叔丁基过氧化氢和碘介导的烯基化二羰基化合物的碘环化合成
5-碘甲基二氢呋喃

全积宁 何小雪 严新焕 李小青 许响生*

(浙江工业大学化学工程学院 杭州 310014)

摘要 发展了一种通过烯基化二羰基化合物的碘环化合成多取代 5-碘甲基二氢呋喃的新方法, 该方法以过氧化叔丁醇(TBHP)和 I_2 原位形成的次碘酸和 $t\text{BuOI}$ 为活性碘正离子试剂. 本反应具有反应条件温和、碘原子利用率高、试剂廉价易得等优点.

关键词 碘环化; 烯基化二羰基化合物; 二氢呋喃; 叔丁基过氧化氢; 碘

Synthesis of 5-Iodomethyl Dihydrofurans via *t*-Butyl Hydroperoxide-Induced Iodocyclization of Olefinic Dicarbonyl Compounds with I_2

Quan, Jining He, Xiaoxue Yan, Xinhuan Li, Xiaoqing Xu, Xiangsheng*

(College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract A new method for the iodocyclization of olefinic dicarbonyl compounds with *t*-butyl hydroperoxide (TBHP) and I_2 was developed. The *in situ* generated hypoiodous acid and $t\text{BuOI}$ were used as active iodine cation reagents. This method allowed the synthesis of polysubstituted 5-iodomethyl dihydrofurans under mild reaction conditions with cheap reagents and high atom economy.

Keywords iodocyclization; olefinic dicarbonyl compounds; dihydrofurans; TBHP; I_2

烯烃的碘环化反应是构建碘代环状化合物的重要策略^[1,2], 由于碘取代基可进一步发生各种官能团化, 因此, 该反应被广泛应用于生物活性物质和天然产物的合成^[3-6]. 烯烃的碘环化反应可通过自由基机理^[7]和离子型机理^[8]进行, 其中离子型碘环化反应由于底物适用范围广, 应用更加广泛. 离子型碘环化机理首先是碳-碳双键被碘正离子试剂活化, 再与分子内的亲核官能团发生亲核加成^[1,8]. 常用的碘正离子试剂有 Barluenga 试剂($I(\text{Py})_2\text{BF}_4$)^[9]、一氯化碘(ICl)^[10]、*N*-碘代丁二酰亚胺(NIS)^[11]等. 最近, 还有通过碘苯二乙酯($\text{PhI}(\text{OAc})_2$)氧化碘代三甲基硅烷(TMSI)原位形成 I^+ 并应用于碘环化反应的报道(图 1a)^[12]. 但这些碘试剂均存在原子经济性差、成本较高的缺点.

单质碘(I_2)是一种用途广泛、廉价易得的碘试剂^[13,14]. 尽管可以通过 I_2 - π 复合物活化烯烃进行碘环化

反应, 但理论上只有一半的碘原子可被利用. 更重要的是, 由于活性较低, 往往需要添加大大过量的单质碘, 而且需要加入碱来中和产生的碘化氢(图 1a)^[15-17]. 因此, 近年来通过在单质碘参与的反应中加入环境友好的氧化剂, 如叔丁基过氧化氢(TBHP)或双氧水来提高单质 I_2 的碘原子利用率或反应活性受到人们的广泛关注^[18-22]. 例如我们课题组最近基于 I_2 /TBHP 体系发展了一种不饱和酮的碘环化合成碘代异噁唑啉的反应, 该反应的碘原子理论利用率为 100%(图 1b)^[8]. 为了进一步拓展这一方法的适用范围, 本文报道了 I_2 /TBHP 体系介导烯基化二羰基化合物的碘环化反应, 合成了 5-碘甲基二氢呋喃衍生物(图 1b).

1 结果与讨论

首先以 2-烯丙基-1,3-二苯基丙烷-1,3-二酮(**1a**)作为

* Corresponding author. E-mail: future@zjut.edu.cn

Received September 17, 2019; revised November 23, 2019; published online December 11, 2019.

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0210900) and the Innovative Experimental Project of Zhejiang University of Technology (No. SYXM1704).

中国国家重点研究发展计划(No. 2017YFC0210900)和浙江工业大学创新实验计划(No. SYXM1704)资助项目.

图1 碘试剂参与的碘环化反应

Figure 1 Iodoenol cyclization reaction with iodine reagents

模型底物,以近期工作确定的较优条件(0.5 equiv. I₂ 和 2.0 equiv. TBHP, H₂O 为溶剂,室温反应)进行反应^[8],结果以 17% 的分离收率获得了目标产物 2-苯基-3-苯甲酰基-5-碘甲基-4,5-二氢呋喃(**2a**)(表 1, Entry 1). 进一步对不同溶剂[二氯甲烷(DCM)、*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)、乙腈(MeCN)、丙酮(Acetone)、乙酸乙酯(EtOAc)、二甲亚砜(DMSO)]或不添加溶剂(Neat)进行了考察(表 1, Entries 2~8). 结果表明当以 MeCN 作为反应溶剂时,能以 72% 的收率获得目标产物(表 1, Entry 4). 增加 I₂ 的用量至 0.6 equiv. 会导致副产物增多而使产物收率略微下降(表 1, Entry 9),减少 I₂ 的用量至 0.4 equiv. 时以 56% 的收率获得产物,但同时回收了 11% 的原料(表 1, Entry 10). 其他氧化剂如二叔丁基过氧化物(DTBP)、过氧化异丙苯(*m*-CPBA)或 30% 的双氧水(H₂O₂)均较 TBHP 活性差(表 1, Entries 11~13),当反应用四正丁基碘化铵(TBAI)作为碘试剂时,没有产物生成(表 1, Entry 14).

利用上述获得的较优条件,对反应的普适性进行了研究(表 2). 对于 2-烯丙基-1,3-二苯基-1,3-二酮类底物,当苯基的对位分别被甲基、甲氧基、氟、氯、溴取代时,反应均能顺利进行,并以 67%~73% 的收率获得目标产物(**2a**~**2f**),即使反应规模扩大 10 倍至 2.0 mmol,底物 **1a** 也能以 50% 的收率获得 **2a**. 此外,烯基化的芳香族和脂肪族 β -酮酯也能顺利进行反应,分别以 49% 和 89% 的收率得到 **2g** 和 **2h**. 特别地,利用环状的烯基化二羧基化合物,如 α -烯丙基-1,3-环己二酮,可合成稠环二氢呋喃化合物(**2i**, 65%). 当底物碳碳双键的 α -或 β -位存在甲基时反应也能高效进行,分别以 86% 和 77% 的收率获得 **2j** 和 **2k**,这表明碳碳双键上存在位阻对该反应影响不

大. 最后,不对称的 2-烯丙基-1-苯基-1,3-丁二酮(**1l**)可以 2.5 : 1 的比例同时形成 **2l** 和 **2l'** 两种异构体,其中,以 33% 的收率分离得到 **2l**.

表 1 反应条件的优化^a

Table 1 Optimization of reaction conditions

Entry	Solvent	Oxidant	Isolated yield/%
1	H ₂ O	TBHP	17
2	DCM	TBHP	24
3	DMF	TBHP	0
4	MeCN	TBHP	72
5	Acetone	TBHP	21
6	EtOAc	TBHP	47
7	DMSO	TBHP	18
8	Neat	TBHP	31
9 ^b	MeCN	TBHP	67
10 ^c	MeCN	TBHP	56
11	MeCN	DTBP	61
12	MeCN	<i>m</i> -CPBA	42
13	MeCN	H ₂ O ₂	20
14 ^d	MeCN	TBHP	N.R.

^a Reaction conditions: **1a** (0.2 mmol, 1.0 equiv.), I₂ (0.1 mmol, 0.5 equiv.), oxidant (0.4 mmol, 2.0 equiv.) in 2.0 mL solvent. ^b 0.6 equiv. of I₂ was used. ^c 0.4 equiv. of I₂ was used. ^d *n*-Bu₄NI (1.0 equiv.) instead of I₂.

为了进一步了解该反应的过程,进行了一系列控制实验(表 3). 首先,在标准反应下加入 2 equiv. 的自由基捕获剂 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(BHT),反应未被抑制,仍以 76% 的收率获得产物,表明该过程可能不涉及自由基过程^[8,23,24](表 3, Entry 1). 接着,在标准反应下加入 2 equiv. 2,2,6,6-四甲基哌啶氮氧化物(TEMPO),反应不能进行,而在没有 TBHP 的情况下加入 TEMPO,反应可以进行,表明 TBHP 与 I₂ 反应原位形成的活性碘试剂次碘酸和 ^tBuOI 可能被 TEMPO 破坏^[25](表 3, Entries 2, 3). 最后,在不添加 TBHP 的情况下,使用 1 equiv. 单质碘,仅以 30% 收率获得产物(表 3, Entry 4),表明本文的 I₂/TBHP 体系不是通过 I₂- π 复合物的机理进行碘环化反应^[1].

综合上述实验结果及文献报道^[8,18],提出了如下可能的反应机理(图 2). 首先,底物二羧基化合物 **1** 经过烯醇化形成烯醇式中间体 **1'**,与此同时,TBHP 与 I₂ 反应生成次碘酸和 ^tBuOI,次碘酸或 ^tBuOI 与 **1'** 的碳-碳双键 β -C 配位并极化碳碳双键,最后烯醇羟基亲核进攻烯烃的 α -C 生成 5-碘甲基-4,5-二氢呋喃类化合物 **2**,同时脱去水或叔丁醇.

本文所合成的 5-碘甲基二氢呋喃类化合物具有广

表2 烯基化二羰基化合物适用范围的考察^a

Table 2 Application scope of the olefinic dicarbonyl compounds

Entry	Substrate	Product	Yield ^b /%
1			72 (50 ^c)
2			73
3			70
4			70
5			67
6			71
7			49
8			89
9			65
10			86
11			77
12			33 ^d

^a Reaction conditions: **1** (0.2 mmol), I₂ (0.1 mmol, 0.5 equiv.), TBHP (0.4 mmol, 2.0 equiv., 70% aqueous solution) in MeCN (2.0 mL). ^b Isolated yield.

^c Reaction was run on 2.0 mmol scale. ^d The isolated yield of **2l**.

表3 控制实验^a

Table 3 Control experiments

Entry	Additives (2 equiv.)	TBHP	Yield ^b /%
1	BHT	✓	76
2	TEMPO	✓	Trace
3	TEMPO	✗	19
4 ^c	✗	✗	30

^a Reaction conditions: **1** (0.2 mmol), I₂ (0.1 mmol, 0.5 equiv.), TBHP (0.4 mmol, 2.0 equiv., 70% aqueous solution) in MeCN (2.0 mL). ^b Isolated yield. ^c 1.0 equiv. of I₂ used.

图2 可能的反应机理

Figure 2 Proposed mechanism

泛的应用价值。例如,文献报道化合物**2a**可在室温下与叠氮化钠(NaN₃)进行亲核取代反应合成叠氮取代的二氢呋喃**3**^[12]。另外,**2a**也可在1,8-二氮杂二环[5.4.0]十一碳-7-烯(DBU)作用下脱碘化氢,形成呋喃化合物**4**^[26](图3)。

图3 2a的进一步衍生化

Figure 3 Derivatization reactions of **2a**

2 结论

报道了一种TBHP与I₂介导的烯基化二羰基化合物

的碘环化反应, 可在温和条件下实现 5-碘甲基二氢呋喃类化合物的合成. 与以往的 I_2 介导的碘环化反应相比, 单质碘的用量大大减少, 碘原子理论利用率由 50% 提高至 100%, 且不需要添加碱. 我们相信该反应有望在其他碘代环状化合物的合成中得到更加广泛的应用.

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

实验所用的无水溶剂在使用之前均按照试剂纯化标准方法进行无水、无氧处理, 未经特殊说明的其它溶剂与药品均为可以直接购买的分析纯试剂. 柱层析使用的硅胶(200~300 目)为青岛鼎康试剂有限公司生产, 柱层析所使用的洗脱剂: 乙酸乙酯和石油醚(沸程为 60~90 °C)均为工业级, 经重蒸干燥处理. 检测反应使用的是薄层色谱分析(TLC)方法.

1H NMR 及 ^{13}C NMR 收集数据所用仪器为 Bruker Avance 500 型(瑞士)核磁共振仪测定, 室温下以氘代氯仿或氘代二甲基亚砜为溶剂, 1H NMR 以四甲基硅烷为内标(δ 0), ^{13}C NMR 以氘代氯仿或氘代二甲基亚砜为内标(δ 77/39); 高分辨质谱测定所使用仪器为 Bmker ApexII 型质谱仪测定(EI 源); 熔点测定使用未校准的巩义市科瑞仪器有限公司生产的 X-4 型数字显示显微熔点仪. 底物依据文献报道的方法进行合成^[27,28].

3.2 实验方法

在反应瓶中依次加入烯基化 1,3-二羰基化合物(1a~1l, 0.2 mmol), I_2 (0.1 mmol), TBHP (0.4 mmol) 和 MeCN (2 mL). 将反应混合物在室温下搅拌 12 h 后, 向混合物中加入饱和的 $Na_2S_2O_3$ 水溶液(10 mL)并用 EtOAc (15 mL $\times$ 3)萃取, 合并有机层并用盐水洗涤(10 mL $\times$ 2), 然后有机层用无水 Na_2SO_4 干燥并浓缩, 残余物经硅胶柱层析纯化, 使用石油醚和乙酸乙酯的混合物($V:V=50:1\sim 1:1$)作为洗脱剂, 得到产物 5-碘甲基二氢呋喃(2a~2l).

5-碘甲基-2-苯基-3-苯甲酰基-4,5-二氢呋喃(2a): 白色固体, 产率 72%. m.p. 104~106 °C(文献值^[12]: 97.5~99.5 °C); 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.45 (d, $J=8.2$ Hz, 2H), 7.24~7.15 (m, 4H), 7.08 (d, $J=7.4$ Hz, 2H), 7.05 (d, $J=7.3$ Hz, 2H), 4.90~4.85 (m, 1H), 3.53~3.47 (m, 3H), 3.08 (dd, $J=15.5$, 7.0 Hz, 1H); ^{13}C NMR (126 MHz, $CDCl_3$) δ : 193.15, 164.84, 138.77, 131.23, 130.10, 129.72, 129.26, 128.90, 127.66, 127.65, 111.66, 79.94, 39.15, 8.75.

5-碘甲基-2-(4-甲氧基苯基)-3-(4-甲氧基苯甲酰基)-4,5-二氢呋喃(2b)^[12]: 无色油状液体, 产率 73%. 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.53 (d, $J=8.8$ Hz, 2H), 7.22

(d, $J=8.8$ Hz, 2H), 6.64 (d, $J=6.0$ Hz, 2H), 6.62 (d, $J=6.1$ Hz, 2H), 4.88~4.78 (m, 1H), 3.75 (s, 3H), 3.73 (s, 3H), 3.49~3.47 (m, 2H), 3.47~3.42 (m, 1H), 3.04 (dd, $J=15.3$, 7.0 Hz, 1H); ^{13}C NMR (126 MHz, $CDCl_3$) δ : 192.06, 163.15, 162.34, 160.95, 131.49, 131.29, 130.95, 122.28, 113.25, 113.13, 109.98, 79.62, 55.34, 55.29, 39.67, 8.71.

5-碘甲基-2-(4-甲基苯基)-3-(4-甲基苯甲酰基)-4,5-二氢呋喃(2c)^[12]: 无色油状液体, 产率 70%. 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.40 (d, $J=8.1$ Hz, 2H), 7.14 (d, $J=8.1$ Hz, 2H), 6.91 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 6.89 (d, $J=8.0$ Hz, 2H), 4.87~4.82 (m, 1H), 3.48 (d, $J=5.5$ Hz, 2H), 3.47~3.42 (m, 1H), 3.05 (dd, $J=15.4$, 7.0 Hz, 1H), 2.25 (s, 3H), 2.24 (s, 3H); ^{13}C NMR (126 MHz, $CDCl_3$) δ : 192.98, 164.09, 141.83, 140.29, 136.12, 129.15, 129.07, 128.37, 128.32, 126.92, 110.81, 79.77, 39.42, 21.38, 21.32, 8.65.

5-碘甲基-2-(4-氯苯基)-3-(4-氯苯甲酰基)-4,5-二氢呋喃(2d): 白色固体, 产率 70%. m.p. 120~122 °C(文献值^[12]: 113.7~115.9 °C); 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.41 (d, $J=8.5$ Hz, 2H), 7.17 (d, $J=8.6$ Hz, 2H), 7.12~7.08 (m, 4H), 4.88~4.82 (m, 1H), 3.54~3.39 (m, 3H), 3.04 (dd, $J=15.5$, 7.0 Hz, 1H); ^{13}C NMR (126 MHz, $CDCl_3$) δ : 191.37, 163.45, 137.86, 136.95, 136.58, 130.50, 130.26, 128.16, 128.13, 127.95, 111.79, 79.95, 39.23, 8.70.

5-碘甲基-2-(4-溴苯基)-3-(4-溴苯甲酰基)-4,5-二氢呋喃(2e): 白色固体, 产率 67%. m.p. 124~125 °C(文献值^[12]: 117.5~120.0 °C); 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.35 (d, $J=8.6$ Hz, 2H), 7.32~7.28 (m, 4H), 7.12 (d, $J=8.5$ Hz, 2H), 4.92~4.83 (m, 1H), 3.56~3.43 (m, 3H), 3.05 (dd, $J=15.5$, 7.0 Hz, 1H); ^{13}C NMR (126 MHz, $CDCl_3$) δ : 191.56, 163.66, 137.41, 131.20, 131.16, 130.68, 130.41, 128.42, 126.46, 125.04, 111.91, 80.03, 39.25, 8.68.

5-碘甲基-2-(4-氟苯基)-3-(4-氟苯甲酰基)-4,5-二氢呋喃(2f): 白色固体, 产率 71%. m.p. 104~105 °C(文献值^[12]: 85.9~88.8 °C); 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.50~7.45 (m, 2H), 7.24~7.19 (m, 2H), 6.84~6.75 (m, 4H), 4.88~4.83 (m, 1H), 3.54~3.45 (m, 3H), 3.05 (dd, $J=15.5$, 7.0 Hz, 1H); ^{13}C NMR (126 MHz, $CDCl_3$) δ : 191.35, 165.14 (d, $J_{C-F}=122.5$ Hz), 163.51, 163.23 (d, $J_{C-F}=122.5$ Hz), 134.90 (d, $J_{C-F}=3.1$ Hz), 131.41 (d, $J_{C-F}=5.0$ Hz), 131.35 (d, $J_{C-F}=6.3$ Hz), 125.80 (d, $J_{C-F}=3.4$ Hz), 115.06 (d, $J_{C-F}=13.9$ Hz), 114.87 (d, $J_{C-F}=13.9$ Hz), 111.46, 79.86, 39.22, 8.74.

5-碘甲基-3-乙氧羰基-2-苯基-4,5-二氢呋喃(2g)^[15]: 无色油状液体, 产率 49%. 1H NMR (500 MHz, $CDCl_3$) δ : 7.78 (dd, $J=8.1$, 1.4 Hz, 2H), 7.46~7.35 (m, 3H), 4.84~

4.76 (m, 1H), 4.14 (q, $J=7.1$ Hz, 2H), 3.46~3.37 (m, 2H), 3.29 (dd, $J=15.5, 10.3$ Hz, 1H), 2.91 (dd, $J=15.6, 7.0$ Hz, 1H), 1.22 (t, $J=7.1$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (126 MHz, CDCl_3) δ : 164.96, 164.29, 130.47, 129.70, 129.32, 127.64, 102.22, 79.80, 59.92, 37.81, 14.23, 8.59.

5-碘甲基-2-甲基-3-乙氧酰基-4,5-二氢呋喃(**2h**): 白色固体, 产率 89%. m.p. 64~65 °C (文献值^[26]: 62~65 °C); ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 4.68 (dtd, $J=102, 6.9, 5.0$ Hz, 1H), 4.17 (q, $J=7.1$ Hz, 2H), 3.29 (ddd, $J=17.1, 10.2, 6.0$ Hz, 2H), 3.06~2.99 (m, 1H), 2.69~2.60 (m, 1H), 2.19 (t, $J=1.6$ Hz, 3H), 1.28 (t, $J=7.1$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (126 MHz, CDCl_3) δ : 167.22, 165.87, 101.88, 80.55, 59.65, 36.10, 14.46, 14.09, 8.57.

2-碘甲基-3,5,6,7-四氢苯并呋喃-4-(2H)-酮(**2i**)^[12]: 白色固体, 产率 65%. m.p. 85~86 °C; ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 4.87~4.77 (m, 1H), 3.38~3.29 (m, 2H), 3.00~2.93 (m, 1H), 2.58 (ddt, $J=14.8, 6.7, 1.9$ Hz, 1H), 2.47~2.39 (m, 2H), 2.33 (dd, $J=8.3, 4.8$ Hz, 2H), 2.06~1.98 (m, 2H); ^{13}C NMR (126 MHz, CDCl_3) δ : 195.31, 176.63, 112.87, 83.44, 36.37, 32.51, 23.80, 21.58, 8.13.

5-甲基-5-碘甲基-2-苯基-3-苯甲酰基-4,5-二氢呋喃(**2j**)^[12]: 无色油状液体, 产率 86%. ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.44 (d, $J=8.2$ Hz, 2H), 7.25~7.14 (m, 4H), 7.09~7.01 (m, 4H), 3.57 (d, $J=10.5$ Hz, 1H), 3.52 (d, $J=10.5$ Hz, 1H), 3.31 (d, $J=15.4$ Hz, 1H), 3.23 (d, $J=15.4$ Hz, 1H), 1.74 (s, 3H); ^{13}C NMR (126 MHz, CDCl_3) δ : 193.32, 164.35, 138.89, 131.15, 130.03, 129.99, 129.27, 128.91, 127.64, 127.63, 111.86, 85.13, 44.19, 26.15, 14.87.

5-(1-碘乙基)-2-苯基-3-苯甲酰基-4,5-二氢呋喃(**2k**): 白色固体, 产率 77%. m.p. 69~70 °C; ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.45 (m, 2H), 7.24~7.14 (m, 4H), 7.08~7.00 (m, 4H), 4.57~4.52 (m, 1H), 4.50~4.41 (m, 1H), 3.45 (dd, $J=15.5, 10.2$ Hz, 1H), 3.14 (dd, $J=15.5, 7.6$ Hz, 1H), 1.99 (d, $J=6.9$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (126 MHz, CDCl_3) δ : 193.1, 164.7, 138.8, 131.1, 130.0, 129.8, 129.1, 128.9, 127.6, 127.6, 111.9, 85.0, 38.4, 30.2, 23.5. HRMS-ESI: calcd for $\text{C}_{19}\text{H}_{18}\text{IO}_2$ $[\text{M}+\text{H}]^+$ 405.0343, found 405.0346.

2-甲基-5-碘甲基-3-苯甲酰基-4,5-二氢呋喃(**2l**)^[12]: 无色油状液体, 产率 33%. ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ : 7.54 (dd, $J=5.7, 4.3$ Hz, 3H), 7.47 (d, $J=7.5$ Hz, 2H), 4.76~4.71 (m, 1H), 3.55 (dd, $J=10.5, 5.2$ Hz, 1H), 3.49 (dd, $J=10.5, 4.9$ Hz, 1H), 3.16~3.08 (m, 1H), 2.68 (ddd, $J=14.7, 7.0, 1.4$ Hz, 1H), 1.78 (s, 3H); ^{13}C NMR (126 MHz, CDCl_3) δ : 191.60, 167.39, 140.55, 131.00, 128.30, 127.41, 111.72, 80.04, 37.09, 15.03, 11.26.

辅助材料(Supporting Information) 化合物 **2a~2l** 的 ^1H NMR 谱和 ^{13}C NMR 谱. 这些数据可以免费从本刊网站(<http://sioc-journal.cn/>)上下载.

References

- [1] French, A. N.; Bissmire, S.; Wirth, T. *Chem. Soc. Rev.* **2004**, *33*, 354.
- [2] Zhao, J.-J.; Gao, W.-C.; Chang, H.-H.; Li, X.; Liu, Q.; Wei, W.-L. *Chin. J. Org. Chem.* **2014**, *34*, 1941 (in Chinese). (赵巾巾, 高文超, 常宏宏, 李兴, 刘强, 魏文珑, 有机化学, **2014**, *34*, 1941.)
- [3] Lopatriello, A.; Caprioglio, D.; Minassi, A.; Moriello, A.; Formisano, C.; Petrocellis, L.; Appendino, G.; Scafati, O. *Bioorg. Med. Chem.* **2018**, *15*, 4532.
- [4] Jung, M.; Ham, J.; Song, J. *Org. Lett.* **2002**, *4*, 2763.
- [5] Rozners, E.; Liu, Y. *Org. Lett.* **2003**, *5*, 181.
- [6] Hsu, D.-S.; Huang, J.-Y. *Org. Lett.* **2019**, *21*, 7665.
- [7] Li, X.-Q.; Ding, Y.; Qian, L.-J.; Gao, Y.; Wang, X.-Q.; Yan, X.-H.; Xu, X.-S. *J. Org. Chem.* **2019**, *84*, 12656.
- [8] Li, X.-Q.; Wang, X.-Q.; Wang, Z.; Yan, X.-H.; Xu, X.-S. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2019**, *7*, 1875.
- [9] Chalker, J. M.; Thompson, A. L.; Davis, B. G. *Org. Synth.* **2010**, *87*, 288.
- [10] Arimistu, S.; Nakasone, M.; Gima, E. *Tetrahedron Lett.* **2018**, *59*, 887.
- [11] Peri, F.; Bassetti, R.; Caneva, E.; Gioia, L.; Ferla, B.; Presta, M.; Tanghetti, E.; Nicotra, F. *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1* **2002**, 638.
- [12] Liu, J.; Liu, Q.-Y.; Fang, X.-X.; Liu, G.-Q.; Ling, Y. *Org. Biomol. Chem.* **2018**, *16*, 7454.
- [13] Hu, F.; Gao, W.-C.; Chang, H.-H.; Li, X.; Wei, W.-L. *Chin. J. Org. Chem.* **2015**, *35*, 1848 (in Chinese). (胡飞, 高文超, 常宏宏, 李兴, 魏文珑, 有机化学, **2015**, *35*, 1848.)
- [14] Kupper, F.; Feiters, M.; Olofsson, B.; Kaiho, T.; Yanagida, S.; Zimmermann, M.; Carpenter, L.; Luther, G.; Lu, Z.-L.; Jonsson, M.; Kloo, L. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2011**, *50*, 11598.
- [15] Antonietti, R.; Bonadies, F.; Scettri, A. *Tetrahedron Lett.* **1988**, *29*, 4987.
- [16] Parvatkar, P.; Parameswaran, P.; Tilve, S. *Chem.-Eur. J.* **2012**, *18*, 5460.
- [17] Wan, B.-Q.; Jiang, X.-F.; Jia, G.-C.; Ma, S.-M. *Eur. J. Org. Chem.* **2012**, 4373.
- [18] Gao, X.-F.; Yang, H.-L.; Cheng, C.; Jia, Q.; Gao, F.; Chen, H.-X.; Cai, Q.; Wang, C.-J. *Green Chem.* **2018**, *20*, 2225.
- [19] Li, X.-Q.; Xu, X.-S.; Shi, X.-H. *Tetrahedron Lett.* **2013**, *54*, 3071.
- [20] Shantharjun, B.; Rajeswari, R.; Vani, D.; Unnava, R.; Sridhar, B.; Reddy, K. *Asian J. Org. Chem.* **2019**, *8*, 2162.
- [21] Li, X.-Q.; Chen, K.; Tang, Y.-C.; Zhu, H.-H.; Chen, F.; Yan, X.-H.; Xu, X.-S. *Synlett* **2018**, *29*, 1634.
- [22] Wang, H.; Chen, C.; Liu, W.-B.; Zhu, Z.-B. *Beilstein J. Org. Chem.* **2017**, *13*, 2023.
- [23] Zhu, F.-Y.; Wang, Y.-M.; He, M.-C.; Yan, Z.-H.; Lin, S. *Chin. J. Org. Chem.* **2019**, *39*, 1175 (in Chinese). (朱福元, 王彦梅, 何明闯, 严兆华, 林森, 有机化学, **2019**, *39*, 1175.)
- [24] Yang, N.; Yuan, G.-Q. *Org. Biomol. Chem.* **2019**, *17*, 6639.
- [25] Nooy, A.; Besemer, A.; Bekkum, H. *Synthesis* **1996**, 1153.
- [26] Tang, E.; Huang, X.; Xu, W.-M. *Tetrahedron* **2004**, *60*, 9963.
- [27] Yang, N.-Y.; Li, Z.-L.; Ye, L.; Tan, B.; Liu, X.-Y. *Chem. Commun.* **2016**, *52*, 9052.
- [28] Howard, J. L.; Sagatov, Y.; Repusseau, L.; Schotten, C.; Browne, D. L. *Green Chem.* **2017**, *19*, 2798.

(Li, L.; Fan, Y.)