铑催化苯醌磺酰化反应合成磺酰基醌类衍生物

王大伟* 余晓丽 葛冰洋 苗红艳 丁玉强*

(江南大学化学与材料工程学院 教育部食品胶体与生物技术重点实验室 无锡 214122)

摘要 报道了一种过渡金属铑催化的醌类与磺酰氯化物的偶联反应, 实现了醌类的磺酰化反应. 在温和的反应条件下, 以较高的产率成功合成了一系列具有生物活性的磺酰基醌类化合物, 此反应不仅对苯醌具有较好的适应性, 对于萘醌底物也能取得较高的产率, 并提出了初步的反应机理.

关键词 铑; 磺酰化; 交叉偶联; 醌; 磺酰基苯醌

Synthesis of Sulfonyl Quinone Derivatives by Rh-Catalyzed Sulfonylation of Quinones

Wang, Dawei* Yu, Xiaoli Ge, Bingyang Miao, Hongyan Ding, Yuqiang*

(Key Laboratory of Food Colloids and Biotechnology, Ministry of Education, School of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122)

Abstract The rhodium-catalyzed sulfonylation reaction of quinones with sulfonyl chloride compounds was developed, which provides an efficient and mild method of the synthesis of biologically active sulfonyl quinones with high yields. This methodology is also efficient for the coupling of naphthoquinone with sulfonyl chlorides. The possible reaction mechanism was also proposed.

Keywords rhodium; sulfonylation; cross-coupling; quinones; sulfonyl quinones

在过去的几十年里, 过渡金属催化的偶联反应和碳氢键活化反应一直被广泛应用在合成化学反应中^[1]. 过渡金属如铑、钯、钼、镍、铜等在反应中扮演着至关重要的角色^[2~8]. 迄今为止, 众多科学家预测通过过渡金属催化的偶联反应和碳氢键活化来合成生物医药等有机物中间体和化合物将成为一种重要的合成手段^[1,9]. 正因为在现代有机合成中的重要地位和用途, 过渡金属催化偶联反应和碳氢键活化反应近些年来取得了较快的发展, 并得到了较为广泛的应用.

醌类衍生物广泛存在于自然界中, 它们因其自身具有独特药用价值和生物活性受到了广泛关注^[10]. 如今, 科学家们发现了醌类衍生物具有抗病毒、抗癌、抗菌、抗肿瘤和抗疟疾等作用^[11,12]. 最近, Reynolds 与他的同事^[13]报道了磺酰基醌类化合物及其衍生物磺酰基二萘醌类化合物都是潜在的 β -Ketoacyl-ACP-synthase III (FabH) 抑制剂. 近几年, 关于醌类化合物的合成有了较

快发展^[14~23], 但是主要集中在芳基醌类化合物的合成方面(Scheme 1)^[24~30]. 磺酰基醌类化合物是很多药物、杀虫剂等生物医药的重要中间体^[31], 然而, 关于磺酰基醌类的合成方法非常有限, 在极少的合成方法中却依旧存在反应条件苛刻、合成不能一步完成等不足^[32~33]. 最近, 我们报道了铑催化苯醌的 C—C 键偶联和钯催化苯醌 C—S 键偶联方面的工作^[34,35], 尤其是苯醌和二芳基碘鎓盐的偶联反应^[34], 但是这些反应存在较多的问题; 主要就是底物的原子利用率及产率较低、底物适应性较差和催化剂用量较大等缺点. 为了克服这些不足^[35], 寻找一种可以替代的方法就显得尤为重要. 因此, 在前面工作的基础上^[34~35], 我们发展了一种铑催化醌类直接磺酰化合成磺酰基醌类化合物的方法, 取得了较高的产率. 这无论对醌类药物科学还是有机方法学领域都具有非常重要积极的意义.

* E-mail: wangdw@jiangnan.edu.cn

Received December 29, 2014; revised January 26, 2015; published online January 28, 2015.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21401080).

国家自然科学基金(No. 21401080)资助项目.

Previous work

This work

图式 1 过渡金属催化的偶联反应

Scheme 1 The transition-metal catalyzed coupling reactions

1 结果与讨论

1.1 反应条件的优化

首先, 选择苯醌(**1a**) (0.5 mmol)和对甲苯磺酰氯(**2a**) (0.75 mmol)作为模型反应底物, 以三氯化铑(3 mol%)作为催化剂, 碳酸铯(0.75 mmol)作为碱^[36-37], 以 3 mL 的 1,2-二氯乙烷(DCE)作反应的溶剂, 90 °C 下进行尝试反应, 反应直接在空气中进行. 实验结果表明反应未能检测到产物, 即使加热搅拌 24 h, 仍然未能得到目标产物(表 1, Entry 1). 此后, 我们进行了催化剂的筛选, 当尝试将催化剂 RhCl_3 换为 $[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$ 时, 令人兴奋的是, 我们检测到了目标产物 2-(4-甲基苯磺酰基)对二苯醌(**3a**), 虽然此反应的产率只有 41%. 为了提高反应的产率, 我们做了大量的优化反应(表 1). 起初对反应溶剂进行筛选(表 1, Entries 5~9), 经过对比发现 1,2-二氯乙烷(DCE)是最佳的溶剂. 当我们尝试使用不同的碱进行优化反应时(表 1, Entries 10~14), 发现碳酸钾是最优的碱. 同时, 也尝试了其他添加剂参与反应(表 1, Entries 15~21), 尤其是一些银试剂的加入, 可以大大提高反应的产率. 实验发现, 当加入添加剂六氟锑酸银还可以进一步提高反应产率至 85%(表 1, Entry 20). 与此同时, 空白对照实验说明此反应需要加入铑催化剂才可以反应, 只有银是不能催化这个反应的(表 1, Entries 4, 21). 最后得到此反应的最优条件是: 苯醌 **1a** (0.5 mmol), 对甲苯磺酰氯 **2a** (0.75 mmol), $[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$ (3 mol%), AgSbF_6 (0.1 mmol)、碳酸钾(0.75 mmol), 在 90 °C 下反应 16 h.

2.2 底物普适性的考察

为了进一步验证该方法的可行性, 在最优条件下, 我们对反应的底物进行了拓展研究. 实验表明此反应对大多数官能团都有着良好的适应性, 具体见表 2. 各种

表 1 反应条件优化^a

Table 1 Screening of reaction conditions

Entry	Catalyst	Base	Solvent	Yield ^{b/a} %
1	RhCl_3	Cs_2CO_3	DCE	<5
2	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	Cs_2CO_3	DCE	41
3	$[(\text{COD})\text{RhCl}]_2$	Cs_2CO_3	DCE	12
4	None	Cs_2CO_3	DCE	<5
5	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	Cs_2CO_3	THF	<5
6	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	Cs_2CO_3	Benzene	<5
7	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	Cs_2CO_3	DMF	11
8	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	Cs_2CO_3	Toluene	<5
9	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	Cs_2CO_3	Dioxane	<5
10	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	NaHCO_3	DCE	28
11	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	K_2CO_3	DCE	51
12	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	Na_2CO_3	DCE	35
13	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	<i>t</i> -BuOK	DCE	22
14	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$	KOH	DCE	8
15	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2/\text{AgBF}_4$	K_2CO_3	DCE	43
16	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2/\text{AgOTf}$	K_2CO_3	DCE	56
17	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2/\text{AgNTf}_2$	K_2CO_3	DCE	72
18	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2/\text{AgOAc}$	K_2CO_3	DCE	38
19	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2/\text{Ag}_2\text{CO}_3$	K_2CO_3	DCE	45
20	$[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2/\text{AgSbF}_6$	K_2CO_3	DCE	85
21	AgSbF_6	K_2CO_3	DCE	<5 ^c

^a Reaction conditions: **1a** (0.5 mmol, 1.0 equiv.), **2a** (0.75 mmol, 1.5 equiv.), $[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$ (3 mol%), base (0.75 mmol, 1.5 equiv.), additive (20 mol%), solvent (3 mL), 16 h, reflux or 90 °C; ^b Isolated yields based on **1a**. ^c Only AgSbF_6 was added.

供电子基团取代的苯磺酰氯都能以很好的产率得到目标产物, 而且此反应对取代基并无位阻限制. 然而苯磺酰氯上取代基的电子效应对此反应有着很大的影响. 我们尝试吸电子基团的苯磺酰氯与苯醌反应, 如对硝基苯磺酰氯、对氰基苯磺酰氯等, 但是都未得到目标产物.

接下来我们尝试用萘醌与各种磺酰氯进行反应, 经过实验尝试, 幸运地得到了预期的产物(表 2), 虽然产率较苯醌略微低了一些. 两类反应的共同点是对大多数官能团都有着较好的适应性, 同时苯磺酰氯上取代基的电子效应对此反应有着很大的影响, 带有供电子基团的底物都有着良好的产率, 当苯磺酰氯上含有 2 个甲氧基时, 可以取得最高达 88% 的产率(表 2, **3j**); 但含有吸电子基

表 2 底物的普适性考察^a
Table 2 Substrate scope of the reaction

^a Reaction conditions: **1** (0.5 mmol, 1.0 equiv.), **2** (0.75 mmol, 1.5 equiv.), $[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$ (3 mol%), K_2CO_3 (0.75 mmol, 1.5 equiv.), AgSbF_6 (20 mol%), DCE (3 mL), 16 h, 90 °C; isolated yields based on **1**.

和磺酰氯不能顺利的发生氧化加成, 从而导致反应不能发生。

接下来, 我们对反应的机理进行了初步的探索. 结合实验结果和文献报道^[34~36], 我们认为反应第一步是 $[\text{Cp}^*\text{RhCl}_2]_2$ 与芳基磺酰氯发生氧化加成反应, 形成中间体 **B**; 之后中间体 **B** 与苯醌发生插入反应, 得到中间体 **C**, 最后发生 $\beta\text{-H}$ 消除得到产物, 催化剂完成循环 (Scheme 2).

磺酰基醌类化合物和 1,4-二酚类化合物是一种良好的抑制剂. 2008 年, Reynolds 系统地研究了 1,4-二酚类化合物和磺酰基醌类化合物的生物活性 (Scheme 3, **4**~**5**)^[13]. 运用本文的方法学, 只需要再进行一步衍生物就可以合成具有抗 *mtFabH* 活性的 1,4-二酚类化合物. 经过条件优化筛选工作, 我们发现直接采用硼氢化钠作为还原试剂, 在四氢呋喃 (THF) 中室温搅拌 2 h, 就可以高产率的得到目标化合物 **4** (Scheme 3).

图式 2 推测的苯醌与芳基磺酰氯的反应机理

Scheme 2 The possible mechanism of benzoquinone and aryl sulfonyl chloride compounds

2 结论

总之, 实现了过渡金属铑催化的醌类化合物与磺酰氯化合物的偶联反应, 取得了 72%~88% 的产率. 实验结果表明, 这是一种非常有效地合成磺酰基醌类化合物的方法, 这对今后合成具有良好抗 $\beta\text{-FabH}$ 抑制剂提供了一条非常有效的参考路线. 相关的工作还在继续, 我

图式 3 1,4-磺酰基二酚类化合物的合成

Scheme 3 The synthesis of sulfonyl 1,4-diol compound

们希望找到一种更加简捷、高效的方法来合成磺酰基醌类化合物。

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

铑催化剂均购自百灵威, 反应底物均购自阿拉丁、百灵威、安耐吉等公司, 所有药品和试剂均为分析纯。¹H NMR(内标为 TMS, 溶剂为 CDCl₃)使用 Varian INOVA-400 型核磁共振仪测定。

3.2 实验方法

铑催化的醌类与磺酰氯偶联合成磺酰基醌类化合物的实验方法: 向干燥的 25 mL 密封反应管中分别加入苯醌(**1a**) (0.5 mmol)、对甲苯磺酰氯(**2a**) (0.75 mmol)、[Cp*RhCl₂]₂ (0.015 mmol)、AgSbF₆ (0.1 mmol)、碳酸钾 (0.75 mmol)和 1,2-二氯乙烷(3 mL), 随后将反应管密封, 90 °C 条件下搅拌 24 h. 反应完毕冷却至室温, 将反应混合物倒入冰水中并用乙酸乙酯萃取(15 mL×3), 合并有机相并用硫酸钠干燥, 减压浓缩后得到的混合物进行柱层析(石油醚/乙酸乙酯, *V*: *V*=10:1)分离纯化, 得到磺酰基醌类化合物 **3a** (85%)。

将磺酰基醌类还原成磺酰基二醇类化合物的实验方法: 称取 2-(4-甲基苯磺酰基)对二苯醌(**3a**) (0.5 mmol) 于 25 mL 烧瓶中, 向烧瓶中加入 5 mL 四氢呋喃溶解, 冰水浴中分批逐渐加入硼氢化钠(1.5 mmol), 然后升温至室温下搅拌 2 h. 反应结束后缓慢加入蒸馏水淬灭反应, 然后将反应液用乙酸乙酯萃取(15 mL×3)得到有机层, 用无水硫酸镁进行干燥. 滤除干燥剂后将溶液旋干, 使用柱层析法分离[展开剂: *V*(石油醚): *V*(乙酸乙酯)=5:1], 得到产物 **4** (86%)。

2-(甲基-4-磺酰基)-[1,4]苯醌(**3a**)^[35]: 浅黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 7.32 (d, *J*=8.1 Hz, 2H), 7.20~7.16 (m, 2H), 6.83~6.71 (m, 3H), 2.33 (s, 3H)。

2-(4-甲氧基-苯磺酰)-[1,4]苯醌(**3b**)^[35]: 橘黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 7.41 (d, *J*=8.3, 2.4 Hz, 2H), 6.90 (d, *J*=8.8 Hz, 2H), 6.80~6.70 (m, 3H), 3.79 (s, 3H)。

2-(4-叔丁基-苯磺酰)-[1,4]苯醌(**3c**)^[35]: 浅黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 7.50~7.41 (m, 4H), 6.89~6.80 (m, 3H), 1.35 (s, 9H)。

2-(2,5-二甲氧基-苯磺酰)-[1,4]苯醌(**3d**)^[35]: 黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 6.95~6.90 (m, 1H), 6.92~6.84 (m, 2H), 6.83~6.78 (m, 2H), 6.74 (d, *J*=2.9 Hz, 1H), 3.78 (s, 3H), 3.73 (s, 3H)。

2-(4-丙基-苯磺酰)-[1,4]苯醌(**3e**)^[35]: 黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 7.34 (d, *J*=8.1 Hz, 2H), 7.18 (dd, *J*=7.6, 1.2 Hz, 2H), 6.82~6.71 (m, 3H), 2.60~2.53 (m, 2H), 1.65~1.55 (m, 2H), 0.89 (t, *J*=7.3 Hz, 3H)。

2-(4-异丙基-苯磺酰)-[1,4]苯醌(**3f**)^[35]: 浅黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 7.43 (d, *J*=8.2 Hz, 2H), 7.31 (d, *J*=8.3 Hz, 2H), 6.88~6.79 (m, 3H), 2.95 (dt, *J*=13.8, 6.9 Hz, 1H), 1.28 (s, 3H), 1.27 (s, 3H)。

2-(甲苯-4-磺酰)-[1,4]萘醌(**3g**)^[13]: 浅黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 8.23~8.18 (m, 1H), 8.14~8.09 (m, 1H), 7.80~7.74 (m, 2H), 7.49 (d, *J*=8.1 Hz, 2H), 7.28 (d, *J*=8.0 Hz, 2H), 7.07 (s, 1H), 2.42 (s, 3H)。

2-(4-甲氧基-苯磺酰)-[1,4]萘醌(**3h**)^[35]: 浅黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 8.20~8.16 (m, 1H), 8.14~8.09 (m, 1H), 7.80~7.74 (m, 2H), 7.57 (d, *J*=8.8 Hz, 2H), 7.05 (s, 1H), 7.01~6.98 (d, *J*=8.8 Hz, 2H), 3.88 (s, 3H)。

2-(4-叔丁基-苯磺酰)-[1,4]萘醌(**3i**)^[35]: 浅黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 8.31~8.19 (m, 1H), 8.14~8.10 (m, 1H), 7.80~7.75 (m, 2H), 7.56~7.48 (m, 4H), 7.08 (s, 1H), 1.37 (s, 9H)。

2-(2,5-二甲氧基-苯磺酰)-[1,4]萘醌(**3j**)^[35]: 浅黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 8.19~8.09 (m, 2H), 7.79~7.72 (m, 2H), 7.02 (s, 1H), 7.00~6.95 (m, 2H), 6.82 (d, *J*=2.9 Hz, 1H), 3.80 (s, 3H), 3.74 (s, 3H)。

2-(4-丙基-苯磺酰)-[1,4]萘醌(**3k**)^[35]: 浅黄色固体。¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 8.21~8.17 (m, 1H), 8.14~8.10 (m, 1H), 7.81~7.75 (m, 2H), 7.51 (d, *J*=8.1 Hz, 2H), 7.29 (d, *J*=8.1 Hz, 2H), 7.08 (s, 1H), 2.67~2.63 (m, 2H), 1.74~1.64 (m, 2H), 0.98 (t, *J*=7.3 Hz, 3H)。

2-(甲苯-4-磺酰)-苯-1,4-二酚(**4**)^[13]: 浅黄色固体。m.p.213~215 °C; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 7.34 (d, *J*=8.1 Hz, 2H), 7.28 (d, *J*=8.0 Hz, 2H), 6.86~6.83 (m, 1H), 6.75~6.72 (m, 2H), 4.92 (s, 1H), 4.75 (s, 1H), 2.40

(s, 3H).

References

- [1] Mkhaliid, I. A.; Barnard, J. H.; Marder, T. B.; Murphy, J. M.; Hartwig, J. F. *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 890.
- [2] Huang, C.; Chattopadhyay, B.; Gevorgyan, V. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 12406.
- [3] Huang, C.; Ghavtadze, N.; Chattopadhyay, B.; Gevorgyan, V. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 17630.
- [4] Xiao, B.; Gong, T.-J.; Liu, Z.-J.; Liu, J.-H.; Luo, D.-F.; Xu, J.; Liu, L. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 9250.
- [5] Dong, J.; Long, Z.; Song, F.; Wu, N.; Guo, Q.; Lan, J.; You, J. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 580.
- [6] Yu, D.-G.; Suri, M.; Glorius, F. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 8802.
- [7] Song, G. Y.; Wang, F.; Li, X. W. *Chem. Soc. Rev.* **2012**, *41*, 3651.
- [8] Cho, S. H.; Yoon, J.; Chang, S. J. *Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 5996.
- [9] Yang, S.; Sun, C.; Fang, Z.; Li, B.; Li, Y.; Shi, Z. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2008**, *47*, 1473.
- [10] Babula, P.; Mikelova, R.; Kizek, R.; Havel, L.; Sladky, Z. *Ceska Slovens. Farm.* **2006**, *55*, 151.
- [11] Miller, R. F.; Huang, S. *J. Antibiot.* **1995**, *48*, 520.
- [12] Zhang, B.; Salituro, G.; Szalkowski, D.; Li, Z.; Zhang, Y.; Royo, I.; Vitella, D.; Diez, M. T.; Pelaez, F.; Ruby, C.; Kendall, R. L.; Mao, X.; Griffin, P.; Calaycay, J.; Zierath, J. R.; Heck, J. V.; Smith, R. G.; Moller, D. E. *Science* **1999**, *284*, 974.
- [13] Alhamadsheh, M.; Waters, N.; Sachdeva, S.; Lee, P.; Reynolds, K. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2008**, *18*, 6402.
- [14] Pirrung, M. C.; Park, K.; Li, Z. *Org. Lett.* **2001**, *33*, 65.
- [15] Pirrung, M. C.; Deng, L.; Li, Z.; Park, K. *J. Org. Chem.* **2002**, *67*, 8374.
- [16] Knölker, H.-J.; Fröhner, W.; Reddy, K. R. *Synthesis* **2002**, 557.
- [17] Yadav, J. S.; Reddy, B. V. S.; Swamy, T. *Tetrahedron Lett.* **2003**, *44*, 9121.
- [18] Honraedt, A.; Callonnec, F. L.; Grogne, E. L.; Fernandez, V.; Fel-pin, F.-X. *J. Org. Chem.* **2013**, *78*, 4604.
- [19] Zhang, H.-B.; Liu, L.; Chen, Y.-J.; Wang, D.; Li, C.-J. *Adv. Synth. Catal.* **2006**, *348*, 229.
- [20] Miyamura, H.; Shiramizu, M.; Matsubara, R.; Kobayashi, S. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2008**, *47*, 8093.
- [21] Lockner, J. W.; Dixon, D. D.; Risgaard, R.; Baran, P. S. *Org. Lett.* **2011**, *13*, 5628.
- [22] Ilangoan, A.; Saravanakumar, S.; Malayappasamy, S. *Org. Lett.* **2013**, *15*, 4968.
- [23] Zhang, S.; Song, F.; Zhao, D.; You, J. *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 4558.
- [24] Molina, M. T.; Navarro, C.; Moreno, A.; Csaky, A. G. *Org. Lett.* **2009**, *11*, 4938.
- [25] Demchuk, O. M.; Pietrusiewicz, K. M. *Synlett* **2009**, 7, 1149.
- [26] Fujiwara, Y.; Domingo, V.; Seiple, I. B.; Gianatassio, R.; Bel, M. D.; Baran, P. S. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 3292.
- [27] Wang, J.; Wang, S.; Wang, G.; Zhang, J.; Yu, X.-Q. *Chem. Commun.* **2012**, *48*, 11769.
- [28] Singh, P. P.; Aithagani, S. K.; Yadav, M.; Singh, V. P.; Vishwakarma, R. A. *J. Org. Chem.* **2013**, *78*, 2639.
- [29] Komeyama, K.; Kashihara, T.; Takaki, K. *Tetrahedron Lett.* **2013**, *54*, 1084.
- [30] Deb, A.; Manna, S.; Maji, A.; Dutta, U.; Maiti, D. *Eur. J. Org. Chem.* **2013**, 5251.
- [31] Revill, W. P.; Bibb, M. J.; Scheu, A. K.; Kieser, H. J.; Hopwood, D. A. *J. Bacteriol.* **2001**, *183*, 3526.
- [32] Carreno, M. C.; Ruano, J. L. G.; Urbano, A.; Remor, C. Z.; Arroyo, Y. J. *J. Org. Chem.* **2000**, *65*, 453.
- [33] Kraus, G. A.; Kim, I. J.; *J. Org. Chem.* **2003**, *68*, 4517.
- [34] Wang, D.; Ge, B.; Li, L.; Shan, J.; Ding, Y. *J. Org. Chem.* **2014**, *79*, 8607.
- [35] Ge, B.; Wang, D.; Dong, W.; Ma, P.; Li, Y.; Ding, Y. *Tetrahedron Lett.* **2014**, *55*, 5443.
- [36] Ouyang, K.; Xi, Z. *Acta Chim. Sinica* **2013**, *71*, 13.
- [37] Qing, B.; Cui, C. *Acta Chim. Sinica* **2015**, DOI: 10.6023/A14120828.

(Li, L.; Lu, Z.)