3,3-二甲基-二苯基-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮
衍生物的有效合成许招会^{*,a} 周 鹏^b 刘德永^a^(a) 江西师范大学化学化工学院 南昌 330022)^(b) 南昌理工学院新能源与环境工程学院 南昌 330029)

摘要 在分子碘作用下,以芳香醛、硫脲和 2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮为原料,通过无溶剂三组分缩合反应合成了 6 种 3,3-二甲基-二苯基-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮衍生物.当催化剂的用量为 10 mol%时,80 °C 反应 3.0~6.0 h,收率为 73%~91%.此外,该方法具有反应条件温和、后处理简单且收率高的优点.

关键词 分子碘;无溶剂;三组分反应;螺杂双环化合物

Efficient One-Pot Synthesis of 3,3-Dimethyl-diphenyl-2,4-dioxo-8,10-diazaspiro[5.5]undecane-1,5-dione-9-thione Derivatives

Xu, Zhaohui^{*,a} Zhou, Peng^b Liu, Deyong^a^(a) College of Chemistry and Chemical Engineering, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022)^(b) School of New Energy and Environment Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330029)

Abstract Six kinds of 3,3-dimethyl-diphenyl-2,4-dioxo-8,10-diazaspiro[5.5]undecane-1,5-dione-9-thione derivatives were synthesized by the three component one-pot reaction of aromatic aldehydes with thiourea and 2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-dione in the presence of molecular iodine under solvent-free conditions. The results indicated that the yields ranged from 73% to 91% at 80 °C for 3.0~6.0 h using 10 mol% iodine (relative to the substrate of 2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-dione). Furthermore, the present procedure with high yields was milder conditions and simpler post-treatment process.

Keywords molecular iodine; solvent-free; three component condensation reaction; spiro heterobicyclic compounds

3,3-二甲基-二苯基-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮系属螺杂双环衍生物,是构成一些含螺环结构天然化合物的结构单元^[1,2].由于在抗病毒、抗肿瘤、降血压、临床麻醉表现出广泛生物或药理活性^[3,4],已引起人们的极大关注.随着人们对该类杂环化合物的深入研究和广泛应用,发展和筛选具有新型结构和低毒高效药理活性的螺杂双环衍生物,已成为氧杂或氮杂杂环化合物研究领域的热点.3,3-二甲基-二苯基-2,4-二氧杂-8,10-二氮杂螺[5.5]十一烷-1,5,9-三酮作为螺杂双环衍生物的典型代表,一般由苯甲醛、尿素和 2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮在碘^[5]、NBS/AIBN^[6]、TMSCl^[7]、磷钨钼杂多酸^[8,9]、纤维素磺酸^[10]、二苯基氨

基三氟甲磺酸离子液体^[11]等催化剂的催化作用或无催化剂微波辐射三组分缩合而得^[12].由于反应时间长,易生成双取代缩合产物或 Michael 加成产物而降低反应收率,产物很难分离,需要用过量的醛来减少副产物的生成,因此发展绿色、简便和高效合成的新方法势在必行.

分子碘作为一种特殊的 Lewis 催化剂,具有温和、高效、环境友好、廉价易得及易于操作等优点.它已广泛用于绿色化学、药物合成及新型有机催化等领域^[13~15].我们课题组曾用分子碘进行了 Knoevenagel 缩合^[16]及多组分反应^[17]反应,发现其具有较好的催化活性和高选择性.基于此,笔者发展了以分子碘为催化剂,通过芳香醛、硫脲和 2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二

* E-mail: gotoxzh@163.com

Received October 10, 2015; revised December 3, 2015; published online January 21, 2016.

Project supported by the National Science and Technology Project (No. 2001BA323C) and the Graduate Innovation Foundation of Jiangxi Province (No. YC2015-B023).

国家科技攻关计划(No. 2001BA323C)和江西省研究生创新基金(No. YC2015-B023)资助项目.

酮(麦氏酸)三组分缩合反应合成 3,3-二甲基-二苯基-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮衍生物的简单、有效的方法. 合成路线见 Scheme 1.

图式 1 化合物 4a~4f 和 4h 的合成
Scheme 1 Synthesis of 4a~4f and 4h

1 结果与讨论

首先, 以苯甲醛、硫脲和 2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮为反应模型, 考察了不同溶剂、无溶剂、催化剂用量、反应时间和反应温度对反应的影响, 其结果见表 1. 从表 1 可以看出, 溶剂的极性对反应有一定的影响, 此反应在极性溶剂中的收率高于非极性溶剂中的收率, 但在无溶剂条件下收率最高(表 1, Entries 1~9). 催化剂的用量对反应的影响明显(表 1, Entries 9~14), 发现随着催化剂用量的增加, 收率提高显著. 当催化剂用量为 10%时, 收率达到 91%, 继续增加催化剂用量达到 12%时, 收率仍为 91%. 当无催化剂时, 在相同反应条件下, 收率仅为 54%. 反应温度和反应时间对产物收率影响的结果表明, 最佳反应温度为 80 °C, 最佳反应时间为 4.0 h. 综上所述, 优化的反应条件是: 在无溶剂条件下, 以 10 mol%碘作为催化剂, 反应原料苯甲醛、硫脲、2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮的物质的量之比为 2 : 1 : 1, 反应温度为 80 °C, 最佳反应时间为 4.0 h.

产物 4a 的结构经 IR, ^1H NMR, ^{13}C NMR 和 ESI-MS 分析确证. 在红外光谱中, 3200、3060 cm^{-1} 为 NH 特征伸缩振动吸收峰; 1771、1734 cm^{-1} 为 C=O 的伸缩振动吸收峰; 1622 cm^{-1} 为 C=S 的伸缩振动吸收峰. 核磁共振氢谱中, 在 δ 8.97 出现 NH 的单峰; 在 δ 7.18~7.39 出现芳氢的多重峰; 在 δ 5.32 出现 CH 的单峰; 在 δ 0.50 出现 CH_3 的单峰. 核磁共振碳谱分析与其结构相吻

表 1 化合物 4a 合成条件的优化^a

Table 1 Optimization of reaction conditions for the synthesis of 4a

Entry	Solvent	I_2 (mol%)	Temp./°C	Time/h	Yield ^b /%
1	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	I_2 (10)	Reflux	6.0	76
2	CH_3OH	I_2 (10)	Reflux	6.0	75
3	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$	I_2 (10)	Reflux	6.0	70
4	CH_3CN	I_2 (10)	Reflux	6.0	69
5	1,4-Dioxane	I_2 (10)	Reflux	6.0	62
6	THF	I_2 (10)	Reflux	6.0	64
7	C_6H_6	I_2 (10)	Reflux	6.0	60
8	CH_2Cl_2	I_2 (10)	Reflux	6.0	56
9	None	I_2 (10)	80	4.0	91
10	None	I_2 (10)	60	4.0	86
11	None	I_2 (10)	90	4.0	87
12	None	I_2 (10)	100	4.0	54
13	None	I_2 (5)	80	5.0	70
14	None	I_2 (8)	80	4.0	86
15	None	I_2 (12)	80	5.0	91

^a Reaction conditions: benzaldehyde (10 mmol), thiourea (5 mmol), 2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-dione (5 mmol), solvent (15 mL) or solvent-free; ^b isolated yield.

合. ESI-MS 也证明了较强的 397.1 $[\text{M}+\text{H}]$ 峰存在. 我们培养了 4a 的单晶并进行了 X 射线单晶衍射, 图 1 为 4a 的分子结构透视图. 在分子结构中两个芳香基团为顺式结构, 与之相连接的六元环为呈扭椅式构象.

图 1 4a 的分子结构透视图
Figure 1 X-ray crystal structure of 4a

接下来, 在以上优化的反应条件下, 取苯甲醛 10 mmol、硫脲 5 mmol、2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮 5 mmol、催化剂用量 10 mol%、反应温度为 80 °C、反应时间为 4.0 h, 考察了碘、 $\text{H}_6\text{GeW}_{10}\text{V}_2\text{O}_{40}$ 、NBS/AIBN 及对甲苯磺酸等催化剂对合成 3,3-二甲基-二苯基-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮的影响, 实验结果见表 2. 从表 2 可看出, $\text{H}_6\text{GeW}_{10}\text{V}_2\text{O}_{40}$ 、对甲苯磺

酸、NBS/AIBN 及乙酸的催化效果较差, 产品收率低, 分子碘催化效果较好, 因此选择 10 mol% 分子碘作为最佳催化剂。

表 2 不同催化剂的催化活性比较^a

Table 2 Comparison of catalytic activity of different catalyst

Entry	Catalyst (mol%)	Yield ^b /%
1	—	54
2	NBS/AIBN (10)	76
3	4-CH ₃ C ₆ H ₄ SO ₃ H (10)	65
4	H ₆ GeW ₁₀ V ₂ O ₄₀ (10)	80
5	Acetic acid (10)	73
6	I ₂ (10)	91

^a Reaction conditions: aromatic aldehyde (10 mmol), thiourea (5 mmol), 2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-diones (5 mmol), temperature 80 °C, reaction time 4.0 h, solvent-free conditions; ^b isolated yield.

同时, 为了探讨分子碘对该反应的普适性, 在上述优化反应条件下, 通过改变不同芳香醛与硫脲、2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮进行三组分缩合反应, 合成了 6 种螺杂双环衍生物 **4a**~**4f**。从表 3 数据可以看出, 在分子碘催化条件下, 芳香醛大多能反应均可以顺利进行, 并以 73%~91% 的高收率得到相应的 3,3-二甲基-二苯基-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮衍生物。带吸电子基的芳香醛反应速度快于带供电子基的芳香醛, 对于带有强供电基团如 4-甲氧基苯甲醛也能以 73% 的收率得到目标产物。另外在实验中发现对于空间位阻较大的芳香醛如 2-硝基苯甲醛仅能发生 Knoevenagel 缩合反应。

表 3 化合物 **4a**~**4f** 和 **4h** 的合成^a

Table 3 Synthesis of **4a**~**4f** and **4h**

Entry	Product	R	Time/h	Yield ^c /%
1	4a	C ₆ H ₅	4.0	91
2	4b	4-FC ₆ H ₄	3.0	85
3	4c	4-ClC ₆ H ₄	3.5	88
4	4d	4-CH ₃ C ₆ H ₄	5.0	76
5	4e	4-NO ₂ C ₆ H ₄	3.0	83
6	4f	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	6.0	73
7	4h ^b	2-NO ₂ C ₆ H ₄	3.0	79

^a Reaction conditions: aromatic aldehyde (10 mmol), thiourea (5 mmol), 2,2-dimethyl-1,3-dioxane-4,6-diones (5 mmol), iodine 10 mol%, temperature 80 °C, solvent-free conditions; ^b observed Knoevenagel reaction product; ^c isolated yield.

此外, 根据产物的结构和反应的特点, 参考文献 [18, 19] 的方法, 笔者认为苯甲醛的取代基效应对发生三组分缩合反应可能存在不同的反应机理 (Scheme 2)。对位取代苯甲醛 **3a**~**3f** 与硫脲 **1** 在分子碘的催化下亲核加成快速脱去一分子 H₂O 而形成缩合产物硫酰基亚胺中间体 **5**。2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮与硫酰基亚

胺中间体 **5** 发生 Michael 加成类似反应形成中间体 **6**。中间体 **6** 带部分正电荷的 α -C, 当芳环上有吸电子取代基时, 其 α -C 的正电性增加, 使反应速度加快, 同时中间体 **6** 继续与另一分子苯甲醛发生脲醛缩合反应, 形成中间体 **7**, 再发生 Michael 加成类似反应得目标产物 **4a**~**4f**。2-硝基苯甲醛可能经过反应途径 B, 在分子碘的催化下通过 Knoevenagel 缩合反应快速脱去一分子 H₂O 达到目标产物 **4h**, 由于空间位阻的影响而不能与硫脲 **1** 进一步发生 Michael 加成类似反应。不过, 该机理还需要进一步研究和论证。

2 结论

在无溶剂条件下采用碘催化不同芳香醛与硫脲和 2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮发生三组分缩合反应, 有效合成了 6 种 3,3-二甲基-二苯基-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮衍生物, 并确定了较好的反应条件: 当反应原料苯甲醛、硫脲与 2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮的物质的量之比为 2 : 1 : 1, 催化剂的用量为 10 mol% 时, 80 °C 反应 3.0~6.0 h, 产品收率为 73%~91%。该方法不仅是对 Biginelli 三组分缩合反应的重要拓展, 而且具有操作简单、反应时间短、收率高等优点。

3 实验部分

3.1 试剂与仪器

2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮按文献[20]制备; 苯甲醛、4-甲基苯甲醛、4-氯苯甲醛、4-氟苯甲醛、3-氯苯甲醛、4-硝基苯甲醛、2-硝基苯甲醛及 4-甲氧基苯甲醛为分析纯; 其它均为化学纯。

瑞士 BuchiB-540 型显微熔点仪(温度计未经校正); 德国 Bruker 400 MHz 型核磁共振仪(DMSO-*d*₆ 为溶剂, TMS 为内标); 日本岛津 FT-IR-8400 型红外仪(KBr 压片); MS 谱由 ABI 公司 API3200 三重四级杆质谱仪记录; 单晶 X 射线衍射在 Siemens 公司 P4 型四圆衍射仪上进行。

3.2 3,3-二甲基-二苯基-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮衍生物 **4a**~**4f** 的合成

在 50 mL 三颈烧瓶中加入芳香醛 10 mmol、硫脲 (0.38 g, 5 mmol)、2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮 5 mmol 和碘催化剂 10 mol%(相对于 2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮的摩尔分数), 加热于 80 °C 反应 3.0~6.0 h。反应完毕, 加入 5% 硫代硫酸钠水溶液 20 mL, 搅拌洗涤、过滤, 滤饼用 20 mL 蒸馏水洗涤, 乙酸乙酯重结晶, 干燥得目标化合物 **4a**~**4f**。

图式 2 碘催化下生成化合物 4a~4f 和 4h 的可能机理

Scheme 2 Possible mechanisms for the formation of 4a~4f and 4h

3,3-二甲基-二苯基-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮(4a): 白色固体, 1.68 g, 收率 91%. m.p. 204~206 °C; ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 0.50 (s, 6H), 5.32 (s, 2H), 7.18~7.39 (m, 10H), 8.97 (s, 2H, NH); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 28.15, 56.84 (C_{spiro}), 61.98, 106.35, 128.35, 129.22, 129.93, 134.72, 160.14, 165.74, 177.98; IR (KBr) ν : 3200, 3060, 1770, 1734, 1653, 1209 cm^{-1} ; ESI-MS m/z : 397.1 $[\text{M}+\text{H}]^+$.

3,3-二甲基-二(4-氟苯基)-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮(4b): 白色固体, 1.84 g, 收率 85%. m.p. 208~210 °C; ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 0.61 (s, 6H), 5.34 (s, 2H), 7.19~7.30 (m, 8H), 9.04 (s, 2H, NH); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 28.30, 56.88 (C_{spiro}), 61.25, 106.45, 116.05, 116.27, 130.59, 130.68, 130.86, 130.89, 160.27, 161.83, 164.28, 165.67, 177.93; IR (KBr) ν : 3228, 3074, 1767, 1735, 1653, 1228 cm^{-1} ; ESI-MS m/z : 433.1 $[\text{M}+\text{H}]^+$.

3,3-二甲基-二(4-氯苯基)-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮(4c): 白色固体, 2.04 g, 收率 88%. m.p. 208~209 °C; ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 0.62 (s, 6H), 5.35 (s, 2H), 7.18 (d, $J=8.0$ Hz, 4H), 7.51 (d, $J=8.0$ Hz, 4H), 9.08 (s, 2H, NH); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 28.29, 56.62 (C_{spiro}), 61.26, 106.52, 129.27, 130.29, 133.57, 134.60, 160.11, 165.52,

177.96; IR (KBr) ν : 3220, 3067, 1767, 1735, 1595, 1296 cm^{-1} ; ESI-MS m/z : 465.0 $[\text{M}+\text{H}]^+$.

3,3-二甲基-二(4-甲基苯基)-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮(4d): 白色固体, 1.61 g, 收率 76%. m.p. 222~224 °C; ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 0.54 (s, 6H), 2.27 (s, 6H), 5.24 (s, 2H), 7.06 (d, $J=8.0$ Hz, 4H), 7.20 (d, $J=8.0$ Hz, 4H), 8.87 (s, 2H, NH); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 21.16, 28.21, 56.88 (C_{spiro}), 61.77, 106.30, 128.20, 129.37, 129.65, 131.72, 139.38, 160.21, 165.86, 177.89; IR (KBr) ν : 3148, 3049, 1769, 1735, 1554, 1204 cm^{-1} ; ESI-MS m/z : 425.1 $[\text{M}+\text{H}]^+$.

3,3-二甲基-二(4-硝基苯基)-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮(4e): 淡黄色固体, 2.01 g, 收率 83%. m.p. 232~234 °C; ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 0.57 (s, 6H), 5.59 (s, 2H), 7.47 (d, $J=8.0$ Hz, 4H), 8.32 (d, $J=8.0$ Hz, 4H), 9.34 (s, 2H, NH); ^{13}C NMR (100 MHz, $\text{DMSO}-d_6$) δ : 27.38, 55.15 (C_{spiro}), 60.17, 105.78, 122.97, 123.29, 129.07, 129.29, 140.61, 147.59, 158.84, 164.07, 176.94; IR (KBr) ν : 3220, 3084, 1767, 1740, 1607, 1285 cm^{-1} ; ESI-MS m/z : 487.1 $[\text{M}+\text{H}]^+$.

3,3-二甲基-二(4-甲氧基苯基)-2,4-氧杂-8,10-氮杂螺[5.5]十一烷-1,5-二酮-9-硫酮(4f): 淡黄色固体, 1.66 g, 收率 73%. m.p. 188~190 °C; ^1H NMR (400 MHz,

DMSO- d_6) δ : 0.60 (s, 6H), 3.73 (s, 6H), 5.22 (s, 2H), 6.96 (d, $J=8.0$ Hz, 4H), 7.09 (d, $J=8.0$ Hz, 4H), 8.84 (s, 2H, NH); ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO- d_6) δ : 27.23, 54.68, 56.00 (C_{spiro}), 60.46, 105.20, 113.13, 113.48, 125.41, 128.50, 159.34, 159.42, 164.89, 176.76; IR (KBr) ν : 3205, 3060, 1766, 1734, 1653, 1247 cm^{-1} ; ESI-MS m/z : 457.1 $[\text{M}+\text{H}]^+$.

5-(2-硝基苯基亚甲基)-2,2-二甲基-1,3-二噁烷-4,6-二酮(**4h**): 淡黄色固体, 1.09 g, 收率 79%. m.p. 116~117 $^{\circ}\text{C}$; ^1H NMR (400 MHz, DMSO- d_6) δ : 8.78 (s, 1H), 8.30 (d, $J=8.30$ Hz, 1H), 7.75 (t, $J=7.48$ Hz, 1H), 7.61 (d, $J=7.90$ Hz, 1H), 7.50 (d, $J=7.50$ Hz, 1H), 1.81 (s, 6H); ^{13}C NMR (100 MHz, DMSO- d_6) δ : 28.12, 105.69, 117.42, 124.33, 129.60, 129.88, 130.46, 133.47, 145.96, 154.85, 161.02; IR (KBr) ν : 2965, 2925, 1762, 1737, 1640, 1604, 1524, 1380, 1350, 725 cm^{-1} .

3.3 X射线衍射实验

晶体结构的测定在 Siemens P4 型四圆衍射仪上进行. 将 0.56 mm $\times$ 0.54 mm $\times$ 0.42 mm 白色棱形单晶置于四圆衍射仪上, 用石墨单色器单色化的 Mo K α ($\lambda=0.071073$ nm) 辐射, 以 $\omega/2\theta$ 扫描方式在 $1.71^{\circ}<\theta<26.00^{\circ}$ 范围内收集个 4079 衍射点, 其中独立衍射点 3279 个($R_{\text{int}}=0.0137$), 可观测衍射点 1633 个 $[I>2\sigma(I)]$.

辅助材料(Supporting Information) 目标化合物 **4a**~**4f** 的 ^1H NMR、 ^{13}C NMR 图谱. 这些材料可以免费从本刊网站(<http://sioc-journal.cn/>)上下载.

References

- [1] Rovnyak, G. C.; Kimball, S. D.; Barbara, B.; Gabriella, C.; John, D. D.; Jack, G.; Anders, H.; Mary, M.; James, P. M. *J. Med. Chem.* **1995**, 38, 19.
- [2] Snider, B. B.; Shi, Z. *J. Org. Chem.* **1993**, 58, 3828.
- [3] Arimoto, H.; Hayakawa, I.; Kuramoto, M.; Uemure, D. *Tetrahedron Lett.* **1998**, 39, 861.
- [4] Chou, T.; Kuramoto, M.; Otani, Y.; Shkano, M.; Yazawa, K.; Uemere, D. *Tetrahedron Lett.* **1996**, 37, 3867.
- [5] Dipak, P.; Debajyoti, B.; Mukut, G.; Hu, W. H. *Mol. Diversity* **2011**, 15, 257.
- [6] Srinivasa, R. J.; Divya, V.; Shubha, J. *J. Chem. Pharm. Res.* **2012**, 4, 2373.
- [7] Zhu, Y. L.; Huang, S. L.; Pan, Y. J. *Eur. J. Org. Chem.* **2005**, 2354.
- [8] Srinivasa, R. J.; Divya, V.; Shubha, J. *J. Catal.* **2013**, 2013, 1.
- [9] Xu, Z. H.; Tu, Y. H. *Chin. J. Org. Chem.* **2015**, 35, 1357 (in Chinese). (许招会, 涂缘鸿, 有机化学, **2015**, 35, 1357.)
- [10] Naser, M.; Khalil, P.; Masoud, B.; Soudabeh, K. *Asian J. Chem.* **2013**, 25, 3373.
- [11] Li, J. J.; Sun, J.; Su, W. K. *Lett. Org. Chem.* **2010**, 7, 14.
- [12] Dhevalapally, B. R.; Carlos, F. B. *Chem. Eur. J.* **2004**, 10, 5323.
- [13] Dohi, T.; Kita, Y. *Chem. Commun.* **2009**, 28, 2073.
- [14] Xu, W. J.; Zhang, W. S.; Yan, J. L. *Chin. J. Appl. Chem.* **2011**, 28, 1143 (in Chinese). (许文静, 张文龙, 闫金龙, 应用化学, **2011**, 28, 1143.)
- [15] Wang, D. L.; Dong, Z.; Liu, Z.; Yang, F. F. *Chin. J. Org. Chem.* **2014**, 34, 783 (in Chinese). (王道林, 董哲, 刘忠, 杨菲菲, 有机化学, **2014**, 34, 783.)
- [16] Yan, N.; Xu, Z. H.; Liu, B. *Chin. J. Spec. Petrochem.* **2010**, 27, 45 (in Chinese). (严楠, 许招会, 刘百强, 精细石油化工, **2010**, 27, 45.)
- [17] Xu, Z. H.; Lin, C. H.; Liao, W. L. *Chin. J. Appl. Chem.* **2015**, 32, 278 (in Chinese). (许招会, 林春花, 廖维林, 应用化学, **2015**, 32, 278.)
- [18] Bandgar, B. P.; Shaikh, K. A. *Tetrahedron Lett.* **2003**, 44, 1959.
- [19] Ahmad, S.; Ayoob, B.; Hamid, R. B. *Mol. Diversity* **2004**, 8, 141.
- [20] Yan, N.; Xiong, B.; Liao, W. L.; Xu, Z. H. *Chin. J. Org. Chem.* **2010**, 30, 1391 (in Chinese). (严楠, 熊斌, 廖维林, 许招会, 有机化学, **2010**, 30, 1391.)

(Li, L.; Fan, Y.)