丙酮参与偶联反应研究的新进展

沈旭茜 曹晰晗 郑万彬 杨 骏 史永森 胡金刚
吴香梅 严国兵*
(丽水学院化学系 丽水 323000)

摘要 丙酮是一种最简单的酮类化合物, 具有酮类的典型反应. 综述了近年来丙酮参与偶联反应的研究进展, 主要包括碳-碳、碳-杂的形成及其反应机理的探讨.

关键词 丙酮; 偶联反应; 反应机理

Recent Progress in the Research of Acetone in Coupling Reactions

Shen, Xuqian Cao, Xihan Zheng, Wanbin Yang, Jun Shi, Yongsen Hu, Jingang
Wu, Xiangmei Yan, Guobing*
(Department of Chemistry, Lishui University, Lishui 323000)

Abstract Acetone is the simplest ketone, which has the typical reaction of ketones. In this paper, the recent development centering the coupling reactions of acetone including the formation of carbon-carbon, carbon-heteroatom bonds and the discussion of reaction mechanism, is reviewed.

Keywords acetone; coupling reaction; reaction mechanism

丙酮是一种非常重要的有机化工原料, 广泛应用于化学工业生产. 一方面, 丙酮作为溶剂主要用于炸药、塑料、橡胶、纤维、制革、油脂、喷漆等行业; 另一方面, 它也作为合成环氧树脂、聚碳酸酯、甲基丙烯酸甲酯、聚异戊二烯橡胶等重要化工原料. 丙酮是一种最简单的酮类化合物, 具有酮的典型反应, 例如亲核-加成反应、 α -氢的反应、催化氢化反应等. 这些反应在有机合成中的应用非常广泛. 在过去的几十年, 有大量文献报道以丙酮为原料, 利用这些经典的反应合成了各式各样的目标分子^[1]. 探索酮类化合物的新反应是有机化学工作者长期追求的目标. 近年来, 丙酮参与过渡金属催化的交叉偶联反应取得了一些突破性的进展; 另外, 丙酮参与自由基的氧化偶联构建碳-碳、碳-杂键也有相关文献报道. 因此, 本文综述了丙酮参与偶联反应的最新进展及其反应机理的探讨.

1 过渡金属催化的偶联反应

过渡金属催化的交叉偶联反应是现代有机合成的

重要工具, 利用此类反应可高效、高选择性地构建碳-碳及碳-杂键等化学键^[2]. 1997年, Buchwald和Hartwig小组^[3]同时报道了在碱性条件下钯催化的羰基 α -位芳基化反应. 这种开创性的工作引领了国内外有机化学工作者对该类催化体系进行了广泛而深入的研究. 随后, 国内外也有相应的文献^[4]对钯催化羰基衍生物 α -位芳基化反应的研究进展进行讨论和论述. 尽管该研究领域已经取得了重大的进展, 但要实现一些简单酮类化合物的单芳基化反应还存在一定的挑战性.

丙酮是一种最简单的酮类化合物, 结构也对称. 实现丙酮羰基 α -位的单芳基化的困难在于: 一方面, 以这种最简单酮为底物, 反应过程中经过了芳基-钯(II)-烯酮的关键中间体, 还原消除特别慢; 而且非常困难; 另一方面, 单芳基化产物的羰基 α -氢酸性增强了, 还可以进一步发生芳基化, 导致多芳基化的混合产物. 早期的文献报道了利用钯催化丙酮的烯醇硅醚等类似物与卤代芳烃反应, 能够实现丙酮羰基 α -位的单芳基化^[5](Eq. 1). 然而, 这些反应需要预先合成烯醇醚的底物, 且以

* Corresponding author. E-mail: gbyan@lsu.edu.cn

Received July 28, 2016; revised September 15, 2016; published online October 9, 2016.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21572094).

国家自然科学基金(No. 21572094)资助项目.

当量的锡试剂或锌试剂为添加剂, 不符合原子经济性发展的理念。

2011 年, Stradiotto 课题组^[6]在该研究领域取得了突破性进展. 他们将一种新颖的 P,N-配体应用到钯催化丙酮与芳香卤化物的芳基化反应体系, 能够很好地控制反应活性及选择性, 实现了丙酮羰基 α -位高选择性的单芳基化(Eq. 2). 一系列富电子及缺电子的芳基氯、溴、碘化物都适用于该反应. 从反应的结果来看, 富电子底物的反应活性较高, 且产率也相对较高. 除了芳基卤代物外, 富电子及位阻较大的对甲基苯磺酸苯酚酯衍生物在该反应条件下也能提供较高的收率. 然而, 在筛选反应条件的过程中, 他们也检测到少量的二芳基化产物. 催化剂及碱的用量、丙酮与碱的比例、反应的时间等参数对选择性有一定的影响, 但该催化体系的配体对选择性单芳基化起着至关重要的作用. 该反应充分利用了一种简单、廉价易得的三-碳原子的化工原料, 不需预先合成烯醇醚化合物. 另外, 该反应还具有催化剂用量少、反应条件温和、官能团耐受性好及底物的适用范围广等优点. 此后, 他们利用该催化体系, 以磷酸钾为碱, 叔丁醇及 1,4-二氧六环为共溶剂, 实现了甲磺酸苯酚酯衍生物与丙酮的偶联反应^[7].

他们课题组还将该方法学应用于“一锅法”的多组分反应合成多官能团化的吡啶衍生物(Eq. 3)^[8]. 该反应是通过经典的 Buchwald-Hartwig 胺化反应、丙酮的单芳基化反应及缩合反应三步串联反应完成的.

这种引领性工作促使国内外有机化学工作者探索了一系列配体在钯催化丙酮羰基 α -位芳基化反应体系中的应用. 2012 年, Ackermann 课题组^[9]报道了以 XantPhos 为配体, 利用醋酸钯催化丙酮与咪唑基磺酸酯的偶联反应, 实现了丙酮羰基 α -位单芳基化(Eq. 4). 在此反应条件下, 他们还探索了不同磺酸酯分子间的竞争

反应, 实验结果表明咪唑基磺酸酯的反应活性比对甲苯磺酸酯、甲磺酸酯高, 而且只得到咪唑基磺酸酯与丙酮偶联的单一产物. 该反应优点是醋酸钯催化剂和双膦配体相对便宜.

2013 年, Ma 课题组^[10]发展了一种新的 P,N-配体 (Zheda-Phos), 并应用于钯催化丙酮羰基 α -位芳基化反应体系(Eq. 5). 他们提出了可能的反应机理(Scheme 1): 首先, 钯催化剂前体/Zheda-Phos 与卤代芳烃发生氧化加成, 得到钯(II)的中间体 A; 在碱的存在下, 这种二价钯的中间体被丙酮烯醇式化合物亲核进攻, 产生中间体 B; 由于中间体 B 位阻大, 不太稳定, 很快会发生还原消除得到单芳基化产物. 该配体中的甲氧基在反应过程中起着非常重要的作用. 它的给电子性能有利于氯代芳烃的氧化加成过程, 它的空间位阻又能极大地促进钯(II)中间体的还原消除. 该反应底物的适用范围广, 一系列含氮、硫等杂环氯代芳烃都能获得较高的收率.

在过去的几十年, 含二茂铁的富电子、大位阻的膦配体被广泛应用于钯催化的交叉偶联反应来构建碳-碳键^[11]. 2014 年, Lang 课题组^[12]发展了一种在空气条件下

图式 1 可能的反应机理
Scheme 1 Possible mechanism

稳定的二茂铁 P,N-配体, 能够很好地应用于钯催化丙酮的单芳基化反应(Eq. 6). 与之前报道的反应相比, 该催化体系还可以适用于缺电子的、大位阻的卤代芳烃及杂环芳烃. 对于大部分反应而言, 钯催化剂的用量可以降低到 0.5 mol%, 产率还能达到 95%以上, 说明该催化体系的催化效果的确不错.

随后, Stradiotto 课题组^[13]第一次报道了在室温条件下, 以二茂铁的双膦配体与钯为催化体系, 实现了丙酮羰基 α -位单芳基化反应(Eq. 7). 该反应的底物适用范围很广, 一系列富电子和缺电子的氯、溴、碘代芳烃及杂环芳烃都能给出较高的收率.

2015 年, Kwong 课题组^[14]发展了一种富电子的、大位阻的、含吡啶基的单膦配体, 应用于该类芳基化反应(Eq. 8). 该配体中的两个甲氧基对该反应的催化性能起着非常重要的作用, 既有利于碳-氯键的氧化加成, 又有利于钯中间体的还原消除. 对于大部分底物而言, 醋酸钯催化剂的用量为 0.5 mol% 时都能给出较高的收率, 有的甚至可以降低到 0.1 mol%, 也不会影响产物的收率.

Beller 课题组^[15]发展了钯催化的碘代芳烃、一氧化碳及丙酮的三组分反应, 有效地合成了一系列的 1,3-二羰基化合物(Eq. 9). 该配体在催化体系中起着多方面的作用, 既有助于芳基碘化物的氧化加成, 又能适合于一氧化碳的插入, 还能促进钯中间体的还原消除. 该反应的底物适用范围较广, 富电子及缺电子取代的芳烃及杂环芳烃碘化物都能够给出中等以上的收率. 然而, 在反应的过程中, 他们还监测到苯甲酸及苯甲醛等少量的副产物. 这些结果表明: 可能是丙酮烯醇化化合物的亲核钯化过程相对较慢导致的.

迄今为止, 在钯催化丙酮羰基 α -位的单芳基化反应体系中, 富电子、大位阻的膦配体对于该反应活性及选择性非常关键. 尽管丙酮单芳基化产物的 α -H 的酸性增强了, 但同时它的位阻也增加了, 且所有的催化体系配体的位阻较大, 再发生芳基化非常困难, 基本上得不到双芳基化的产物.

2 自由基氧化偶联反应

自由基化学因其具有反应条件温和、高区域选择性与立体选择性等独特的优点, 已经成为有机合成化学学科的重要研究方向和前沿热点领域之一^[16]. 酮类化合物在光化学研究领域引起人们极大的兴趣. 由于酮羰基的氧和碳-氧双键分别有一对容易激发的孤对电子和 π 电子, 在光照条件下受光激发后, 参与各种有机化学反应, 如 Norrish 类型的裂解反应、光氧化还原反应、加成反应等. 早期丙酮参与光化学反应研究也有很多相关报道^[17]. 由于篇幅有限, 我们只介绍一个具有代表性的例子. 2008 年, Hirai 等^[17]报道了在光条件下, 水促进的烯炔与丙酮的偶联反应, 高效地合成了一系列甲基酮化合物(Eq. 10). 该反应可能的机理: 在光条件下产生的丙酮自由基对烯炔双键的加成反应(Scheme 2). 接下来, 我们主要介绍近几年来丙酮参与自由基的氧化偶联反应.

图式 2 可能的反应机理
Scheme 2 Possible mechanism

2014 年, Klussmann 课题组^[18]报道了有机酸催化酮对烯炔的自由基氧化加成反应, 得到了烷基化-过氧化的烯炔双官能团化产物(Eq. 11). 尽管该反应底物的适用范围较广, 但大部分反应只有中等的收率. 布朗斯特酸在该反应中起着非常重要的作用, 即促使丙酮自由基

的产生(Scheme 3). 在强酸的存在下, 过氧叔丁醇对丙酮的亲核-加成得到中间体 **A**, 随后脱水生成烯基过氧化物中间体 **B**. 这种烯基过氧化物很容易均裂产生共振-稳定化的丙酮自由基与叔丁氧自由基, 再发生后续的烯炔自由基加成反应, 得到双官能团化产物.

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

随后, Xia 和 Klussmann 课题组^[19]报道了有机酸催化丙酮对芳基丙烯酰胺的自由基加成与环化的串联反应, 合成了一系列氧化吡啶的衍生物(Eq. 12). 当反应底物氮原子上基团为磺酸基或氢原子($R^2 = Ts, H$)时, 则会得到烷基化-过氧化的烯炔双官能团化产物.

2014 年, Ji 课题组^[20]报道了 α,α -二芳基烯丙醇与简单羰基化合物的烷基化反应(Eq. 13). 该反应底物的普适性很广, 一系列的羰基化合物都能给出较高的收率, 如脂肪酮和环酮、酯和内酯、*N*-甲基酰胺等. 另外, 该反应的条件非常简单, 除了自由基的前体化合物外, 不需要任何添加剂. 该反应的机理经由了自由基对烯炔双键的加成, 以及分子内芳基的 1,2-迁移过程, 得到 1,5-二羰基化合物(Scheme 4). 芳基的 1,2-迁移受到了芳环上取代基的电子及位阻效应的影响, 一般来说, 缺电子的芳炔及位阻小的芳炔更容易迁移.

图式 4 可能的反应机理

Scheme 4 Possible mechanism

2014年, Li课题组^[21]报道了银催化烯烃不饱和键的碳-氟双官能团化反应(Eq. 14). 该反应的底物适用范围很广, 区域选择性好, 产物产率较高. 另外, 该反应还可以放大到克级规模, 依然具有良好的催化效果, 展示了该催化体系的实用性. 在 Ag(I)-SelectFluor 氟试剂的氧化体系条件下, 丙酮能够生成丙酮基自由基, 再发生后续的烯烃自由基加成反应, 得到双官能团化产物(Scheme 5).

2015年, Wang课题组^[22]报道了在氧化条件下, 利用铜-锰双金属催化烯烃与丙酮的反应, 得到了1,4-二羰基化合物(Eq. 15). 尽管该反应的底物适用范围较宽, 区域选择性好, 但大部分产物的收率中等偏低, 而且反应所需的时间较长. 该反应的机理类似于 Klusmann 课题组报道烯烃的烷基化-过氧化双官能团化反应^[19], 只不过这种双官能团化的产物在该反应体系条件下很容易进一步转化为1,4-二羰基化合物.

图式 5 可能的反应机理

Scheme 5 Possible mechanism

Cao课题组^[23]报道了以分子氧为氧化剂, 利用铜催化咪唑并[1,2-*a*]吡啶与羰基化合物(如 *N,N*-二甲基乙酰胺和丙酮等)的反应, 实现了3-位碳-氢键的双羰基化反应(Eq. 16). 他们只是提出了酰胺参与自由基反应的可能机理, 而并没有详细说明丙酮如何参与自由基的反应.

最近, 我们课题组^[24]报道了以过氧叔丁醇及过氧叔丁醚为混合氧化剂, 实现了二芳基二硫(硒)与丙酮的氧化偶联, 高效地合成了一系列 α -芳硫(硒)基丙酮化合物(Eq. 17). 该反应官能团耐受性好, 产物产率较高. 我们提出了产生丙酮自由基可能的反应历程(Scheme 6). 在过氧叔丁醇及过氧叔丁醚的混合氧化剂条件下, 产生关键的羟基自由基 **A**, 该自由基快速攫取丙酮的 α -氢生成水, 同时产生丙酮自由基 **B**, 再发生后续的自由基偶联反应.

图式 6 可能的反应机理
Scheme 6 Possible mechanism

受到这个反应的启发, 我们设想在该混合氧化剂体系下, 丙酮也能够发生自由基的碳-碳氧化偶联反应. 因此, 我们^[25]又报道了在该混合氧化体系下, 芳香醛与丙酮的氧化偶联反应, 合成了一系列的 1,3-二羰基化合物(Eq. 18). 然而, 该反应需要加入催化量的对甲苯磺酸, 以促进丙酮自由基 **B** 的生成. 另外, 该反应还需要以四丁基碘化铵为催化剂, 以促进混合氧化剂产生过氧叔丁基自由基 **C**, 该自由基攫取苯甲醛的氢生成过氧叔丁醇, 同时产生苯甲酰基自由基 **D**, 再发生后续的自由基偶联得到目标产物(Scheme 7).

一般来说, 丙酮参与自由基偶联反应的条件相对比较简单, 如光照、过氧化物或金属氧化物等, 有的反应

图式 7 可能的反应机理
Scheme 7 Possible mechanism

需要加入少量的有机酸促进丙酮自由基的产生.

3 总结与展望

综上所述, 近年来有机化学工作者探索了丙酮参与有机合成的新反应. 一方面, 过渡金属催化丙酮与芳香卤化物的交叉偶联, 实现了羰基 α -位的单芳基化反应. 设计具有富电子且大位阻配体的催化体系对该类反应非常关键. 探索更加温和的反应条件、催化剂及配体的低用量以及更宽的底物适用范围也是今后努力的方向. 另一方面, 丙酮参与自由基的氧化偶联反应, 合成了各式各样的有机化合物. 然而, 大部分反应局限于丙酮对烯烃的自由基加成. 探索丙酮参与不同类型底物的自由基反应, 构建碳-碳、碳-杂键是未来发展的方向.

References

- (a) Pan, J.; Wang, Y.; Chen, S.; Zhang, X.; Wang, Y.; Zhou, Z. *Tetrahedron* **2016**, 72, 240.
(b) Wang, F.; Liu, Y.; Qi, Z.; Dai, W.; Li, X. *Tetrahedron Lett.* **2014**, 55, 6399.
(c) Lu, A.; Wu, R.; Wang, Y.; Wu, G.; Zhou, Z.; Fang, J.; Tang, C. *J. Org. Chem.* **2011**, 76, 3872.
(d) Onodera, G.; Matsumoto, H.; Nishibayashi, Y.; Uemura, S. *Organometallics* **2005**, 24, 5799.
(e) Özkaz, S.; Finke, R. G. *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, 127, 4800.
(f) Noland, W. E.; Konkel, M. J.; Konkel, L. C.; Pearce, B. C. *J. Org. Chem.* **1996**, 61, 451.
- [2] For selected applications, see: (a) Miyaura, N.; Suzuki, A. *Chem. Rev.* **1995**, 95, 2457.
(b) Ma, D.; Cai, Q. *Acc. Chem. Res.* **2008**, 41, 1450.
(c) Hartwig, J. F. *Acc. Chem. Res.* **2008**, 41, 1534.

- (d) Bellina, F.; Rossi, R. *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 1082.
(e) Xiao, Q.; Zhang, Y.; Wang, J. *Acc. Chem. Res.* **2013**, *46*, 236.
- [3] (a) Palucki, M.; Buchwald, S. L. *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 11108.
(b) Hamann, B. C.; Hartwig, J. F. *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 12382.
(c) Satoh, T.; Kawamura, Y.; Miura, M.; Nomura, M. *Angew. Chem., Int. Ed.* **1997**, *36*, 1740.
- [4] (a) Culkin, D. A.; Hartwig, J. F. *Acc. Chem. Res.* **2003**, *36*, 234.
(b) Shao, Z.; Zhang, H. *Chin. J. Org. Chem.* **2005**, *25*, 282.
(c) Gong, J. F.; Xu, C.; Wu, Y. J. *Prog. Chem.* **2006**, *18*, 752.
- [5] (a) Chobanian, H. R.; Liu, P.; Chioda, M. D.; Guo, Y.; Lin, L. S. *Tetrahedron Lett.* **2007**, *48*, 1213.
(b) Su, W. P.; Raders, S.; Verkade, J. G.; Liao, X. B.; Hartwig, J. F. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2006**, *45*, 5852.
(c) Liu, P.; Lanza, Jr., T. J.; Jewell, J. P.; Jones, C. P.; Hagmann, W. K.; Lin, L. S. *Tetrahedron Lett.* **2003**, *44*, 8869.
(d) Kosugi, M.; Suzuki, M.; Hagiwara, I.; Goto, K.; Saitoh, K.; Migita, T. *Chem. Lett.* **1982**, 939.
- [6] Hesp, K. D.; Lundgren, R. J.; Stradiotto, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 5194.
- [7] Alsabeh, P. G.; Stradiotto, M. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2013**, *52*, 1.
- [8] Rotta-Loria, N. L.; Borzenko, A.; Alsabeh, P. G.; Lavery, C. B.; Stradiotto, M. *Adv. Synth. Catal.* **2015**, *357*, 100.
- [9] Ackermann, L.; Mehta, V. P. *Chem. Eur. J.* **2012**, *18*, 10230.
- [10] Li, P.; Lü, B.; Fu, C.; Ma, S. *Adv. Synth. Catal.* **2013**, *355*, 1255.
- [11] (a) Cartney, D.; Guiry, J. P. *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 5122.
(b) Ana, R.; Pathak, T. P.; Sigman, M. *Chem. Rev.* **2011**, *111*, 1417.
- [12] Gäbler, C.; Korb, M.; Schaarschmidt, D.; Hildebrandt, A.; Lang, H.; *Adv. Synth. Catal.* **2014**, *356*, 2979.
- [13] (a) MacQueen, P. M.; Chisholm, A. J.; Hargreaves, B. K. V.; Stradiotto, M. *Chem. Eur. J.* **2015**, *21*, 11006.
(b) Schranck, J.; Rotzler, J. *Org. Process Res. Dev.* **2015**, *19*, 1936.
- [14] Fu, W. C.; So, C. M.; Chow, W. K.; Yuen, O. Y.; Kwong, F. Y. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 4612.
- [15] Schranck, J.; Tlili, A.; Alsabeh, P. G.; Neumann, H.; Stradiotto, M.; Beller, M. *Chem. Eur. J.* **2013**, *19*, 12624.
- [16] For selective reviews, see: (a) Iqbal, J.; Bhatia, B.; Nayyar, N. K. *Chem. Rev.* **1994**, *94*, 519.
(b) Sibi, M. P.; Porter, N. A. *Acc. Chem. Res.* **1999**, *32*, 163.
(c) Gansäuer, A.; Bluhm, H. *Chem. Rev.* **2000**, *100*, 2771.
(d) Robertson, J.; Pillai, J.; Lush, R. K. *Chem. Soc. Rev.* **2001**, *30*, 94.
(e) Studer, A. *Chem. Soc. Rev.* **2004**, *33*, 263.
(f) Brown, S. S.; Stutz, J. *Chem. Soc. Rev.* **2012**, *41*, 6405.
(g) Zirikis, M. D.; Orfanopoulos, M. *Chem. Rev.* **2013**, *113*, 5262.
(h) Dénès, F.; Schiesser, C. H.; Renaud, P. *Chem. Soc. Rev.* **2013**, *42*, 7900.
- [17] (a) Norrish, R. G.; Bond, C. H. *Nature* **1936**, *138*, 1016.
(b) Büchi, G.; Inman, C. G.; Lipinsky, E. S. *J. Am. Chem. Soc.* **1954**, *76*, 4327.
(c) Nau, W. M.; Cozens, F. L.; Scaiano, J. C. *J. Am. Chem. Soc.* **1996**, *118*, 2275.
(d) Reusch, W. J. *Org. Chem.* **1962**, *27*, 1882.
(e) Majerski, K. M.; Pavlović, D.; Kulyk, M. Š. *J. Org. Chem.* **1993**, *58*, 252.
(f) Chung, W.-S.; Ho, C.-C. *Chem. Commun.* **1997**, 317.
(g) Tótl, N. P.; Leigh, W. J. *Organometallics* **1996**, *15*, 2554.
(h) Ghandi, K.; Addison-Jones, B.; Brodovitch, J.-C.; McCollum, B. M.; McKenzie, I.; Percival, P. W. *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 9594.
(i) Shiraishi, Y.; Tsukamoto, D.; Hirai, T. *Org. Lett.* **2008**, *10*, 3117.
(j) Tsukamoto, D.; Shiraishi, Y.; Hirai, T. *J. Org. Chem.* **2010**, *75*, 1450.
- [18] Schweitzer-Chaput, B.; Demaerel, B. J.; Engler, H.; Klusmann, M. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2014**, *53*, 8737.
- [19] (a) Xia, X.-F.; Zhu, S.-L.; Zeng, M.; Gu, Z.; Wang, H.; Li, W. *Tetrahedron* **2015**, *71*, 6099.
(b) Oess, E.; Karanestorai, S.; Bosnidou, A.-E.; Schweitzer-Haput, B.; Hasenbeck, M.; Klusmann, M. *Synlett* **2015**, 1973.
- [20] Chu, X.-Q.; Meng, H.; Zi, Y.; Xu, X.-P.; Ji, S.-J. *Chem. Eur. J.* **2014**, *20*, 17198.
- [21] Zhu, L.; Chen, H.; Wang, Z.; Li, C. *Org. Chem. Front.* **2014**, *1*, 1299.
- [22] Lan, X.-W.; Wang, N.-X.; Zhang, W.; Wen, J.-L.; Bai, C.-B.; Xing, Y.; Li, Y.-H. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 4460.
- [23] Wang, C.; Lei, S.; Cao, H.; Qiu, S.; Liu, J.; Deng, H.; Yan, C. *J. Org. Chem.* **2015**, *80*, 12725.
- [24] Yan, G.; Borah, A. J.; Wang, L.; Pan, Z.; Chen, C.; Shen, X.; Wu, X. *Tetrahedron Lett.* **2015**, *56*, 4305.
- [25] Shen, X.; Borah, A. J.; Cao, X.; Pan, W.; Yan, G.; Wu, X. *Tetrahedron Lett.* **2015**, *56*, 6484.

(Zhao, X.)