3-卤-4-脂肪胺基-5-联苯氧基-2(5H)-呋喃酮的合成

叶 斌^a 莫广珍^{b,c} 关丽涛^d 吴彦城^b 陈任宏^{*,a} 汪朝阳^{*,b}^(a) 广东食品药品职业学院 广州 510520)^(b) 华南师范大学化学与环境学院 教育部环境理论化学重点实验室 广州 510006)^(c) 佛山市顺德一中实验学校 顺德 528300)^(d) 华南农业大学材料与能源学院 广州 510642)

摘要 以硫酸为催化剂, 4-羟基联苯与粘卤酸在甲苯溶剂中回流, 经脱水醚化反应合成了 3,4-二卤-5-联苯氧基-2(5H)-呋喃酮化合物. 以这 2 个新型的中间体与不同的代表性脂肪胺类在 KF 催化的室温条件下, 通过串联的迈克尔加成-消除反应, 得到了 16 个新的 3-卤-4-脂肪胺基-5-联苯氧基-2(5H)-呋喃酮化合物, 产率 43%~79%(大部分 55%以上). 新化合物的结构经 FTIR、UV、¹H NMR、¹³C NMR、MS 和元素分析确证.

关键词 2(5H)-呋喃酮; 联苯结构; 合成; 脂肪胺; 串联迈克尔加成-消除反应

Synthesis of 4-Amino-5-biphenyloxy-3-halo-2(5H)-furanones

Ye, Bin^a Mo, Guangzhen^{b,c} Guan, Litao^d Wu, Yancheng^b
Chen, Renhong^{*,a} Wang, Zhaoyang^{*,b}^(a) Guangdong Food and Drug Vocational College, Guangzhou 510520)^(b) Key Laboratory of Theoretical Chemistry of Environment, Ministry of Education, School of Chemistry and Environment, South China Normal University, Guangzhou 510006)^(c) Shunde No. 1 Experimental Middle School, Shunde 528300)^(d) College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642)

Abstract Two novel 5-biphenyloxy-3,4-dihalo-2(5H)-furanones are synthesized via the direct dehydrative etherification reactions of biphenyl-4-ol with mucochloric acid and mucobromic acid, respectively, using sulfuric acid as a catalyst in toluene at reflux temperature. Taking them as intermediates, the tandem Michael addition-elimination reaction with different representative aliphatic amines is carried out in the presence of KF as a base and catalyst at room temperature. Sixteen 4-amino-5-biphenyloxy-3-halo-2(5H)-furanones are obtained, and the isolated yields are 43%~79% (mostly over 55%). The structures of all newly synthesized compounds were systematically characterized by FTIR, UV, ¹H NMR, ¹³C NMR, MS and elemental analysis. This investigation affords an important novel strategy for the synthesis of different 2(5H)-furanone derivatives having potential bioactivity, especially for the synthesis of 2(5H)-furanones simultaneously with biphenyl and amino structure.

Keywords 2(5H)-furanone; biphenyl structure; synthesis; aliphatic amine; tandem Michael addition-elimination reaction

2(5H)-呋喃酮结构单元广泛存在于天然产物^[1]与药物分子^[2~4]中, 使 2(5H)-呋喃酮化合物的合成在药物开发中近来受到广泛关注^[5~8]. 许多联苯类化合物(图 1)具有抗菌、抗癌等生物活性^[2,9], 使联苯结构单元在药物分

子的设计与合成中最近也越来越受到重视^[10,11]. 但是, 目前仅有极少的文献报道将 2(5H)-呋喃酮结构与联苯结构同时构建于潜在生物活性分子中的研究^[2,11].

因此, 在前期 2(5H)-呋喃酮化学研究的基础上^[6,12],

* E-mail: wangzy@scnu.edu.cn, chenrh@gdyzy.edu.cn

Received May 18, 2015; revised June 27, 2015; published online July 8, 2015.

Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province (Nos. 2014A030313429, S2011010001556), the 3rd Talents Special Funds of Guangdong Higher Education (No. Guangdong-Finance-Education [2011]431), the National Natural Science Foundation of China (No. 31200439) and the Natural Science Project of Guangdong Food and Drug Vocational College (No. 2014YZ007).

广东省自然科学基金(Nos. 2014A030313429, S2011010001556)、广东省高等学校人才引进专项资金(No. 粤财教[2011]431 号)、国家自然科学基金(No. 31200439)、广东食品药品职业学院自然科学研究(No. 2014YZ007)资助项目.

图1 一些具有联苯结构单元的生物活性化合物
Figure 1 Some bioactive compounds with biphenyl unit

特别是基于针对2(5*H*)-呋喃酮类合成子5-位进行修饰改造而引入联苯结构的研究^[11], 本文继续通过5-位、4-位连续进行修饰而设计、合成了系列同时含有2(5*H*)-呋喃酮和联苯两种生物活性单元的新2(5*H*)-呋喃酮衍生物5 (Scheme 1). 系列新化合物的合成(含化合物3), 一方面继续为研究较少的2(5*H*)-呋喃酮类合成子5-位修饰^[5,13]与不同羟基化合物合成芳香醚类^[11,14]提供了参考, 同时也为下一步生物活性测试中与前文^[11]对比研究不同位点烷基修饰带来的生物活性影响奠定了基础.

图式1 目标化合物5的合成路线
Scheme 1 The synthetic route of target compounds 5

1 结果与讨论

1.1 目标化合物的合成

化合物3是参考文献^[11]的反应条件进行合成的 (Scheme 1), 产率46%~54%, 这进一步表明以廉价易

得的 H_2SO_4 作为催化剂应用于酚类化合物与多官能团羟基化合物的直接脱水醚化是可行的. 以化合物3为中间体与不同的代表性脂肪胺4进行串联 Michael 加成-消除反应, 参考文献^[15]的反应条件进行 (TLC 跟踪, 室温反应 12~24 h), 以 43%~79% 的分离产率 (绝大部分等于或高于 55%, 表 1), 获得了目标产物 3-卤-4-脂肪胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(5a~5p) (Scheme 1).

2(5*H*)-呋喃酮中间体3与亲核试剂脂肪胺4的反应是先经过 Michael 加成反应, 再经消除反应, 最终生成目标产物5^[15]. 由表1可知, 以3,4-二溴-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(3b)为中间体而胺类化合物4相同时, 化合物5的产率通常比中间体系为3,4-二氯-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(3a)时的高 (如5c vs 5d、5g vs 5h、5i vs 5j、5k vs 5l、5m vs 5n、5o vs 5p等), 其原因可能是消除反应为决速步; 而在这一过程中, 溴原子较氯原子更易离去.

此外, 不同的脂肪胺4与相同的3,4-二卤-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮中间体3反应时, 也会对目标化合物5的产率有较大的影响. 一般而言, 长链脂肪胺4的反应效果普遍比短链脂肪胺的反应效果好, 如5k~5p的产率都在63%以上 (表1, Entries 11~16), 而5a~5j中大部分低于60% (表1, Entries 1~10). 究其原因, 可能是因为长烷基链具有更好的推电子作用, 有利于脂肪胺4作为一个更有效的亲核试剂进行第一步的 Michael 加成反应.

另外, 当丙烯胺4b与3,4-二溴-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(3b)反应时, 由于丙烯胺的特殊结构和溴代2(5*H*)-呋喃酮中间体共同影响, 使得5d的收率达到最高 (79%, 表1, Entry 4).

1.2 新目标化合物的结构表征

红外光谱中, 化合物吸收峰在3360~3260 cm^{-1} 处为N—H伸缩振动峰, 在3190~3030 cm^{-1} 处的吸收是不饱和C—H的伸缩振动吸收峰, 在2930~2850 cm^{-1} 处的吸收是饱和C—H的伸缩振动吸收峰, 在1763~1745 cm^{-1} 的强吸收峰为C=O伸缩振动吸收峰, 在1660~1643 cm^{-1} 强的吸收峰为C=C伸缩振动吸收峰, 在1605~1450 cm^{-1} 处吸收峰为苯环骨架伸缩振动峰, 在1355~1368 cm^{-1} 左右的吸收峰为C—N伸缩振动吸收峰.

同时, 1305~1004 cm^{-1} 处的吸收是C—O—C伸缩振动, 975~940 cm^{-1} 处的吸收是C—O—C弯曲振动, 830 cm^{-1} 左右有苯环对二取代的吸收峰, 768和698 cm^{-1} 左右有苯环单取代的吸收峰. 另外, 在740 cm^{-1} 左右有C—Cl的伸缩振动吸收峰, 500~520 cm^{-1} 处为C—Br键的伸缩振动吸收峰. 因此, 红外测试结果表明, 目

表 1 目标化合物 5 的产率^a
Table 1 The yields of target compounds 5

Entry	3	4	5	Yield ^b /%
1	3a	NH ₂ CH ₂ CH ₃ (4a)	5a	60
2	3b	4a	5b	46
3	3a	NH ₂ CH ₂ CH=CH ₂ (4b)	5c	59
4	3b	4b	5d	79
5	3a	4c	5e	63
6	3b	4c	5f	55
7	3a	NH ₂ (CH ₂) ₆ CH ₃ (4d)	5g	46
8	3b	4d	5h	57
9	3a	NH ₂ (CH ₂) ₇ CH ₃ (4e)	5i	43

续表

Entry	3	4	5	Yield ^b /%
10	3b	4e	5j	55
11	3a	NH ₂ (CH ₂) ₉ CH ₃ (4f)	5k	66
12	3b	4f	5l	72
13	3a	NH ₂ (CH ₂) ₁₁ CH ₃ (4g)	5m	63
14	3b	4g	5n	78
15	3a	NH ₂ (CH ₂) ₁₃ CH ₃ (4h)	5o	69
16	3b	4h	5p	72

^a Reaction conditions: aliphatic amine **4** (0.30 mmol), 5-biphenyloxy-3,4-dihalo-2(5H)-furanone **3** (0.25 mmol), THF (6 mL), KF (0.30 mmol), room temperature, 12~24 h; ^b isolated yield.

标化合物 **5a**~**5p** 都含有 2(5H)-呋喃酮环、联苯、C—X 键和胺基等结构(Scheme 1).

类似地, 264~269 nm 范围的强紫外吸收表明目标化合物 **5** 中存在 C=C—C=O 等共轭结构. 在 ¹H NMR 中, δ 6.13~6.25 有 2(5H)-呋喃酮环结构的 5-位氢存在; 而在 δ 4.96~5.46 处有胺基上 N—H 的吸收峰. 结合其他结构表征, 说明在该反应条件下 2(5H)-呋喃酮环结构没有受到影响而开环. 不仅如此, 化合物 **5c**~**5f** 在 δ

5.17~5.99 处有=C—H 的吸收峰.

另外, ¹³C NMR 和元素分析数据和相应的理论值一致, 进一步证明了化合物 **5** 为目标化合物. 更重要的是, 这些结构表征表明, 尽管 3,4-二卤-5-联苯氧基-2(5H)呋喃酮(**3**)上含有多种敏感基团, 如羰基、卤素、双键、杂环、醚键、芳环、内酯等, 但该碱催化的串联 Michael 加成-消除反应仍是可行的, 而且使用不饱和胺 **4b**、**4c** 时还可引入新的双键.

2 结论

在温和而简单的碱催化条件下,通过高效的串联 Michael 加成-消除反应,成功合成了 16 个新的具有联苯结构的 2(5*H*)-呋喃酮化合物,并经较为充分的结构表征和确证。这些含有多生物活性基团的目标化合物的制备,为其下一步的生物活性测试提供了基础。

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

X-5 型显微熔点仪,未校正;德国 Bruker Vector 33 FT-IR 光谱仪,液膜法(CH_2Cl_2);美国 Varian DRX-400 MHz 核磁共振仪(溶剂 CDCl_3 , 内标 TMS);Shimadzu UV-2550 紫外光谱仪;美国 THEROMO LCQ DECA XP MAX 质谱仪;美国 Thermo Flasher TM 112 元素分析仪。所有试剂均为市售分析纯,未经进一步纯化。化合物 **1**,以呋喃甲醛等市售试剂为原料,参考文献[6, 11, 12, 15]等进行合成。

3.2 实验方法

3.2.1 中间体 **3** 的合成

参考文献[11]方法,在 100 mL 圆底烧瓶中加入 2.5 mmol 粘卤酸 **1** 和 3 mmol 联苯酚 **2**,溶于 60 mL 无水甲苯中,滴加 1~2 滴浓硫酸,恒温磁力搅拌回流 48 h。反应结束后,减压旋干甲苯,粗产品分别用饱和碳酸氢钠、去离子水洗涤,乙酸乙酯萃取有机层。有机层用无水硫酸镁干燥,柱层析分离得到目标化合物 **3a**~**3b**。

3,4-二氯-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**3a**):白色固体,产率 54%。m.p. 124.5~126.1 °C; UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 249 nm; ^1H NMR (CDCl_3 , 400 MHz) δ : 6.23 (s, 1H), 7.20 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.33 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.38~7.45 (m, 2H), 7.50~7.58 (m, 4H); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 100 MHz) δ : 98.1, 116.9, 123.8, 125.9, 126.4, 127.6, 127.8, 136.9, 139.0, 145.9, 154.1, 161.6; IR (film) ν : 3030, 2970, 2850, 1799, 1638, 1607, 1514, 1485, 1265, 1215, 1096, 978, 833, 762, 746, 696 cm^{-1} 。Anal. calcd for $\text{C}_{16}\text{H}_{10}\text{Cl}_2\text{O}_3$: C 59.84, H 3.14; found C 59.78, H 3.12。

3,4-二溴-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**3b**):白色固体,产率 46%。m.p. 95.6~97.4 °C; UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 250 nm; ^1H NMR (CDCl_3 , 400 MHz) δ : 6.25 (s, 1H), 7.22 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.34 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.40~7.46 (m, 2H), 7.52~7.60 (m, 4H); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 100 MHz) δ : 101.5, 117.9, 119.2, 127.0, 127.4, 128.6, 128.9, 137.9, 140.1, 142.6, 155.3, 163.6; IR (film) ν : 3073, 2922, 2851, 1784, 1612, 1589, 1524, 1487, 1269, 1228, 1196, 968, 837, 758, 690, 496 cm^{-1} 。Anal. calcd for $\text{C}_{16}\text{H}_{10}\text{Br}_2\text{O}_3$: C 46.86,

H 2.46; found C 46.73, H 2.30。

3.2.2 目标化合物 **5** 的合成

50 mL 二颈烧瓶中加入 0.25 mmol 中间体 3,4-二卤-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**3**),抽真空, N_2 保护下加入 6 mL 新蒸馏过的 THF 溶解,加入 0.30 mmol 脂肪胺 **4**,再加入 0.30 mmol 碱 KF, TLC 跟踪,反应时间一般为 12~24 h (大部分 12 h 即可)。反应完毕,用饱和食盐水洗涤、二氯甲烷萃取处理,得到的有机层用蒸馏水洗涤、无水硫酸镁干燥后,减压旋干,柱层析分离,得到目标化合物 **5a**~**5p**。

3-氯-4-乙胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5a**):淡黄色固体,产率 60%。m.p. 44.2~45.8 °C; UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 265 nm; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 1.35 (t, $J=8.0$ Hz, 3H), 3.52~3.67 (m, 2H), 5.35 (b, 1H), 6.23 (s, 1H), 7.21 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.34 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.41~7.46 (m, 2H), 7.53~7.59 (m, 4H); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 100 MHz) δ : 13.7, 31.9, 95.7, 101.0, 117.2, 126.9, 127.3, 128.6, 128.8, 137.3, 142.3, 147.9, 155.2, 161.7; IR (film) ν : 3354, 3186, 3078, 2928, 2857, 1757, 1647, 1605, 1514, 1485, 1358, 1265, 1221, 1184, 1076, 966, 837, 766, 743, 698 cm^{-1} ; ESI-MS m/z (%): 328.17 ($[\text{M}-\text{H}]^-$, 100)。Anal. calcd for $\text{C}_{18}\text{H}_{16}\text{ClNO}_3$: C 65.56, H 4.89, N 4.25; found C 65.57, H 4.96, N 4.19。

3-溴-4-乙胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5b**):淡黄色固体,产率 46%。m.p. 45.8~47.1 °C; UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 269 nm; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 1.35 (t, $J=8.0$ Hz, 3H), 3.42~3.65 (m, 2H), 5.01 (b, 1H), 6.25 (s, 1H), 7.21 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.34 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.40~7.47 (m, 2H), 7.52~7.59 (m, 4H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 16.0, 39.3, 79.5, 95.9, 117.2, 126.9, 127.3, 128.6, 128.8, 137.3, 140.2, 155.3, 156.1, 166.9; IR (film) ν : 3320, 3078, 3036, 2922, 2851, 1757, 1643, 1602, 1514, 1485, 1356, 1265, 1217, 1190, 1095, 951, 837, 764, 698, 503 cm^{-1} ; ESI-MS m/z (%): 372.15 ($[\text{M}-\text{H}]^-$, 99)。Anal. calcd for $\text{C}_{18}\text{H}_{16}\text{BrNO}_3$: C 57.77, H 4.31, N 3.74; found C 57.86, H 4.42, N 3.67。

3-氯-4-烯丙胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5c**):淡黄色固体,产率 59%。m.p. 87.6~88.9 °C; UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 265 nm; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 4.10 (s, 2H), 5.21~5.31 (m, 2H), 5.34 (b, 1H), 5.84~5.99 (m, 1H), 6.22 (s, 1H), 7.17 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.33 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.38~7.46 (m, 2H), 7.50~7.58 (m, 4H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 46.2, 95.1, 100.3, 117.1, 118.0, 126.9, 127.3, 128.5, 128.9, 133.3, 137.2, 140.1, 155.2, 156.3, 166.8; IR (film) ν : 3312, 3078, 3036, 2928,

2857, 1762, 1659, 1601, 1514, 1485, 1358, 1265, 1221, 1194, 1074, 974, 837, 766, 746, 698 cm^{-1} ; ESI-MS m/z (%): 340.29 ($[\text{M}-\text{H}]^-$, 100). Anal. calcd for $\text{C}_{19}\text{H}_{16}\text{ClNO}_3$: C 66.77, H 4.72, N 4.10; found C 66.86, H 4.69, N 4.17.

3-溴-4-烯丙胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5d**): 淡黄色固体, 产率 79%. m.p. 92.5~94.3 $^{\circ}\text{C}$; UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 269 nm; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 4.08 (s, 2H), 5.21~5.29 (m, 2H), 5.46 (b, 1H), 5.85~5.95 (m, 1H), 6.23 (s, 1H), 7.17 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.32 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.38~7.45 (m, 2H), 7.50~7.56 (m, 4H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 46.3, 84.8, 95.9, 117.1, 118.1, 126.9, 127.3, 128.5, 128.9, 133.3, 137.1, 140.1, 155.2, 159.0, 167.1; IR (film) ν : 3306, 3078, 3036, 2928, 2857, 1757, 1647, 1518, 1450, 1358, 1265, 1223, 1190, 1074, 941, 833, 764, 698, 501 cm^{-1} ; ESI-MS m/z (%): 384.24 ($[\text{M}-\text{H}]^-$, 95). Anal. calcd for $\text{C}_{19}\text{H}_{16}\text{BrNO}_3$: C 59.08, H 4.18, N 3.63; found C 59.06, H 4.29, N 3.77.

3-氯-4-(1-环己烯基)乙胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5e**): 淡黄色固体, 产率 63%. m.p. 101.9~103.9 $^{\circ}\text{C}$; UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 265 nm; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 1.57~1.66 (m, 4H), 1.94~2.04 (m, 4H), 2.30 (t, $J=8.0$ Hz, 2H), 3.44~3.69 (m, 2H), 5.01 (b, 1H), 5.18 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 6.19 (s, 1H), 7.19 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.34 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.40~7.46 (m, 2H), 7.53~7.59 (m, 4H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 22.2, 22.7, 25.3, 27.9, 38.4, 41.4, 95.2, 103.1, 117.2, 125.4, 126.9, 127.3, 128.6, 128.8, 133.2, 137.3, 140.2, 152.6, 155.3, 160.6; IR (film) ν : 3264, 3078, 2928, 2857, 1757, 1647, 1535, 1518, 1485, 1368, 1265, 1233, 1188, 1086, 962, 837, 764, 745, 698 cm^{-1} ; ESI-MS m/z (%): 408.45 ($[\text{M}-\text{H}]^-$, 100). Anal. calcd for $\text{C}_{24}\text{H}_{24}\text{ClNO}_3$: C 70.32, H 5.90, N 3.42; found C 70.53, H 5.86, N 3.57.

3-溴-4-(1-环己烯基)乙胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5f**): 淡黄色固体, 产率 55%. m.p. 102.2~103.5 $^{\circ}\text{C}$; UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 267 nm; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 1.57~1.66 (m, 4H), 1.90~1.95 (m, 2H), 2.01~2.06 (m, 2H), 2.29 (t, $J=8.0$ Hz, 2H), 3.41~3.66 (m, 2H), 5.14 (b, 1H), 5.55~5.59 (m, 1H), 6.21 (s, 1H), 7.19 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.34 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.40~7.45 (m, 2H), 7.52~7.58 (m, 4H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 22.2, 22.7, 25.3, 27.9, 38.3, 41.5, 96.0, 101.0, 117.2, 125.5, 126.9, 127.3, 128.6, 128.9, 133.2, 137.2, 140.2, 151.4, 155.3, 168.4; IR (film) ν : 3312, 3073, 3030, 2928, 2857, 1753, 1647, 1601, 1514, 1485, 1358, 1265, 1221, 1074, 1007, 947, 837, 764, 698, 501 cm^{-1} ; ESI-MS

m/z (%): 452.39 ($[\text{M}-\text{H}]^-$, 100). Anal. calcd for $\text{C}_{24}\text{H}_{24}\text{BrNO}_3$: C 63.44, H 5.32, N 3.08; found C 63.35, H 5.46, N 3.17.

3-氯-4-庚胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5g**): 淡黄色固体, 产率 46%. m.p. 56.7~58.3 $^{\circ}\text{C}$; UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 265 nm; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 0.86~0.89 (m, 3H), 1.28~1.33 (m, 8H), 1.63~1.72 (m, 2H), 3.43~3.56 (m, 2H), 5.06 (b, 1H), 6.19 (s, 1H), 7.19 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.34 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.40~7.45 (m, 2H), 7.53~7.58 (m, 4H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 14.0, 22.6, 26.5, 28.9, 30.7, 31.7, 44.3, 87.7, 95.1, 117.1, 126.9, 127.3, 128.5, 128.8, 137.2, 140.2, 149.6, 155.3, 166.3; IR (film) ν : 3323, 3073, 2922, 2856, 1757, 1649, 1602, 1514, 1485, 1362, 1265, 1221, 1194, 1074, 962, 837, 766, 746, 698 cm^{-1} ; ESI-MS m/z (%): 398.45 ($[\text{M}-\text{H}]^-$, 100). Anal. calcd for $\text{C}_{23}\text{H}_{26}\text{ClNO}_3$: C 69.08, H 6.55, N 3.50; found C 69.01, H 6.68, N 3.59.

3-溴-4-庚胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5h**): 黄色粘稠液, 产率 57%. UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 268 nm; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 0.86~0.89 (m, 3H), 1.27~1.35 (m, 8H), 1.63~1.70 (m, 2H), 3.33~3.58 (m, 2H), 5.14 (b, 1H), 6.22 (s, 1H), 7.19 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.33 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.39~7.49 (m, 2H), 7.50~7.58 (m, 4H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 14.0, 22.6, 26.5, 28.9, 30.6, 31.7, 44.4, 83.6, 95.9, 117.1, 126.9, 127.3, 128.5, 128.8, 137.2, 140.2, 155.3, 156.1, 161.8; IR (film) ν : 3300, 3078, 3036, 2928, 2857, 1753, 1643, 1602, 1518, 1491, 1358, 1265, 1221, 1190, 1074, 951, 833, 764, 698, 501 cm^{-1} ; ESI-MS m/z (%): 442.35 ($[\text{M}-\text{H}]^-$, 97). Anal. calcd for $\text{C}_{23}\text{H}_{26}\text{BrNO}_3$: C 62.17, H 5.90, N 3.15; found C 62.31, H 5.88, N 3.29.

3-氯-4-辛胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5i**): 淡黄色固体, 产率 43%. m.p. 47.6~49.0 $^{\circ}\text{C}$; UV-Vis (CH_2Cl_2) λ_{max} : 266 nm; ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 0.86~0.89 (m, 3H), 1.28~1.34 (m, 10H), 1.60~1.67 (m, 2H), 3.40~3.59 (m, 2H), 4.96 (b, 1H), 6.21 (s, 1H), 7.20 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 7.34 (t, $J=8.0$ Hz, 1H), 7.40~7.46 (m, 2H), 7.53~7.59 (m, 4H); ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ : 13.0, 21.6, 25.5, 28.1, 28.2, 29.7, 30.7, 43.3, 87.4, 94.1, 116.1, 125.9, 126.3, 127.5, 127.8, 136.2, 139.1, 154.2, 156.3, 166.7; IR (film) ν : 3300, 3073, 3030, 2922, 2856, 1757, 1647, 1602, 1518, 1487, 1364, 1265, 1221, 1194, 1076, 962, 833, 768, 743, 694 cm^{-1} ; ESI-MS m/z (%): 412.35 ($[\text{M}-\text{H}]^-$, 100). Anal. calcd for $\text{C}_{24}\text{H}_{28}\text{ClNO}_3$: C 69.64, H 6.82, N 3.38; found C 69.57, H 6.97, N 3.49.

3-溴-4-辛胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5j**): 淡黄色固体, 产率 55%. m.p. 48.3~49.8 °C; UV-Vis (CH₂Cl₂) $\lambda_{\max}$: 266 nm; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 0.86~0.89 (m, 3H), 1.27~1.37 (m, 10H), 1.63~1.68 (m, 2H), 3.34~3.58 (m, 2H), 5.10 (b, 1H), 6.22 (s, 1H), 7.19 (d, *J*=8.0 Hz, 2H), 7.34 (t, *J*=8.0 Hz, 1H), 7.39~7.46 (m, 2H), 7.52~7.58 (m, 4H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ : 13.0, 21.6, 25.5, 28.1, 28.2, 29.6, 30.7, 43.5, 83.9, 94.9, 116.1, 125.9, 126.3, 127.5, 127.8, 136.2, 139.1, 154.2, 157.4, 166.7; IR (film) ν : 3300, 3078, 3036, 2928, 2857, 1753, 1643, 1602, 1518, 1491, 1358, 1265, 1221, 1190, 1074, 951, 833, 764, 698, 546 cm⁻¹; ESI-MS *m/z* (%): 456.33 ([*M*-H]⁻, 100). Anal. calcd for C₂₄H₂₈BrNO₃: C 62.88, H 6.16, N 3.06; found C 62.97, H 6.18, N 3.01.

3-氯-4-癸胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5k**): 淡黄色固体, 产率 66%. m.p. 50.1~51.7 °C; UV-Vis (CH₂Cl₂) $\lambda_{\max}$: 264 nm; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 0.87 (t, *J*=8.0 Hz, 3H), 1.22~1.30 (m, 14H), 1.59~1.66 (m, 2H), 3.36~3.55 (m, 2H), 5.35 (b, 1H), 6.14 (s, 1H), 7.15 (d, *J*=8.0 Hz, 2H), 7.30~7.35 (m, 1H), 7.38~7.43 (m, 2H), 7.50~7.54 (m, 4H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ : 14.1, 22.7, 26.5, 29.2, 29.3, 29.5, 29.6, 30.7, 31.9, 44.2, 87.5, 95.2, 117.2, 126.9, 127.3, 128.5, 128.9, 137.1, 140.1, 155.3, 155.8, 167.8; IR (film) ν : 3312, 3078, 3030, 2928, 2857, 1748, 1643, 1602, 1518, 1485, 1364, 1265, 1233, 1109, 1082, 966, 837, 766, 746, 694 cm⁻¹; ESI-MS *m/z* (%): 440.47 ([*M*-H]⁻, 100). Anal. calcd for C₂₆H₃₂ClNO₃: C 70.65, H 7.30, N 3.14; found C 70.83, H 7.44, N 3.09.

3-溴-4-癸胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5l**): 淡黄色固体, 产率 72%. m.p. 49.7~50.7 °C; UV-Vis (CH₂Cl₂) $\lambda_{\max}$: 265 nm; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 0.87 (t, *J*=8.0 Hz, 3H), 1.22~1.32 (m, 14H), 1.59~1.70 (m, 2H), 3.25~3.62 (m, 2H), 5.31 (b, 1H), 6.18 (s, 1H), 7.16 (d, *J*=8.0 Hz, 2H), 7.31~7.36 (m, 1H), 7.38~7.43 (m, 2H), 7.50~7.56 (m, 4H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ : 14.1, 22.7, 26.5, 29.2, 29.3, 29.5, 29.6, 30.6, 31.9, 44.3, 92.1, 96.0, 117.1, 126.9, 127.3, 128.5, 128.9, 137.1, 140.1, 155.3, 155.8, 167.6; IR (film) ν : 3318, 3073, 3030, 2928, 2857, 1753, 1647, 1602, 1518, 1485, 1364, 1265, 1217, 1101, 1080, 951, 833, 764, 694, 501 cm⁻¹; ESI-MS *m/z* (%): 484.45 ([*M*-H]⁻, 100). Anal. calcd for C₂₆H₃₂BrNO₃: C 64.20, H 6.63, N 2.88; found C 64.32, H 6.77, N 2.81.

3-氯-4-十二胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5m**):

淡黄色固体, 产率 63%. m.p. 57.6~58.8 °C; UV-Vis (CH₂Cl₂) $\lambda_{\max}$: 266 nm; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 0.85~0.89 (m, 3H), 1.24~1.28 (m, 18H), 1.63~1.68 (m, 2H), 3.32~3.61 (m, 2H), 5.20 (b, 1H), 6.16 (s, 1H), 7.17 (d, *J*=8.0 Hz, 2H), 7.33 (t, *J*=8.0 Hz, 1H), 7.39~7.45 (m, 2H), 7.51~7.56 (m, 4H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ : 14.1, 22.7, 26.5, 29.2, 29.4, 29.5, 29.6, 29.7, 29.8, 30.7, 31.9, 44.2, 90.6, 95.1, 117.2, 126.9, 127.3, 128.5, 128.8, 137.1, 140.1, 155.3, 156.1, 167.8; IR (film) ν : 3281, 3084, 2922, 2851, 1746, 1647, 1550, 1518, 1485, 1364, 1304, 1236, 1113, 1080, 972, 837, 766, 746, 694 cm⁻¹; ESI-MS *m/z* (%): 468.41 ([*M*-H]⁻, 100). Anal. calcd for C₂₈H₃₆ClNO₃: C 71.55, H 7.72, N 2.98; found C 71.63, H 7.64, N 3.01.

3-溴-4-十二胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5n**): 淡黄色固体, 产率 78%. m.p. 49.6~50.4 °C; UV-Vis (CH₂Cl₂) $\lambda_{\max}$: 268 nm; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 0.85~0.90 (m, 3H), 1.22~1.30 (m, 18H), 1.62~1.70 (m, 2H), 3.25~3.64 (m, 2H), 5.29 (b, 1H), 6.18 (s, 1H), 7.17 (d, *J*=8.0 Hz, 2H), 7.32 (t, *J*=8.0 Hz, 1H), 7.38~7.45 (m, 2H), 7.50~7.56 (m, 4H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ : 14.1, 22.7, 26.5, 29.2, 29.4, 29.5, 29.6, 29.7, 29.8, 30.6, 31.9, 44.3, 88.7, 95.9, 117.1, 126.9, 127.3, 128.5, 128.8, 137.1, 140.1, 156.3, 159.2, 167.1; IR (film) ν : 3294, 3078, 3030, 2922, 2851, 1757, 1643, 1602, 1518, 1487, 1364, 1265, 1221, 1188, 1076, 951, 833, 764, 698, 507 cm⁻¹; ESI-MS *m/z* (%): 512.47 ([*M*-H]⁻, 100). Anal. calcd for C₂₈H₃₆BrNO₃: C 65.37, H 7.05, N 2.72; found C 65.42, H 7.17, N 2.61.

3-氯-4-十四胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5o**): 淡黄色固体, 产率 69%. m.p. 69.7~71.5 °C; UV-Vis (CH₂Cl₂) $\lambda_{\max}$: 266 nm; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 0.85~0.90 (m, 3H), 1.22~1.30 (m, 18H), 1.60~1.68 (m, 2H), 3.33~3.56 (m, 2H), 5.35 (b, 1H), 6.13 (s, 1H), 7.15 (d, *J*=8.0 Hz, 2H), 7.32 (t, *J*=8.0 Hz, 1H), 7.38~7.44 (m, 2H), 7.50~7.55 (m, 4H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ : 14.1, 22.7, 26.5, 29.2, 29.3, 29.4, 29.5, 29.6, 29.7, 29.8, 29.9, 30.7, 31.9, 44.2, 88.1, 95.2, 117.2, 126.9, 127.3, 128.4, 128.9, 137.1, 140.1, 153.0, 155.3, 167.3; IR (film) ν : 3300, 3078, 3036, 2928, 2857, 1746, 1639, 1553, 1514, 1485, 1362, 1223, 1188, 1107, 1080, 966, 833, 760, 741, 698 cm⁻¹; ESI-MS *m/z* (%): 496.49 ([*M*-H]⁻, 100). Anal. calcd for C₃₀H₄₀ClNO₃: C 72.34, H 8.09, N 2.81; found C 72.51, H 8.18, N 2.61.

3-溴-4-十四胺基-5-联苯氧基-2(5*H*)-呋喃酮(**5p**): 淡

黄色固体, 产率 72%. m.p. 72.3~73.7 °C; UV-Vis (CH₂Cl₂) λ_{max} : 268 nm; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 0.85~0.90 (m, 3H), 1.23~1.29 (m, 18H), 1.59~1.67 (m, 2H), 3.29~3.56 (m, 2H), 5.37 (b, 1H), 6.16 (s, 1H), 7.15 (d, J =8.0 Hz, 2H), 7.31 (t, J =8.0 Hz, 1H), 7.38~7.43 (m, 2H), 7.50~7.55 (m, 4H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ : 14.2, 22.7, 26.5, 29.3, 29.4, 29.5, 29.6, 29.7, 29.8, 29.9, 30.6, 32.0, 44.3, 96.0, 100.0, 117.1, 126.9, 127.3, 128.5, 128.9, 137.0, 140.1, 155.3, 157.0, 167.4; IR (film) ν : 3294, 3084, 3030, 2928, 2862, 1753, 1638, 1551, 1518, 1487, 1364, 1263, 1221, 1098, 1076, 951, 833, 764, 694, 501 cm⁻¹; ESI-MS m/z (%): 540.41 ([M-H]⁻, 100). Anal. calcd for C₃₀H₄₀BrNO₃: C 66.41, H 7.43, N 2.58; found C 66.51, H 7.42, N 2.69.

辅助材料(Supporting Information) 所有 18 个新合成化合物 **3a~3b**、**5a~5p** 的核磁共振氢谱、核磁共振碳谱和质谱图。这些材料可以免费从本刊网站(<http://sioc-journal.cn/>)上下载。

References

- [1] (a) Trost, B. M.; Burns, A. C.; Bartlett, M. J.; Tautz, T.; Weiss, A. H. *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 1474.
(b) Xie, Y.-Z.; Wang, N.; Cheng, B.; Zhai, H.-B. *Org. Lett.* **2012**, *14*, 3.
(c) Tatton, M. R.; Simpson, I.; Donohoe, T. J. *Chem. Commun.* **2014**, *50*, 11314.
(d) Müller, D. S.; Untiedt, N. L.; Dieskau, A. P.; Lackner, G. L.; Overman, L. E. *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, *137*, 660.
- [2] Guerrero, M. D.; Aquino, M.; Bruno, I.; Terencio, M. C.; Paya, M.; Riccio, R.; Gomez-Paloma, L. *J. Med. Chem.* **2007**, *50*, 2176.
- [3] Wei, M.-X.; Feng, L.; Li, X.-Q.; Zhou, X.-Z.; Shao, Z.-H. *Eur. J. Med. Chem.* **2009**, *44*, 3340.
- [4] (a) Kamal, A.; Suresh, P.; Mallareddy, A.; Kumar, B. A.; Reddy, P. V.; Raju, P.; Tamboli, J. R.; Shaik, T. B.; Jain, N.; Kalivendi, S. V. *Bioorg. Med. Chem.* **2011**, *19*, 2349.
(b) Bromhead, L. J.; Visser, J.; McErlean, C. S. P. *J. Org. Chem.* **2013**, *79*, 1516.
(c) Pereira, U. A.; Barbosa, L. C. A.; Maltha, C. R. A. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2014**, *24*, 1052.
- [5] Sarma, K. D.; Zhang, J.; Curran, T. T. *J. Org. Chem.* **2007**, *72*, 3311.
- [6] (a) Tan, Y.-H.; Li, J.-X.; Xue, F.-L.; Qi, J.; Wang, Z.-Y. *Tetrahedron* **2012**, *68*, 2827.
(b) Shi, J.; Tang, X.-D.; Wu, Y.-C.; Li, H.-N.; Song, L.-J.; Wang, Z.-Y. *Eur. J. Org. Chem.* **2015**, 1193.
- [7] Janody, S.; Hermange, P.; Retailleau, P.; Thierry, J.; Dodd, R. H. *J. Org. Chem.* **2014**, *79*, 5673.
- [8] (a) Latypova, L. Z.; Saigimbatalova, E. S.; Chulakova, D. R.; Lodochnikova, O. A.; Kurbangalieva, A. R.; Berdnikov, E. A.; Chmutova, G. A. *Russ. J. Org. Chem.* **2014**, *50*, 521.
(b) Liu, J.; Li, Z.-C.; Tong, P.; Xie, Z.-X.; Zhang, Y.; Li, Y. *J. Org. Chem.* **2015**, *80*, 1632.
(c) Wang, X.-D.; Wei, W.; Deng, R. C.; Zhou, S.-S.; Zhang, L.; Lin, X.-Y.; Xiao, Z.-P. *Chin. J. Org. Chem.* **2014**, *34*, 1773 (in Chinese). (王旭东, 魏伟, 邓瑞成, 周沙沙, 张蕾, 林肖依, 肖竹平, 有机化学, **2014**, *34*, 1773.)
(d) Wei, M.-X.; Gao, X.-H.; Zhang, H.; Li, X.-Q. *Chin. J. Org. Chem.* **2015**, *35*, 439 (in Chinese). (魏梦雪, 高晓慧, 张和, 李学强, 有机化学, **2015**, *35*, 439.)
- [9] (a) Hajduk, P. J.; Sheppard, G.; Nettesheim, D. G.; Hajduk, P. J.; Sheppard, G.; Nettesheim, D. G.; Olejniczak, E. T.; Shuker, S. B.; Meadows, R. P.; Steinman, D. H.; Carrera, G. M.; Marcotte, P. A.; Severin, J.; Walter, K.; Smith, H.; Gubbins, E.; Simmer, R.; Holzman, T. F.; Morgan, D. W.; Davidsen, S. K.; Summers, J. B.; Fesik, S. W. *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 5818.
(b) Kim, S. H.; Kim, J. G. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2011**, *32*, 341.
(c) Zhou, C.; Li, Y.-M.; Lu, Y.; Zhang, R.; Jin, K.; Fu, X.-M.; Duan, C.-Y. *Chin. J. Chem.* **2013**, *31*, 1269.
(d) Hawsworth, E. L.; Andrews, P. C.; Lie, W.; Lai, B.; Dillon, C. T. *J. Inorg. Biochem.* **2014**, *135*, 28.
(e) Belema, M.; Nguyen, V. N.; Bachand, C.; Deon, D. H.; Goodrich, J. T.; James, C. A.; Lavoie, R.; Lopez, O. D.; Martel, A.; Romine, J. L.; Ruediger, E. H.; Snyder, L. B.; St Laurent, D. R.; Yang, F.-K.; Zhu, J.-L.; Wong, H.-S.; Langley, D. R.; Adams, S. P.; Cantor, G. H.; Chimalakonda, A.; Fura, A.; Johnson, B. M.; Knipe, J. O.; Parker, D. D.; Santone, K. S.; Fridell, R. A.; Lemm, J. A.; O'Boyle, D. R.; Colonna, R. J.; Gao, M.; Meanwell, N. A.; Hamann, L. G. *J. Med. Chem.* **2014**, *57*, 2013.
(f) Martin, A. D.; Siamaki, A. R.; Belecki, K.; Gupton, B. F. *J. Org. Chem.* **2015**, *80*, 1915.
- [10] (a) Orgies, D. H.; Forgione, P. *Synlett* **2013**, 1715.
(b) Orgies, D. H.; Barthelme, A.; Aly, S.; Desharnais, B.; Rioux, S.; Forgione, P. *Synthesis* **2013**, 45, 694.
(c) Costa, N. E.; Pelotte, A. L.; Simard, J. M. *J. Chem. Educ.* **2012**, *89*, 1064.
(d) Wang, L.-M.; Cheng, S.-X.; Chen, T.; Chang, J.-B. *Acta Chim. Sinica* **2012**, *70*, 1201 (in Chinese). (王利敏, 程森祥, 陈彤, 常俊标, 化学学报, **2012**, *70*, 1201.)
(e) Jiang, G.-F.; Niu, P.-P.; Zhang, Z.-C.; Yan, B.-M.; Guo, C.-C. *J. Hunan Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **2014**, *41*, 112 (in Chinese). (江国防, 牛平平, 张志超, 焉保明, 郭灿城, 湖南大学学报(自然科学版), **2014**, *41*, 112.)
(f) Bernaskova, M.; Kretschmer, N.; Schuehly, W.; Huefner, A.; Weis, R.; Bauer, R. *Molecules* **2014**, *19*, 1223.
- [11] Guan, L.-T.; Mo, G.-Z.; Wu, Y.-C.; Liang, X.-Y.; Luo, Q.-F.; Wang, Z.-Y. *Chin. J. Org. Chem.* **2015**, *35*, 1081 (in Chinese). (关丽涛, 莫广珍, 吴彦城, 梁欣榆, 罗俏芳, 汪朝阳, 有机化学, **2015**, *35*, 1081.)
- [12] (a) Huo, J.-P.; Luo, J.-C.; Wu, W.; Xiong, J.-F.; Mo, G.-Z.; Wang, Z.-Y. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2013**, *52*, 11850.
(b) Huo, J.-P.; Deng, G.-H.; Wu, W.; Xiong, J.-F.; Zhong, M.-L.; Wang, Z.-Y. *Macromol. Rapid Commun.* **2013**, *34*, 1779.
(c) Xue, F.-L.; Peng, P.; Shi, J.; Zhong, M.-L.; Wang, Z.-Y. *Synth. Commun.* **2014**, *44*, 1944.
- [13] (a) Polezhaeva, N. A.; Kalinina, I. V.; Volodina, Y. M.; Berdnikov, E. A.; Galkin, V. I.; Cherkasov, R. A. *Russ. J. Gen. Chem.* **2004**, *40*, 438.
(b) Zhang, J.; Blazecka, P. G.; Curran, T. T. *Tetrahedron Lett.* **2007**, *48*, 2611.
(c) Liu, G.-Y.; Guo, B.-Q.; Chen, W.-N.; Cheng, C.; Zhang, Q.-L.; Dai, M.-B.; Sun, J.-R.; Sun, P.-H.; Chen, W.-M. *Chem. Biol. Drug Des.* **2012**, *79*, 628.
(d) Claraz, A.; Oudeyer, S.; Levacher, V. *Adv. Synth. Catal.* **2013**, *355*, 841.
- [14] (a) Murai, M.; Origuchi, K.; Takai, K. *Org. Lett.* **2014**, *16*, 3828.

- (b) Veenboer, R. M. P.; Nolan, S. P. *Green Chem.* **2015**, *17*, 3819.
- [15] (a) Chen, R.-H.; Fu, J.-H.; Li, G.-L.; Tan, Y.-H.; Wang, Z.-Y.; Yuan, P. *Chin. J. Org. Chem.* **2012**, *32*, 95 (in Chinese).
(陈任宏, 傅建花, 李国良, 谭越河, 汪朝阳, 袁萍, 有机化学, **2012**, *32*, 95.)
- (b) Fu, J.-H.; Wang, Z.-Y.; Huo, J.-P.; Tan, Y.-H.; Zeng, R.-H. *Chin. J. Org. Chem.* **2012**, *32*, 104 (in Chinese).
(傅建花, 汪朝阳, 霍景沛, 谭越河, 曾荣华, 有机化学, **2012**, *32*, 104.)
- (c) Xue, F.-L.; Li, J.-X.; Wang, Z.-Y.; Xiong, J.-F.; Li, D. *Res. Chem. Intermed.* **2013**, *39*, 1153.
- (d) Xue, F.-L.; Qi, J.; Peng, P.; Mo, G.-Z.; Wang, Z.-Y. *Lett. Org. Chem.* **2014**, *11*, 64.
- (e) Tan, Y.-H.; Li, J.-X.; Huo, J.-P.; Xue, F.-L.; Wang, Z.-Y. *Synth. Commun.* **2014**, *44*, 2974.
- (f) Peng, P.; Feng, M.-H.; Shi, J.; Zheng, J.-L.; Wu, Y.-C.; Wang, Z.-Y.; Chen, R.-H. *Lett. Org. Chem.* **2015**, *12*, 359.

(Li, L.; Fan, Y.)