated C(5) C—H Nucleophilic Fluorination of 8-Aminoquinolines

Chen, Qianwen[†] Yang, Yaocheng[†] Wang, Xia Zhang, Qian Li, Dong*

(College of Materials and Chemical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068)

Abstract The C(5) C—H fluorination of 8-aminoquinolines has attracted much attention recently. However, transition-metal catalyst and electrophilic fluorination reagents were required in most of these reactions. Transition-metal catalyst free C(5) C—H nucleophilic fluorination of 8-aminoquinolines was reviewed. This reaction was mediated by a hypervalent iodine reagent and employed cheap, safe and stable silver fluoride as the nucleophilic fluorination reagent. The reaction proceeded without inert gas protection. It possess the merits of simple and mild reaction conditions, easy operation, high regioselectivity and wide substrate scope and provides a novel method for fluorination of quinolines with potential application value.

Keywords hypervalent iodine; 8-aminoquinoline; nucleophilic fluorination; silver fluoride

喹啉及其衍生物是一类常见的含氮杂环芳香族化合物, 存在于很多天然产物中, 在药物、农药以及有机功能材料中均有重要的应用^[1]. 8-氨基喹啉还可作为有机配体或双齿导向基, 在很多有机合成反应尤其是过渡金属催化的碳-氢键活化反应中有广泛的应用^[2]. 因此, 研究喹啉类化合物的合成及其官能团化具有非常重要的意义. 通过对现有喹啉母体结构的碳-氢键活化/官能团化来构建单取代及多取代喹啉无疑是方便快捷制备喹啉类衍生物的一种方法. 近些年来, 已有较多课题组报道了喹啉的 C(2)、C(3)、C(4)和 C(8)位官能团化的例子^[3]. 自从 2013 年 Stahl 课题组^[4]首次报道铜催化的 8-氨基喹啉 C(5)位氟化反应以来, 喹啉的 C(5)位选择性碳-氢键活化/官能团化也开始受到大量关注, 并取得了

一定的进展^[5].

向有机化合物中引入氟原子有非常重要的意义, 因为含氟有机化合物通常有独特的性质, 在医药、农药、功能材料以及正电子发射断层扫描(PET)示踪剂等方面均有着广泛且重要的应用^[6]. 在过去的十多年中, 有机化合物的氟化方法得到了很大发展, 大量的氟化反应尤其是过渡金属催化的碳-氢键的直接氟化被开发出来^[7]. 近年来也有课题组报道了 8-氨基喹啉 C(5)位碳-氢键氟化的方法. 些方法大致可以分为两类: 第一类为过渡金属催化法(Scheme 1), Li 和 Liu 课题组^[8]分别报道了在过渡金属镍或铜催化下, 通过亲电氟化试剂[N-氟代双苯磺酰胺(NFSI)或 Selectfluor]进行氟化. 但是过渡金属催化剂通常价格较高, 有毒性, 可能在产物中造成金属残

* Corresponding author. E-mail: dongli@mail.hbut.edu.cn

Received July 28, 2019; revised September 19, 2019; published online October 12, 2019.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21702054) and the Innovation and Entrepreneurship Training Program (No. 201610500005).

国家自然科学基金(No. 21702054)和大学生创新创业训练计划(No. 201610500005)资助项目.

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

留. 第二类即为无过渡金属催化的亲电氟化法(Scheme 1), Li 和 Wang 课题组^[9]报道了使用 Selectfluor 直接对 8-氨基喹啉进行选择性的 C(5)位碳-氢键氟化. 然而这些反应中均需使用亲电氟化试剂(F^+ 试剂), 而此类试剂通常制备不易, 价格较高, 且原子经济性低^[10]. 若能使用亲核氟化试剂(F^- 试剂)如 HF 或无机金属氟化物进行氟化, 操作更为简便, 成本更为低廉, 原子经济性也更高^[11].

图式 1 8-氨基喹啉 C(5)位碳-氢键氟化

Scheme 1 C(5) C-H fluorination of 8-aminoquinolines

我们课题组近年来一直关注 8-氨基喹啉类化合物的碳-氢键官能团化反应, 2016 年我们^[12]首次报道了无过渡金属条件下, 使用廉价易得稳定的金属卤盐为亲核卤化试剂, 在氧化剂单过硫酸氢钾(Oxone)作用下对 8-氨基喹啉的 C(5)位碳-氢键进行亲核卤化(氯和溴)反应. 随后一些课题组报道了类似的氧化亲核卤化反应, 大多使用过硫酸盐($K_2S_2O_8$ 或 Oxone)为氧化剂^[13]. 有机高价碘特别是三价碘试剂作为一种温和且高选择性的氧化剂, 在有机合成化学中得到了越来越多的关注^[14]. 此类试剂具有易于制备、安全稳定、毒性低和环境友好等优点, 且可进行固载后回收反复使用, 符合绿色化学的理念^[15]. 2013 年 Li 课题组^[16]在高价碘试剂介导下使用氢氟酸吡啶(HF·py)实现了苯胺类化合物对位碳-氢键氟化反应. 2016 年, 我们课题组^[17]首次报道了高价碘试剂介导的 8-氨基喹啉 C(5)位碳-氢键胺化和磺酰化反应, 发现高价碘试剂也能有效地活化 8-氨基喹啉类底物. 因此我们设想开发高价碘试剂介导的使用亲核氟化试剂的 8-氨基喹啉 C(5)位碳-氢键氟化反应(Scheme 1).

1 结果与讨论

1.1 反应条件优化

亲核氟化试剂中, HF、HF-吡啶(或三乙胺)络合物和四丁基氟化铵(TBAF)等价格便宜, 但大多腐蚀性强, 不能在玻璃容器中使用, 且对水非常敏感. 无机金属氟化物如 AgF、CsF、KF 和 NaF 等更加安全稳定, 且来源广泛, 是更理想的氟化试剂. 首先选择 AgF 为氟化试剂, 开始初步尝试(表 1). 选取 8-苯甲酰氨基喹啉(**1a**)作为反应底物, 在 2 equiv. PhI(OAc)₂ 作用下, 在二氯乙烷(DCE)溶液中, 100 °C 下反应 8 h 后, 目标产物 5-氟-8-苯

甲酰氨基喹啉(**2a**)的产率为 20%(表 1, Entry 1). 随后尝试了其他的高价碘试剂如 PhI(OCOPh)₂、PhI(OCOCF₃)₂ 和 PhI(OPiv)₂, 当使用 PhI(OCOPh)₂ 和 PhI(OCOCF₃)₂ 时反应产率均有所降低; 而使用 PhI(OPiv)₂ 时, 反应产率提高至 23% (Entries 2~4). 而其他氧化剂 Oxone、K₂S₂O₈ 和过氧化叔丁醇(TBHP)在此反应中均不起作用(Entries 5~7). 因此确定最佳氧化剂为 PhI(OPiv)₂, 然后在 PhI(OPiv)₂ 作用下尝试了其他亲核氟化试剂. 无机氟盐 CsF、KF 和 TBAF 均未起反应, HF-三乙胺只有微量的氟化产物生成, HF-吡啶的效果好于 HF-三乙胺, 但仍不如 AgF (Entries 8~12). 接下来, 继续使用 AgF 为氟化试剂对反应溶剂进行了筛选. 反应在二甲醚(DME)和乙腈中均能进行但产率大大降低, 在甲苯溶液中反应产率升高至 32%, 但是副反应增多. 因此使用甲苯和 DCE 的混合溶剂(体积比为 1:1), 产率提高至 41% (Entries 13~16). 随后对氧化剂和氟化试剂的用量进行了优化. 当降低 PhI(OPiv)₂ 用量到 1.5 equiv. 时产率下降为 20%, 当使用 3 equiv. 的 PhI(OPiv)₂ 时反应的产率仍然下降到 34%, 并且检测到了 5 位酯化的副产物, 故确定最佳的氧化剂用量为 2 equiv. (Entries 17, 18). 接下来优化氟化试剂的用量, 降低 AgF 的用量到 1.5 equiv. 时, 只能得到 25% 的产物; 而增加 AgF 至 4 equiv. 时产率下降至 30%, 并且通过气相色谱检测发现有 5 位和 7 位双氟化的产物, 因此最后确定 AgF 的用量为 2 equiv. (Entries 19, 20). 在对反应温度和时间进行优化后, 选定最优反应条件为: 0.2 mmol 反应底物, 2 equiv. 氧化剂 PhI(OPiv)₂, 2.0 equiv. AgF, 在 2 mL 甲苯/DCE(体积比为 1:1)溶剂中, 100 °C 反应 8 h.

1.2 底物范围扩展

确定了最优反应条件后, 对该反应的底物适用范围进行了研究, 结果如表 2 所示. 合成了一系列芳甲酰以及脂肪酰 8-氨基喹啉衍生物, 考察不同酰基取代的底物的反应情况. 结果显示, 许多不同芳香甲酰取代的 8-氨基喹啉类底物都可得到中等收率的氟化产物(**2b**~**2n**). 不管苯甲酰基苯环上带有吸电子基团还是给电子基团, 包括三氟甲基、卤素(氟、氯、溴)或甲基等, 反应均给出差不多的产率, 没有明显的变化规律, 说明该反应受到苯甲酰基电子效应的影响较小. 苯甲酰基苯环对位(**2b**~**2f**)和间位(**2g**~**2i**)含有不同取代基时, 也都能得到中等收率的产物. 而邻位取代的苯甲酰 8-氨基喹啉底物(**2j**~**2m**)中, 除了体积较小的氟代底物(**2k**)之外, 其他产率均有所下降, 位阻较大的 2,4,6-三甲基苯甲酰-8-氨基喹啉(**2n**)只给出 26% 的产率, 表明酰基的邻位空间位阻效应对氟化反应略有影响. 而强吸电子的五氟苯甲酰

表 1 反应条件优化^a

Table 1 Optimization of the Reaction Conditions

Entry	F ⁻ (equiv.)	Oxidant (equiv.)	Solvent	Yield ^b /%	Entry	F ⁻ (equiv.)	Oxidant (equiv.)	Solvent (V : V)	Yield ^b /%
1	AgF (2)	PhI(OAc) ₂ (2)	DCE	20	11	3HF·Et ₃ N (2)	PhI(OPiv) ₂ (2)	DCE	3
2	AgF (2)	PhI(OCOPh) ₂ (2)	DCE	18	12	HF·py (2)	PhI(OPiv) ₂ (2)	DCE	17
3	AgF (2)	PhI(OCOCF ₃) ₂ (2)	DCE	17	13	AgF (2)	PhI(OPiv) ₂ (2)	DME	11
4	AgF (2)	PhI(OPiv) ₂ (2)	DCE	23	14	AgF (2)	PhI(OPiv) ₂ (2)	CH ₃ CN	15
5	AgF (2)	Oxone (2)	DCE	0	15	AgF (2)	PhI(OPiv) ₂ (2)	Toluene	32
6	AgF (2)	K ₂ S ₂ O ₈ (2)	DCE	0	16	AgF (2)	PhI(OPiv) ₂ (2)	Toluene/DCE (1 : 1)	41
7	AgF (2)	TBHP (2)	DCE	0	17	AgF (2)	PhI(OPiv) ₂ (1.5)	Toluene/DCE (1 : 1)	25
8	CsF (2)	PhI(OPiv) ₂ (2)	DCE	0	18	AgF (2)	PhI(OPiv) ₂ (3)	Toluene/DCE (1 : 1)	34
9	KF (2)	PhI(OPiv) ₂ (2)	DCE	0	19	AgF (1.5)	PhI(OPiv) ₂ (2)	Toluene/DCE (1 : 1)	25
10	TBAF (2)	PhI(OPiv) ₂ (2)	DCE	0	20	AgF (4)	PhI(OPiv) ₂ (2)	Toluene/DCE (1 : 1)	30

^a Reaction conditions: **1a** (0.2 mmol), F⁻ (0.4 mmol), oxidant (0.4 mmol) in solvent (2.0 mL) stirring under air for 8 h. ^b Isolated yields.

表 2 8-氨基喹啉的底物范围^a

Table 2 Substrate scope of 8-aminoquinolines

Entry	R ¹	R ²	2	Yield ^b /%
1	C ₆ H ₅	H	2a	41
2	4-CF ₃ C ₆ H ₄	H	2b	38
3	4-BrC ₆ H ₄	H	2c	24
4	4-FC ₆ H ₄	H	2d	30
5	4-ClC ₆ H ₄	H	2e	50
6	4-CH ₃ C ₆ H ₄	H	2f	33
7	3-CH ₃ C ₆ H ₄	H	2g	38
8	3-ClC ₆ H ₄	H	2h	33
9	3-FC ₆ H ₄	H	2i	40
10	2-CH ₃ C ₆ H ₄	H	2j	30
11	2-FC ₆ H ₄	H	2k	45
12	2-BrC ₆ H ₄	H	2l	26
13	2-ClC ₆ H ₄	H	2m	27
14	2,4,6-(CH ₃) ₃ C ₆ H ₂	H	2n	26
15	C ₆ F ₅	H	2o	35
16	CH ₃ CH ₂	H	2p	34
17	(CH ₃) ₃ C	H	2q	26
18	Cyclohexyl	H	2r	29
19	C ₆ H ₅	2-CH ₃	2s	32
20	CH ₃ CH ₂	6-OCH ₃	2t	24

^a Reaction conditions: **1** (0.2 mmol), AgF (0.4 mmol), PhI(OPiv)₂ (0.4 mmol) in toluene/DCE (V : V = 1 : 1, 2.0 mL) stirring at 100 °C for 8 h. ^b Isolated yields.

8-氨基喹啉对该反应仍具有不错的适应性(**2o**), 同样地可以得到中等收率的氟化产物. 同时考察了脂肪酰取代的 8-氨基喹啉[如丙酰-8-氨基喹啉(**2p**)、特戊酰-8-氨基喹啉(**2q**)、环己甲酰-8-氨基喹啉(**2r**)]和喹啉环上不同位

置带有取代基的 8-苯甲酰胺-2-甲基喹啉(**2s**)及 8-丙酰胺-6-甲氧基喹啉(**2t**)的反应活性, 也能在此条件下得到相应的目标产物.

1.3 反应机理探究

基于前期的研究, 高价碘介导的此类反应可能经历自由基历程, 进行了自由基抑制实验来验证此猜想 (Scheme 2). 在两组标准底物 **1a** 的反应中, 分别加入 2 equiv. 的自由基抑制剂 2,2,6,6-四甲基哌啶氮氧化物 (TEMPO)和 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(BHT), 虽未捕获到自由基中间体, 但均使得氟化反应完全不发生. 而当以质子捕获剂 4-二甲氨基吡啶(DMAP)为添加剂时, 则能得到 30%收率的目标产物, 由此可以推断该氟化反应是自由基历程. 为了进一步探究反应底物结构在此反应中的必要性, 探究了几种含有类似结构的底物. 发现 8-氨基喹啉、2-吡啶甲酰-1-萘胺、*N*-甲基-*N*-(8-喹啉基)苯甲酰胺和 *N*-(8-(5-溴-喹啉基))苯甲酰胺这四种化合物在同样的条件下均不能得到氟化产物(图 1).

图式 2 控制实验

Scheme 2 Control experiments

图1 未反应底物
Figure 1 Unreacted substrates

基于以上反应和已有的相关报道^[17], 推测了如下反应机理(Scheme 3): 首先 8-氨基喹啉(**1**)与高价碘试剂通过单电子转移(SET)作用生成正离子自由基中间体 **A**, 高价碘试剂转化为相应的碘自由基。中间体 **A** 随后在该碘自由基作用下发生氢原子转移(HAT)转化为正离子中间体 **B**, 该中间体去芳构化, 苯环与酰胺氮原子以双键相连, 正离子迁移至 C(5)位, 说明了 8-酰胺基团对 C(5)位选择性的必要性。接下来体系中的氟负离子与中间体 **B** 作用生成氟化中间体 **C**, 该中间体很快重新芳构化, 得到喹啉环 5 位氟化的产物 **2**。

图式3 可能的反应机理
Scheme 3 Possible reaction mechanism

2 结论

报道了一种高价碘试剂介导的 8-氨基喹啉 C(5)位碳-氢键的亲核氟化反应。反应不需要过渡金属的参与, 使用廉价易得且安全稳定的无机物 AgF 作氟化试剂。该反应无需惰性气体保护, 条件简单, 操作方便。虽然产率不高, 但区域选择性好, 底物范围较广。机理研究推测其可能经历自由基中间体的反应历程。该反应首次实现了无过渡金属催化条件下的 8-氨基喹啉亲核氟化反应, 为喹啉类化合物的氟化提供了一种有潜在应用价值的新方法, 也可能为其他化合物的氟化反应提供新的思路。此外, 所得酰胺还可转化为其他含氮化合物^[18]。

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

气相色谱由岛津 GC-2018 气相色谱仪测定。核磁共振

波谱 ^1H NMR (400 MHz), ^{13}C NMR (100 MHz) 和 ^{19}F NMR (376 MHz) 由 Bruker DPX-400 超导核磁共振波谱仪测定, 以 TMS 为内标。熔点由 SGW X-4A 数字化显微熔点仪测定。高分辨质谱由 Q Exactive LC/HRMS 质谱仪测定。制备薄层层析板和柱层析所用 GF254 薄层硅胶由青岛海洋化工厂生产。所有溶剂和实验药品均为市售分析纯或化学纯试剂, 未经进一步纯化直接使用。所有反应物 **1** 均按文献^[17]方法合成。

3.2 实验方法

在微量反应管中, 加入搅拌磁子, 按先后顺序加入 8-酰胺基喹啉(**1**, 0.2 mmol)、AgF (0.4 mmol)、PhI(OPiv)₂ (0.4 mmol)、甲苯 (1 mL) 和 1,2-二氯乙烷 (1 mL), 在 100 °C 下反应 8 h。反应结束后, 加入 2 mL 水, 反应液用乙酸乙酯 (15 mL $\times$ 3) 和水 (20 mL $\times$ 3) 洗。收集有机相, 用无水硫酸钠干燥后过滤。将滤液于旋转蒸发器中旋干, 使用柱层析分离 (乙酸乙酯/石油醚, $V:V=1:20$) 即可得到产物 **2**。

5-氟-8-苯甲酰氨基-喹啉(**2a**)^[8,9]: 白色固体。m.p. 133~135 °C (lit.^[9b]: 133~134 °C); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.26~7.30 (m, 1H), 7.54~7.62 (m, 4H), 8.07~8.09 (m, 2H), 8.46 (d, $J=8.44$ Hz, 1H), 8.89~8.92 (m, 2H), 10.55 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.4 (d, $J=19.70$ Hz), 116.00 (d, $J=7.20$ Hz), 118.73 (d, $J=18.20$ Hz), 121.77 (d, $J=18.20$ Hz), 127.24, 128.83, 129.87 (d, $J=3.64$ Hz), 131.07 (d, $J=4.13$ Hz), 131.91, 134.97, 138.94 (d, $J=3.00$ Hz), 149.14, 151.76 (d, $J=252.21$ Hz), 165.38; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -128.92。

5-氟-8-(4-三氟甲基苯甲酰)氨基-喹啉(**2b**): 白色固体。m.p. 141~143 °C (lit.^[9b]: 140~141 °C); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.28~7.33 (m, 1H), 7.56~7.58 (m, 1H), 8.16~8.18 (m, 2H), 7.81~7.83 (m, 2H), 8.47~8.49 (m, 1H), 8.86~8.90 (m, 2H), 10.57 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.42 (d, $J=20.57$ Hz), 116.32 (d, $J=118.8$ Hz), 121.89 (d, $J=2.5$ Hz), 125.89 (d, $J=3.75$ Hz), 127.72, 129.27, 129.96 (d, $J=1.75$ Hz), 130.68 (d, $J=4.1$ Hz), 135.06, 138.28 (d, $J=0.98$ Hz), 138.96 (d, $J=3.22$ Hz), 149.30, 152.07 (d, $J=252.5$ Hz), 163.94; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -62.95, -128.12。

5-氟-8-(4-溴苯甲酰)氨基-喹啉(**2c**)^[8b,9b]: 白色固体。m.p. 193~195 °C (lit.^[9b]: 193~194 °C); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.24~7.28 (m, 1H), 7.54~7.57 (m, 1H), 7.67~7.69 (m, 2H), 7.92~7.94 (m, 2H), 8.45 (dd, $J=8.44$ Hz, 1H), 8.83~8.90 (m, 2H), 10.49 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.43 (d, $J=18.40$ Hz), 116.15 (d,

$J=7.76$ Hz), 118.77 (d, $J=2.5$ Hz), 126.68, 128.84, 129.92 (d, $J=3.75$ Hz), 130.85 (d, $J=4.12$ Hz), 132.08, 133.85, 138.93 (d, $J=3.15$ Hz), 149.21, 151.91 (d, $J=252.65$ Hz), 164.31; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -128.53.

5-氟-8-(4-氟苯甲酰)氨基-喹啉(**2d**)^[8b]: 白色固体. m.p. 116~118 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.21~7.27 (m, 3H), 7.55~7.58 (m, 1H), 8.06~8.10 (m, 2H), 8.45 (d, $J=8.44$ Hz, 1H), 8.84~8.91 (m, 2H), 10.48 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.43 (d, $J=19.77$ Hz), 115.79 (d, $J=22.06$ Hz), 116.06 (d, $J=7.60$ Hz), 121.79 (d, $J=2.59$ Hz), 129.58 (d, $J=9.04$ Hz), 129.92 (d, $J=3.68$ Hz), 130.97 (d, $J=4.10$ Hz), 131.19 (d, $J=3.19$ Hz), 138.95 (d, $J=3.21$ Hz), 149.17, 151.85 (d, $J=252.61$ Hz), 163.79, 164.25, 166.29; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -107.54, -128.80.

5-氟-8-(4-氯苯甲酰)氨基-喹啉(**2e**)^[8,9]: 白色固体. m.p. 145~147 °C (lit.^[9b]: 145~146 °C); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.23~7.26 (m, 1H), 7.50~7.57 (m, 3H), 7.99~8.01 (m, 2H), 8.44~8.47 (m, 1H), 8.83~8.90 (m, 2H), 10.48 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.42 (d, $J=19.79$ Hz), 116.12 (d, $J=7.74$ Hz), 118.76 (d, $J=18.30$ Hz), 121.81 (d, $J=2.59$ Hz), 128.67, 129.09, 129.91 (d, $J=3.66$ Hz), 130.86 (d, $J=4.10$ Hz), 133.38, 138.20, 138.93 (d, $J=3.14$ Hz), 149.20, 151.90 (d, $J=252.5$ Hz), 164.19; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -128.57.

5-氟-8-(4-甲基苯甲酰)氨基-喹啉(**2f**)^[8,9]: 白色固体. m.p. 134~136 °C (lit.^[9b]: 135~137 °C); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 2.45 (s, 3H), 7.24~7.26 (m, 1H), 7.33~7.35 (m, 2H), 7.52~7.56 (m, 1H), 7.95~7.97 (m, 2H), 8.44~8.46 (m, 1H), 8.67~8.90 (m, 2H), 10.50 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 21.54, 110.44 (d, $J=19.66$ Hz), 115.94 (d, $J=7.69$ Hz), 118.75 (d, $J=18.25$ Hz), 121.70 (d, $J=2.62$ Hz), 127.26, 129.49, 129.82 (d, $J=3.68$ Hz), 131.24 (d, $J=4.07$ Hz), 132.22, 138.99 (d, $J=3.10$ Hz), 142.41, 151.70 (d, $J=252.07$ Hz), 165.35; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -129.27.

5-氟-8-(3-甲基苯甲酰)氨基-喹啉(**2g**)^[8b]: 白色固体. m.p. 78~80 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 2.48 (s, 3H), 7.24~7.26 (m, 1H), 7.38~7.43 (m, 2H), 7.52~7.55 (m, 1H), 7.83~7.86 (m, 2H), 8.43~8.46 (m, 1H), 8.87~8.91 (m, 2H), 10.49 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 21.49, 110.42 (d, $J=19.70$ Hz), 116.03 (d, $J=7.69$ Hz), 118.74 (d, $J=18.26$ Hz), 121.71 (d, $J=2.59$ Hz), 124.17, 128.02, 128.68, 129.82 (d, $J=3.67$ Hz), 131.19 (d, $J=9.84$

Hz), 132.66, 135.03, 138.99 (d, $J=3.09$ Hz), 149.13, 151.75 (d, $J=252.08$ Hz), 165.59; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -129.09.

5-氟-8-(3-氯苯甲酰)氨基-喹啉(**2h**)^[8b]: 白色固体. m.p. 82~84 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.24~7.28 (m, 1H), 7.46~7.50 (m, 1H), 7.54~7.57 (m, 2H), 7.91~7.94 (m, 1H), 8.03~8.04 (m, 1H), 8.45~8.47 (m, 1H), 8.84~8.87 (m, 1H), 8.90~8.92 (m, 1H), 10.47 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.40 (d, $J=19.80$ Hz), 116.24 (d, $J=7.76$ Hz), 118.76 (d, $J=18.32$ Hz), 121.84 (d, $J=2.58$ Hz), 125.22, 127.67, 129.91 (d, $J=3.68$ Hz), 130.11, 130.78 (d, $J=4.07$ Hz), 131.93, 135.08, 136.80, 138.94 (d, $J=3.22$ Hz), 149.26, 151.97 (d, $J=252.71$ Hz), 163.89; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -128.38.

5-氟-8-(3-氟苯甲酰)氨基-喹啉(**2i**): 白色固体. m.p. 88~92 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.27~7.33 (m, 2H), 7.52~7.58 (m, 2H), 7.76~7.85 (m, 2H), 8.45~8.48 (m, 1H), 8.55~8.92 (m, 2H), 10.51 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.42 (d, $J=19.80$ Hz), 114.55 (d, $J=23.05$ Hz), 116.21 (d, $J=7.09$ Hz), 118.81 (d, $J=21.44$ Hz), 121.84 (d, $J=2.62$ Hz), 122.68 (d, $J=3.08$ Hz), 129.25, 129.92 (d, $J=3.16$ Hz), 130.46 (d, $J=7.93$ Hz), 130.81 (d, $J=4.19$ Hz), 138.96 (d, $J=3.17$ Hz), 149.25 (d, $J=3.16$ Hz), 151.96 (d, $J=252.7$ Hz), 161.75, 163.94 (d, $J=2.52$ Hz), 164.21; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -111.47, -128.49. HRMS-ESI calcd for $\text{C}_{16}\text{H}_{11}\text{F}_2\text{N}_2\text{O}$ ($\text{M}+\text{H}^+$) 285.0834, found 285.0839.

5-氟-8-(2-甲基苯甲酰)氨基-喹啉(**2j**)^[8,9a]: 白色固体. m.p. 119~121 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 2.60 (s, 3H), 7.24~7.27 (m, 1H), 7.29~7.34 (m, 2H), 7.39~7.41 (m, 1H), 7.51~7.54 (m, 1H), 7.66~7.68 (m, 1H), 8.82~8.83 (m, 1H), 8.88~8.91 (m, 1H), 10.00 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 20.19, 110.37 (d, $J=19.67$ Hz), 116.01 (d, $J=7.73$ Hz), 118.75 (d, $J=18.14$ Hz), 121.7 (d, $J=2.62$ Hz), 126.04, 127.23, 129.79 (d, $J=3.70$ Hz), 130.38, 131.28 (d, $J=4.04$ Hz), 131.41, 136.52, 136.71, 138.87 (d, $J=3.08$ Hz), 149.12, 151.83 (d, $J=252.30$ Hz), 168.06; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -129.27.

5-氟-8-(2-氟苯甲酰)氨基-喹啉(**2k**): 白色固体. m.p. 121~123 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.23~7.29 (m, 2H), 7.32~7.36 (m, 1H), 7.53~7.58 (m, 2H), 8.20~8.25 (m, 1H), 8.45~8.27 (m, 1H), 8.92~8.96 (m, 2H), 10.99~11.02 (m, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.34 (d, $J=19.68$ Hz), 116.23 (d, $J=24.62$ Hz), 116.77

(d, $J=7.61$ Hz), 118.72 (d, $J=18.25$ Hz), 121.75 (d, $J=2.57$ Hz), 121.87 (d, $J=11.60$ Hz), 124.90 (d, $J=3.36$ Hz), 129.71 (d, $J=3.73$ Hz), 131.38 (d, $J=3.90$ Hz), 132.04 (d, $J=1.99$ Hz), 133.60 (d, $J=9.13$ Hz), 149.35, 152.01 (d, $J=252.59$ Hz), 159.36, 161.49 (d, $J=3.16$ Hz), 161.83; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -112.20 , -128.65 ; HRMS-ESI calcd for $\text{C}_{16}\text{H}_{11}\text{F}_2\text{N}_2\text{O}$ ($\text{M}+\text{H}^+$) 285.0834, found 285.0837.

5-氟-8-(2-溴苯甲酰)氨基-喹啉(**2l**)^[9a]: 白色固体. m.p. 129~131 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.24~7.29 (m, 1H), 7.40~7.45 (m, 2H), 7.49~7.54 (m, 2H), 7.81~7.82 (m, 1H), 8.43~8.45 (m, 1H), 8.83~8.92 (m, 2H), 10.32 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.35 (d, $J=19.80$ Hz), 116.46 (d, $J=7.79$ Hz), 118.72 (d, $J=18.16$ Hz), 121.77 (d, $J=2.57$ Hz), 127.19, 129.76 (d, $J=3.68$ Hz), 130.15, 130.55, 130.97 (d, $J=4.10$ Hz), 131.16, 131.60, 135.64, 138.93 (d, $J=3.14$ Hz), 149.24, 152.03 (d, $J=252.80$ Hz), 164.72; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -128.32 .

5-氟-8-(2-氯苯甲酰)氨基-喹啉(**2m**)^[8,9a]: 白色固体. m.p. 146~148 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.25~7.37 (m, 3H), 7.43~7.46 (m, 1H), 7.51~7.54 (m, 1H), 7.68~7.72 (m, 2H), 8.44~8.46 (m, 1H), 8.83~8.92 (m, 2H), 10.11 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.37 (d, $J=19.78$ Hz), 116.44 (d, $J=7.82$ Hz), 118.75 (d, $J=18.25$ Hz), 121.79 (d, $J=2.59$ Hz), 127.69, 129.61, 129.80 (d, $J=3.69$ Hz), 129.97, 130.86 (d, $J=4.13$ Hz), 131.57, 133.72, 138.19, 138.89 (d, $J=3.12$ Hz), 149.23, 152.05 (d, $J=253.16$ Hz), 165.77; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -128.27 .

5-氟-8-(2,4,6-三甲基苯甲酰)氨基-喹啉(**2n**): 白色固体. m.p. 133~135 °C (lit.^[31]: 82~83 °C); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 2.33 (s, 3H), 2.39 (s, 6H), 6.93 (m, 2H), 7.25~7.27 (m, 1H), 7.49~7.52 (m, 1H), 8.43 (d, $J=8.44$ Hz, 1H), 8.77 (d, $J=4.24$ Hz, 1H), 8.92~8.95 (m, 1H), 9.72 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 19.40, 21.15, 110.35 (d, $J=19.75$ Hz), 116.20 (d, $J=7.76$ Hz), 118.74 (d, $J=18.17$ Hz), 121.67 (d, $J=2.60$ Hz), 128.46, 129.25, 129.75 (d, $J=3.75$ Hz), 131.03 (d, $J=4.10$ Hz), 134.56, 135.25, 135.86, 149.10, 151.87 (d, $J=252.38$ Hz), 168.98; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -128.86 ; HRMS-ESI calcd for $\text{C}_{19}\text{H}_{18}\text{FN}_2\text{O}$ ($\text{M}+\text{H}^+$) 309.1403, found 309.1402.

5-氟-8-(五氟苯甲酰)氨基-喹啉(**2o**)^[8b]: 白色固体. m.p. 134~136 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 7.26~

7.29 (m, 1H), 7.57~7.59 (m, 1H), 8.28~8.49 (m, 1H), 8.81~8.84 (m, 1H), 8.86~8.87 (m, 1H), 10.18 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 110.33 (d, $J=20.06$ Hz), 110.65 (m), 116.94 (d, $J=8.02$ Hz), 118.75 (d, $J=18.40$ Hz), 122.05 (m), 129.99 (m), 136.53 (m), 138.64 (m), 141.35 (m), 143.18 (m), 145.73 (m), 149.49, 152.53 (d, $J=254.10$ Hz), 155.23; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -126.81 , -139.87 (d, $J=19.20$ Hz), -149.98 (d, $J=20.90$ Hz), -159.64 (d, $J=2.60$ Hz).

5-氟-8-丙酰氨基-喹啉(**2p**): 白色固体. m.p. 71~73 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 1.32~1.36 (m, 3H), 2.56~2.63 (m, 2H), 7.12~7.27 (m, 1H), 7.49~7.53 (m, 1H), 8.41 (dd, $J=8.44$, 1.64 Hz, 1H), 8.71~8.85 (m, 2H), 9.62 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 9.75, 31.16, 110.43 (d, $J=19.41$ Hz), 115.85 (d, $J=7.56$ Hz), 118.71 (d, $J=17.98$ Hz), 127.44, 129.78 (d, $J=3.68$ Hz), 131.09 (d, $J=3.96$ Hz), 136.37, 148.94, 152.74 (d, $J=249.10$ Hz), 172.35; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -129.57 ; HRMS-ESI calcd for $\text{C}_{12}\text{H}_{12}\text{FN}_2\text{O}$ ($\text{M}+\text{H}^+$) 219.0934, found 219.0935.

5-氟-8-特戊酰氨基-喹啉(**2q**)^[8,9]: 白色固体. m.p. 71~72 °C (lit.^[9b]: 71~72 °C); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 1.42 (s, 9H), 7.17~7.21 (m, 1H), 7.48~7.52 (m, 1H), 8.40 (dd, $J=8.42$, 1.38 Hz, 1H), 8.73~8.86 (m, 2H), 10.06 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 27.71, 40.26, 110.39 (d, $J=19.37$ Hz), 115.63 (d, $J=7.51$ Hz), 118.70 (d, $J=18.05$ Hz), 121.58 (d, $J=2.56$ Hz), 129.71 (d, $J=3.62$ Hz), 131.23 (d, $J=4.02$ Hz), 136.29, 149.04, 152.71 (d, $J=249.04$ Hz), 177.10; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -129.75 .

5-氟-8-环己甲酰氨基-喹啉(**2r**)^[8,9]: 白色固体. m.p. 113~115 °C (lit.^[9b]: 112~114 °C); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 1.25~1.41 (m, 3H), 1.61~1.67 (m, 3H), 1.86~1.90 (m, 2H), 2.06~2.09 (m, 2H), 2.42~2.50 (m, 1H), 7.18~7.22 (m, 1H), 7.50~7.53 (m, 1H), 8.41~8.44 (m, 1H), 8.72~8.76 (m, 1H), 8.85~8.69 (m, 1H), 9.69 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 25.76, 25.78, 29.96, 46.84, 110.35 (d, $J=19.58$ Hz), 115.85 (d, $J=7.62$ Hz), 118.65 (d, $J=18.13$ Hz), 121.85 (d, $J=2.55$ Hz), 129.77 (d, $J=3.79$ Hz), 131.19 (d, $J=4.01$ Hz), 138.70 (d, $J=3.01$ Hz), 148.94, 152.48 (d, $J=251.60$ Hz), 174.72; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -128.73 .

2-甲基-5-氟-8-苯甲酰氨基-喹啉(**2s**)^[8a,9]: 白色固体. m.p. 115~117 °C (lit.^[9b]: 115~116 °C); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 2.79 (s, 3H), 7.16~7.20 (m, 1H), 7.40~

7.42 (m, 1H), 7.56~7.57 (m, 3H), 8.05~8.07 (m, 2H), 8.31~8.33 (m, 1H), 10.58 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 25.50, 109.45 (d, $J=19.79$ Hz), 116.03 (d, $J=7.81$ Hz), 116.80 (d, $J=18.30$ Hz), 122.55 (d, $J=2.49$ Hz), 127.21, 128.84, 129.89 (d, $J=3.34$ Hz), 130.46 (d, $J=3.98$ Hz), 131.80, 135.22, 138.56 (d, $J=3.20$ Hz), 152.06 (d, $J=251.70$ Hz), 158.34, 165.21; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -129.20.

5-氟-6-甲氧基-8-苯甲酰氨基-喹啉(**2t**): 黄色固体. m.p. 87~89 °C; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 1.34 (t, $J=7.56$ Hz, 3H), 2.57~2.63 (m, 2H), 4.06 (s, 3H), 7.44~7.47 (m, 1H), 8.34 (dd, $J=8.48$, 1.48 Hz, 1H), 8.68 (dd, $J=4.14$, 1.54 Hz, 1H), 8.83 (d, $J=8.56$ Hz, 1H), 9.87 (s, 1H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 9.59, 31.12, 57.16, 105.88, 119.27 (d, $J=14.82$ Hz), 122.01 (d, $J=2.98$ Hz), 128.51 (d, $J=4.32$ Hz), 131.55 (d, $J=3.95$ Hz), 132.89 (d, $J=1.79$ Hz), 140.26 (d, $J=245.12$ Hz), 143.43 (d, $J=9.25$ Hz), 146.51, 172.55; ^{19}F NMR (376 MHz, CDCl_3) δ : -154.22; HRMS-ESI calcd for $\text{C}_{13}\text{H}_{14}\text{FN}_2\text{O}_2$ ($\text{M}+\text{H}^+$) 249.1039, found 249.1036.

辅助材料(Supporting Information) 详细的条件筛选实验数据和目标产物的 ^1H NMR, ^{13}C NMR 及 ^{19}F NMR 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) Colomb, J.; Becker, G.; Fieux, S.; Zimmer, L.; Billard, T. *J. Med. Chem.* **2014**, *57*, 3884.
(b) Vandekerckhove, S.; Tran, H. G.; Desmet, T.; D'hooghe, M. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2013**, *23*, 4641.
(c) Jiang, H.; Taggart, J. E.; Zhang, X. H. G.; Benbrook, D. M.; Lind, S. E.; Ding, W. Q. *Cancer Lett.* **2011**, *312*, 11.
(d) Solomon, V. R.; Lee, H. *Curr. Med. Chem.* **2011**, *18*, 1488.
(e) Tokoro, Y.; Nagai, A.; Kokado, K.; Chujo, Y. *Macromolecules* **2009**, *42*, 2988.
(f) Michael, J. P. *Nat. Prod. Rep.* **2008**, *25*, 166.
(g) Eicher, T.; Hauptmann, S.; Speicher, A. *The Chemistry of Heterocycles: Structures, Reactions, Synthesis, and Applications*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, **2013**.
(h) Katritzky, A. R.; Ramsden, C. A.; Scriven, E. F. V.; Taylor, R. J. K. *Comprehensive Heterocyclic Chemistry III*, Elsevier, Oxford, **2008**.
- [2] (a) Rouquet, G.; Chatani, N. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2013**, *52*, 11726.
(b) Corbet, M.; De Campo, F. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2013**, *52*, 9896.
(c) Chen, Z.; Wang, B.; Zhang, J.; Yu, W.; Liu, Z.; Zhang, Y. *Org. Chem. Front.* **2015**, *2*, 1107.
(d) Dargulic, O.; Roane, J.; Tran, L. D. *Acc. Chem. Res.* **2015**, *48*, 1053.
(e) Yadav, M. R.; Rit, R. K.; Shankar, M.; Sahoo, A. K. *Asian J. Org. Chem.* **2015**, *4*, 846.
(f) Liu, J.; Chen, G.; Tan, Z. *Adv. Synth. Catal.* **2016**, *358*, 1174.
(g) Rit, R. K.; Yadav, M. R.; Ghosh, K.; Sahoo, A. K. *Tetrahedron* **2015**, *71*, 4450.
(h) Zhang, B.; Guan, H.; Liu, B.; Shi, B. *Chin. J. Org. Chem.* **2014**, *34*, 1487 (in Chinese).
(张博, 管晗曦, 刘斌, 史炳锋, 有机化学, **2014**, *34*, 1487.)
(i) Zhang, W.; Zhang, J.; Liu, Y. *Chin. J. Org. Chem.* **2014**, *34*, 36 (in Chinese).
(张巍, 张家慧, 刘运奎, 有机化学, **2014**, *34*, 36.)
(j) Dou, Y.; Gu, X.; Jiang, J.; Zhu, Q. *Prog. Chem.* **2018**, *30*, 1317 (in Chinese).
(窦言东, 顾晓旭, 蒋建泽, 朱勃, 化学进展, **2018**, *30*, 1317.)
- [3] (a) Roger, J.; Gottumukkala, A. L.; Doucet, H. *ChemCatChem* **2010**, *2*, 20.
(b) Iwai, T.; Sawamura, M. *ACS Catal.* **2015**, *5*, 5031.
(c) Stephens, D. E.; Larionov, O. V. *Tetrahedron* **2015**, *71*, 8683.
- [4] Suess, A. M.; Ertem, M. Z.; Cramer, C. J.; Stahl, S. S. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 9797.
- [5] (a) Zhu, L.; Cao, X.; Li, Y.; Liu, T.; Wang, X.; Qiu, R.; Yin, S.-F. *Chin. J. Org. Chem.* **2017**, *37*, 1613 (in Chinese).
(朱龙志, 曹鑫, 李优, 刘婷, 王颢, 邱仁华, 尹双凤, 有机化学, **2017**, *37*, 1613.)
(b) Khan, B.; Dutta, H. S.; Koley, D. *Asian J. Org. Chem.* **2018**, *7*, 1270.
- [6] (a) Müller, K.; Faeh, C.; Diederich, F. *Science* **2007**, *317*, 1881.
(b) Purser, S.; Moore, P. R.; Swallow, S.; Gouverneur, V. *Chem. Soc. Rev.* **2008**, *37*, 320.
(c) Kirk, K. L. *Org. Process Res. Dev.* **2008**, *12*, 305.
(d) Berger, R.; Resnati, G.; Metrangola, P.; Weber, E.; Hulliger, J. *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 3496.
(e) Ametamey, S. M.; Honer, M.; Schubiger, P. A. *Chem. Rev.* **2008**, *108*, 1501.
(f) Walker, M. C.; Chang, M. C. Y. *Chem. Soc. Rev.* **2014**, *43*, 6527.
(g) Ni, C.; Hu, J. *Chem. Soc. Rev.* **2016**, *45*, 5441.
(h) Qing, F. L.; Qiu, X. L. *Organofluorine Chemistry*, Science Press, Beijing, **2007** (in Chinese).
(卿凤翎, 邱小龙, 有机氟化学, 科学出版社, 北京, **2007**.)
(i) Kirsch, P. *Modern Fluoroorganic Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & KGaA, Weinheim, **2013**.
- [7] (a) Furuya, T.; Kamlet, A. S.; Ritter, T. *Nature* **2011**, *473*, 470.
(b) Jin, Z.; Hammond, G. B.; Xu, B. *Aldrichim. Acta* **2012**, *45*, 67.
(c) Liang, T.; Neumann, C. N.; Ritter, T. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2013**, *52*, 8214.
(d) Campbell, M. G.; Ritter, T. *Chem. Rev.* **2015**, *115*, 612.
(e) Champagne, P. A.; Desroches, J.; Hamel, J.-D.; Vandamme, M.; Paquin, J.-F. *Chem. Rev.* **2015**, *115*, 9073.
(f) Lin, A.; Huehls, C. B.; Yang, J. *Org. Chem. Front.* **2014**, *1*, 434.
(g) Ma, J.-A.; Li, S. *Org. Chem. Front.* **2014**, *1*, 712.
(h) Li, Y.; Wu, Y.; Li, G.-S.; Wang, X.-S. *Adv. Synth. Catal.* **2014**, *356*, 1412.
(i) He, J.; Lou, S.; Xu, D. *Chin. J. Org. Chem.* **2016**, *36*, 1218 (in Chinese).
(何将旗, 娄绍杰, 许丹倩, 有机化学, **2016**, *36*, 1218.)
- [8] (a) Ding, J.; Zhang, Y.; Li, J. *Org. Chem. Front.* **2017**, *4*, 1528.
(b) Luo, S.-S.; Su, L.-J.; Jiang, Y.; Li, X.-B.; Li, Z.-H.; Sun, H.; Liu, J.-K. *Synlett* **2018**, *29*, 1525.
- [9] (a) Zhang, Y.; Wen, C.; Li, J. *Org. Biomol. Chem.* **2018**, *16*, 1912.
(b) Chen, H.; Li, P.; Wang, M.; Wang, L. *Eur. J. Org. Chem.* **2018**, 2091.
- [10] (a) Differding, E.; Ofner, H. *Synlett* **1991**, 187.
(b) Banks, R. E. *J. Fluorine Chem.* **1998**, *87*, 1.
- [11] (a) Hollingworth, C.; Gouverneur, V. *Chem. Commun.* **2012**, *48*, 2929.
(b) Ni, C.; Jiang, F.; Zeng, Y.; Hu, J. *J. Fluorine Chem.* **2015**, *179*, 3.
(c) Zeng, Y.; Hu, J. *Rep. Org. Chem.* **2015**, *5*, 19.
- [12] Wang, Y.; Wang, Y.; Jiang, K.; Zhang, Q.; Li, D. *Org. Biomol. Chem.* **2016**, *14*, 10180.
- [13] (a) Sen, C.; Sahoo, T.; Ghosh, S. C. *ChemistrySelect* **2017**, *2*, 2745.
(b) Jiao, J.-Y.; Mao, Y.-J.; Feng, A.-W.; Li, X.-F.; Li, M.-T.; Zhang,

- X.-H. *Tetrahedron* **2017**, 73, 1482.
- (c) Chen, X.-X.; Wang, J.-X.; Ren, J.-T.; Xie, H.; Zhao, Y.; Li, Y.-M.; Sun, M. *Synlett* **2017**, 28, 1840.
- (d) Qiao, L.; Cao, X.; Chai, K.; Shen, J.; Xu, J.; Zhang, P. *Tetrahedron Lett.* **2018**, 59, 2243.
- [14] (a) Zhdankin, V. V.; Stang, P. J. *Chem. Rev.* **2002**, 102, 2523.
(b) Wirth, T. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2005**, 44, 3656.
(c) Zhdankin, V. V.; Stang, P. J. *Chem. Rev.* **2008**, 108, 5299.
(d) Yusubov, M. S.; Zhdankin, V. V. *Curr. Org. Synth.* **2012**, 9, 247.
(e) Brown, M.; Farid, U.; Wirth, T. *Synlett* **2013**, 424.
(f) Zhdankin, V. V. *Hypervalent Iodine Chemistry*, John Wiley & Sons Ltd., New York, **2014**.
(g) Kita, Y.; Dohi, T. *Chem. Rec.* **2015**, 15, 886.
(h) Narayan, R.; Manna, S.; Antonchick, A. P. *Synlett* **2015**, 26, 1785.
(i) Muñiz, K. *Top. Curr. Chem.* **2016**, 373, 105.
(j) Yoshimura, A.; Zhdankin, V. V. *Chem. Rev.* **2016**, 116, 3328.
(k) Zhang, X.; Cong, Y.; Lin, G.; Guo, X.; Cao, Y.; Lei, K.; Du, Y. *Chin. J. Org. Chem.* **2016**, 36, 2513 (in Chinese).
(张翔, 丛颖, 林光宇, 郭旭亮, 曹阳, 雷坤华, 杜云飞, 有机化学, **2016**, 36, 2513.)
(l) Budhwan, R.; Yadav, S.; Murarka, S. *Org. Biomol. Chem.* **2019**, 17, 6326.
- [15] Duan, Y.; Jiang, S.; Han, Y.; Sun, B.; Zhang, C. *Chin. J. Org. Chem.* **2016**, 36, 1973 (in Chinese).
(段亚南, 姜山, 韩永超, 孙博, 张弛, 有机化学, **2016**, 36, 1973.)
- [16] Tian, T.; Zhong, W.; Meng, S.; Meng, X.; Li, Z. *J. Org. Chem.* **2013**, 78, 728.
- [17] (a) Wang, Y.; Wang, Y.; Guo, Z.; Zhang, Q.; Li, D. *Asian J. Org. Chem.* **2016**, 5, 1438.
(b) Wang, Y.; Wang, Y.; Zhang, Q.; Li, D. *Org. Chem. Front.* **2017**, 4, 514.
- [18] (a) Huang, P.-Q. *Acta Chim. Sinica* **2018**, 76, 357 (in Chinese).
(黄培强, 化学学报, **2018**, 76, 357.)
(b) Huang, Y.-H.; Wang, S.-R.; Wu, D.-P.; Huang, P.-Q. *Org. Lett.* **2019**, 21, 1681.
(c) Zheng, W.; Yang, W.; Luo, D.; Min, L.; Wang, X.; Hu, Y. *Adv. Synth. Catal.* **2019**, 361, 1995.
(d) Li, L.-H.; Niu, Z.-J.; Liang, Y.-M. *Chem.-Eur. J.* **2017**, 23, 15300.
(e) Ye, J.-L.; Zhu, Y.-N.; Geng, H.; Huang, P.-Q. *Sci. China, Chem.* **2018**, 61, 687.
(f) Gao, Y.-J.; Xiao, Z.-H.; Liu, L.-X.; Huang, P.-Q. *Chin. J. Org. Chem.* **2017**, 37, 1189 (in Chinese).
(高燕娇, 肖振华, 刘良先, 黄培强, 有机化学, **2017**, 37, 1189.)

(Zhao, C.)