非光催化与电化学体系下有机硫试剂参与的烯烃构建 C—S 键研究进展

王柏文^{a,b} 周永军^a 罗时荷^{*,a,b} 罗晓燕^a
陈伟清^a 杨诗敏^a 汪朝阳^{*,a,b}

(^a 华南师范大学化学学院 教育部环境理论化学重点实验室 广州市生物医药分析化学重点实验室 广州 510006)

(^b 华南理工大学 广东省功能分子工程重点实验室 广州 510640)

摘要 烯烃是重要的合成子,其简洁高效的合成转化一直是有机合成领域的研究热点。近年来,基于烯烃骨架的 C—S 键成键反应特别受科学家的关注。烯烃可以与常见的有机含硫试剂(包括硫醇或硫酚、二硫醚、亚砷、磺酰肼、磺酰氯和亚磺酸钠等)反应,在烯烃的 α -位或者 β -位构筑 C—S 键来合成硫醚、亚砷或砷类化合物。鉴于此,以有机硫试剂的种类为分类依据,综述了近年来非光催化与电化学体系下有机硫试剂参与的烯烃构建 C—S 反应的相关研究。展望未来,在烯烃与有机硫试剂的 C—S 成键反应研究中,双官能团化反应和不对称催化合成具有较好的应用前景。

关键词 烯烃; C—S 键构建; 硫醇; 亚磺酸钠; 芳基乙烯; 硫醚化反应; 双官能团化反应

Research Progress in C—S Bond Formation Reaction of Olefins with Organic Sulfur Reagents under Photocatalyst-Free and Non-Electrochemical Conditions

Wang, Bowen^{a,b} Zhou, Yongjun^a Luo, Shihe^{*,a,b} Luo, Xiaoyan^a
Chen, Weiqing^a Yang, Shimin^a Wang, Zhaoyang^{*,a,b}

(^a Key Laboratory of Theoretical Chemistry of Environment, Ministry of Education, Guangzhou Key Laboratory of Analytical Chemistry for Biomedicine, School of Chemistry, South China Normal University, Guangzhou 510006)

(^b Key Lab of Functional Molecular Engineering of Guangdong Province, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract Olefin is an important synthetic synthon, and its concise and efficient transformation has been a research hotspot in the field of organic synthesis. In recent years, the C—S bond formation based on the olefin skeleton has received particular attention from scientists. Alkenes can react with common organic sulfur-containing reagents, including thiol, disulfide, sulfoxide, sulfonyl hydrazide, sulfonyl chloride, sodium sulfinate and other kinds of organosulfur reagents to build C—S bonds at the α -position or β -position of olefin to synthesize sulfide, sulfoxide or sulfone. Thus, according to the different classification of the used organosulfur reagents, the recent research progresses in C—S bond formation reaction of olefins with organic sulfur reagents under photocatalyst-free conditions and non-electrochemical method is summarized. In the future, among the researches on the C—S bond formation reactions of olefins with inexpensive organosulfur reagents, asymmetrical synthesis and various difunctionalizations are still promising directions.

Keywords alkene; C—S bond formation reaction; thiol; sodium sulfinate; aryl ethylene; thioetherification; difunctionalization

* Corresponding authors. E-mail: wangzy@scnu.edu.cn; pinky_r@163.com

Received June 29, 2020; revised July 24, 2020; published online August 11, 2020.

Project supported by the Science and Technology Project Scientific Special of Guangzhou City (No. 201607010251), the Guangdong Provincial Science and Technology Project (No. 2017A010103016) and the Open Fund of the Key Laboratory of Functional Molecular Engineering of Guangdong Province (No. 2017kf01).

广州市科技计划科学研究专项(No. 201607010251)、广东省科技计划(No. 2017A010103016)和广东省功能分子工程重点实验室开放课题(No. 2017kf01)资助项目。

作为一类重要的化工原料, 烯烃可经过不同的过程合成具有特定官能团的分子, 特别是若能克服烯烃底物本身原有官能团与反应体系的兼容性, 则带有特定官能团的烯烃分子进行进一步衍生化更具有合成意义. 近年来, 烯烃与有机含硫试剂反应构建 C—S 键, 在有机合成方法学方面得到了广泛研究^[1]. 通过烯烃与有机硫试剂的调控, 可合成不同功能的含硫有机分子, 它们在生物医药和功能材料等领域得到了广泛的研究与应用^[2-3].

目前, 从不同的角度出发, 涉及到烯烃与有机含硫试剂反应的综述, 在国内外均有发表^[4-8]. 然而, 几乎没有以烯烃和有机含硫试剂反应构建 C—S 键为主旨的专题文献综述报道. 鉴于此, 本文以有机硫试剂种类为分类依据, 重点对近年来基于烯烃骨架分子的 C—S 键成键反应进行了文献综述, 但限于篇幅所涉的内容仅包含非光催化以及非电化学促进的反应.

1 硫醇/硫酚参与构建 C—S 键反应

1.1 硫醇经亲电反应机理合成硫醚

硫醇或硫酚在 C—S 键成键反应中是一类重要的分子, 近年来有许多相关研究报道. 硫醇可与烯烃通过亲电加成(产生马氏规则加成产物)、自由基加成(产生反马氏规则加成产物)或者共轭加成等反应构建 C—S 键, 通常获得硫醚产物.

芳基乙烯作为一类经典的烯烃衍生物, 其与硫醇/硫酚的亲电加成反应通常可在芳基乙烯的 α -位构建 C—S 键. 常见的金属盐(如 FeCl_3 ^[9]等)作为 Lewis 酸, 能催化该类亲电加成反应, 且硼盐类也可用作催化剂. Stephan 课题组^[10]使用 $[(\text{MeOC}_6\text{H}_4)\text{CPh}_2][\text{BF}_4]$ 催化硫醇与烯烃发生亲电加成反应, 以较高的产率在烯烃的 α -位构建 C—S 键(Eq. 1). 在此工作中, 通过核磁共振谱探究了反应机理, 结果表明硫醇与碳正离子的相互作用产生了催化效果.

1.2 硫醇经自由基反应机理合成硫醚

硫醇/硫酚经历自由基氧化成为硫原子中心自由基, 继而在芳基乙烯的 β -位引入硫原子的研究报道较多. 值得注意的是, 硫醇/硫酚在较为温和的条件下即可产生相应的硫自由基. 因此, 促进硫醇/硫酚与烯烃发生自由基反马氏加成反应的试剂得到了较为深入的研究与开发, 如 $\text{Sc}(\text{OTf})_3$ ^[11]、 CuI ^[12]、 ZnCl_2 ^[13]、氮杂卡宾(NHC)^[14]以及 $\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$ ^[15]等.

这类反应均由硫醇/硫酚氧化成硫自由基启动, 再经自由基加成至芳基乙烯的 β -位, 产生新的碳中心自由

基. 最后, 该碳自由基从反应体系中捕获氢原子成为饱和和烃. 不仅如此, Metzger 课题组^[16]还发现硫醇与烯烃的硫醚化反应还可以在无添加剂、无溶剂的条件下进行, 并且产率较高(Eq. 2).

Mal 课题组^[17]对上述反应进行了进一步拓展, 发现硫酚与芳基乙烯的反应所需条件更温和且时间更短(反应产率 72%~98%). 此外, 还发现如果反应体系中额外加入叔丁基锂并且连通空气, 则可以获得 β -羟基硫醚产物(产率 76~98%)(Scheme 1). 因此, 通过反应条件的控制, 可以调控所获得的硫醚产物的结构.

图式 1 不同条件下硫醇与芳基乙烯之间的硫醚化反应
Scheme 1 Thioetherification reactions between arylthiols and aryl alkenes under different conditions

当芳基乙烯的 α -位连有离去基团(如卤素原子)时, 在氧气存在的条件下, 其与硫醇的反应可产生 β -芳硫基苯乙酮. 雷爱文课题组^[18]发现只需要空气中氧气的促进, 该反应即可顺利进行, 且产率较高(Eq. 3). 在之后的工作中, 他们^[19]继续深入探究了该类型反应, 发现在氧气氛围下, 当离去基团是磷酸酯基时反应产率较高(Eq. 4).

另一方面, 如果芳基乙烯的 α -位连接的是烷基, 则与硫醇的自由基发生加成后形成的碳自由基在氧化剂的作用下会进一步氧化, 并使得邻位碳脱氢, 从而构建新的 C=C 键. 江焕峰课题组^[20]报道了 2,3-二氯-5,6-二氰基-1,4-苯醌(DDQ)与 1,4-萘醌(NQ)协同氧化下 2-芳基烯烃与硫醇的硫醚化反应(Eq. 5). 结果表明, 该反应可以中等至较高的产率合成一系列烯丙基硫醚化合物, 并且具有较好的底物适用范围. 机理研究表明, 这是一个 DDQ 将中间体碳自由基氧化成碳正离子再进一步氧化

生成新的 C=C 键的过程。

在类似的较强氧化体系中,若同时存在着另一亲核试剂(如腈类化合物),则会基于上述碳正离子产生的原理继续发生 Ritter 型反应,生成双官能团化产物。徐新芳课题组^[21]采用 NaI 和 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 作为协同氧化剂,实现了一步在苯乙烯的 α -位上引入酰胺基和 β -位引入硫醚基团的反应(Eq. 6)。该反应具有良好的底物适用性,并且产率大部分在 80% 以上。

此外,王桦课题组^[22]仅使用单质碘作为添加剂,二甲基亚砜(DMSO)作为氧化剂,同样实现了该类转化,反应也是基于类似的机理(Scheme 2)^[21]。

图式 2 基于烯烃、腈和硫醇反应的酰胺基磺基化反应机理
Scheme 2 Reaction mechanism for acetamidosulfenylation of alkenes with nitriles and thiols

之后,林森课题组^[23]对该类反应进行了进一步拓展,将底物范围拓展到了芳基乙烯,并且采用了更为简单的反应体系,只需要 *N*-溴代丁二酰亚胺(NBS)作为氧化剂。最近, Klusmann 课题组^[24]利用过氧化二苯甲酰(BPO)和 HPF_6 协同氧化体系,也成功实现了上述反应。

同样是强氧化体系,邹建平课题组^[25]发现,如果在空气氛围中使用 *t*-BuOOH 作为氧化剂,硫醇和芳基乙烯的硫醚化反应不仅可以在芳基乙烯的 β -位构建 C—S 键,还可以在 α -位构建 C—O 键(Eq. 7)。该反应具有较宽的底物范围,产率大部分在 70% 以上。

对于上述羟基硫醚化合物,如果起始原料烯烃的 α -位存在间隔 2 个碳的末端羧基,则在完成 α -位羟基化之后,该羟基与底物分子的羧基会发生缩合,构建五元环

状体系。基于此,韩建林课题组^[26]开发了氧气氛围下铜催化的内酯化反应(Eq. 8),通过该方法合成了一系列含硫醚基团的五元环内酯类化合物,产率大部分大于 70%。机理控制实验表明,硫醇的 S—H 是必不可少的,而且氧气参与了反应,并最终参与了产物酯基的构建。

特别的是,如果芳基硫醇的巯基邻位存在羟甲基且其与 2-烯基吡啶反应,则可通过羟基捕获碳正离子而构建七元杂环。石枫课题组^[27]以联苯磷酸为催化剂,开发了羟基硫醚化和[5+2]环合反应,合成了一系列氧硫七元杂元环化合物,产率 41%~56%,*dr* 均大于 90% (Eq. 9)。控制对照实验表明,吡啶的 NH 对于[5+2]环合过程是必须的。

1.3 硫醇对 α,β -缺电子烯烃的共轭加成反应合成硫醚

缺电子烯烃与硫醇亲核试剂的对映选择性共轭加成,是合成手性硫醚最有价值的方法之一,已被广泛应用于有机合成和药物化学^[28]。Melchiorre 课题组^[29]报道了硫醇与 α,β -不饱和酮之间的硫醚化反应。发现如果使用异奎宁 Cinchona amine 作为反应的手性催化剂,此类不对称 Michael 加成反应可以取得最佳的产率和 *dr* 值。不仅如此,通过调节酸性添加剂和反应溶剂可以改变催化剂的非对映选择性:当使用 2-氟苯甲酸作为酸性添加剂,氯仿作溶剂时,主要产生顺式产物;当使用二苯基磷酸(DPP)作为酸性添加剂,丙酮作溶剂时,主要产生反式产物(Scheme 3)。因此,可通过简单的条件改变实现高对映选择性的转换。

图式 3 不同条件下硫醇与 α,β -不饱和酮之间的硫醚化反应
Scheme 3 Thioetherification reactions between thiols and α,β -unsaturated ketones under different conditions

如果 α,β -不饱和酮的 C=C 键上只 β -位连有取代基, 此时硫醇与之发生共轭加成只产生一个碳手性中心^[30]. White 课题组^[31]研究了在 FeCl₃ 与 Salen 型配体形成的铁金属络合物的催化下, 硫醇对 α,β -不饱和酮的共轭加成反应可取得较高的产率(89%~98%)和 *ee* 值(93~98%) (Eq. 10).

黄湧课题组^[32]对此类反应进行了进一步拓展. 利用手性 NHC 作为手性 Brønsted 碱型催化剂来催化此类反应, 合成了既与 S 相连又与 CF₃ 基团相连的四级碳手性中心(Eq. 11), 且产率较高. 机理研究表明, 双键与催化剂形成 $\pi-\pi$ 相互作用, 空间位阻较大的 CF₃ 基团远离催化剂的庞大芳基, 从而诱导了手性的产生.

烷基硫醇对 C=C 键 α -位连有取代基的 α,β -不饱和酯发生亲核进攻时, 会使得该 α -位成为手性中心. Dixon 课题组^[33]开发了室温条件下亚氨基磷烷(BIMP)催化剂促进的烷基硫醇与 α,β -不饱和酯的 Michael 加成反应, 其产率高达 99%, *ee* 值高达 96% (Eq. 12). 此外, 该反应中亚氨基磷烷催化剂是双功能化的, 其既是较强的 Brønsted 碱, 又能诱导产生高对映选择性.

硫酚在空气的氧化下即可成为硫自由基, 霍从德课题组^[34]利用这个方法, 发展了空气氛围下硫酚与 α,β -不饱和酯的硫醚化反应, 同时在双键上形成 C—S 键与 C—O 键, 获得一系列 β -羟基硫醚类化合物(Eq. 13). 机理验证实验表明, 反应通过自由基型自动氧化的羟基硫醚化过程进行. 当然, 该类反应也可在铜催化的氧气氛围下进行^[35].

烯醛类化合物也可在室温的条件下与硫酚反应^[36]. 何林课题组^[37]以 NHC 为催化剂, 六氟异丙醇(HFIP)为

添加剂, 实现了芳基烯醛与硫醇的硫醚化反应, 并且反应产率大部分大于 80% (Eq. 14).

类似地, 当硝基与烯烃直接相连时, 也会产生共轭效应使得烯烃成为缺电子烯烃^[38]; 而且, 硫酚可在温和的条件下直接与 β -硝基苯乙烯类化合物反应, 在 C=C 键的 β -位构筑 C—S 键, 生成硫醚类化合物^[39]. 彭云贵课题组^[40]将手性奎宁型催化剂应用到该类反应中(Eq. 15), 获得了优异的不对称诱导效果, 产率大部分大于 95%, *ee* 值大部分大于 90%.

若在上述缺电子烯烃(如 α,β -不饱和醛酮、 α,β -不饱和酯或硝基乙烯类化合物)的 C=C 键另一侧再引入氨基基团, 则与硫酚发生硫醚化反应时, 会在 C=C 键的 α -位构建 C—S 键. 万结平课题组^[41]开发了 KIO₃ 作催化剂, 乳酸乙酯(EL)为溶剂时, 氨基烯基酮类化合物与硫酚的反应(Eq. 16), 合成了一系列 *E*-构型的 β -氨基硫醚(产率大部分大于 80%).

不仅如此, 姜耀甲课题组^[42]研究了 Pd(OAc)₂ 与 Cu(OAc)₂ 协同催化的该类反应, 同样取得了较好的结果(产率大部分大于 80%). 之后, Prabhu 课题组^[43]对该类型反应进行了进一步拓展, 并简化了反应条件, 发现以碘单质为添加剂、二甲基亚砷(DMSO)为溶剂时, 该反应可以取得中等至较高产率(产率大部分大于 60%).

Altman 课题组^[44]使用催化量的 1,1,3,3-四甲基胍(TMG)以 β,β -二氟芳基乙烯和芳基硫酚为原料合成了 α,α -二氟硫醚化合物, 并且产率大部分大于 70% (Eq. 17). 值得一提的是, 与传统的方法相比, 通过该途径合成 α,α -二氟硫醚化合物可有效地避免 F 原子的离去. 由于反应体系只使用了催化量的碱, 因此该反应对官能团的兼容性好.

1.4 过渡金属催化硫醇与烯烃反应合成硫醚

传统观念中,当硫参与金属催化体系时,往往被认为是导致金属中毒的原因。但是,随着该问题不断被克服和解决,金属催化 C—S 键形成反应已成为近年来金属催化领域的研究热点,并且基于烯烃底物的该类型反应也有报道。该类反应一般是金属催化剂先与硫醇配位,再继续由烯烃与金属配位,之后发生烯烃的硫-金属化,最后发生质子化产生硫醚产物并使得催化剂再生。Ogawa 课题组^[45]报道了 Pd(OAc)₂ 催化含杂原子烯烃与硫醇的加成反应,产率大部分大于 80% (Scheme 4)。

图式 4 金属催化硫醇与含杂原子烯烃的硫醚化反应

Scheme 4 Metal-catalyzed thioetherification of thiols and heteroatom-containing olefins

之后, Ogawa 课题组^[46]继续研究了金催化的烯烃与硫醇的硫氢化反应,结果表明会得到反马氏加成的硫氢化产物,产率中等至较高(Eq. 18)。同时发现,如果烯烃底物 C=C 键连有环丙基时,反应可顺利进行且没有观察到环丙基的开环,表明该反应符合反马氏加成规律但非自由基机理。

Dong 课题组^[47]使用 [Rh(C₂H₄)₂Cl]₂ 为金属催化剂,则硫醇与 1,3-二烯会发生 3,4-硫氢化的反马氏加成反应,产率大部分大于 80% (Eq. 19)。该反应可能是由铑金属先与硫醇发生氧化加成,接着再与 1,3-二烯中取代基较少的 C=C 键发生 η^2 -配位,之后 1,3-二烯插入铑-氢键中产生 π -烯丙基铑,最后发生还原消除获得烯丙基硫醚产物并使得催化剂再生(Scheme 5)。

有趣的是, Dong 课题组^[48]还发现,使用 Rh(cod)₂SbF₆ 为铑催化剂且存在手性配体时,有更多取代基的 1,3-二烯也能进行硫氢化,但此时发生马氏加成,而且是在位阻较大的双键位置进行反应,并得到手性产

图式 5 1,3-丁二烯的 3,4-反马氏硫氢化反应可能的机理

Scheme 5 Proposed mechanism of 3,4-*anti*-Markovnikov hydrothiolation of 1,3-dienes

物(Eq. 20), 产率最高可达 99%, *ee* 值最高可达 98%。机理研究表明,与上述反应产生不同结果的原因,可能在于此时是由铑与 1,3-二烯发生 η^4 -配位,后续经历 1,4-插入产生 π -烯丙基铑,从而产生了区域选择性的差异。

1.5 硫醇与烯烃反应合成亚砷

亚砷基团也经常出现在药物分子和天然产物中,并且亚砷分子是合成转化中的重要中间体。以硫醇和烯烃为原料,也能以引入亚砷基团的形式构建 C—S 键,但一般需要在反应体系中添加氧化剂。池永贵课题组^[49]以 *N*-氟代二苯磺酰亚胺(NFSI)为氧化剂,在室温下以中等至较高的产率合成了一系列亚砷类化合物(Eq. 21)。在此反应过程中, NFSI 氧化硫醇脱氢产生硫自由基,继而对烯烃进行自由基加成产生新的碳自由基,该碳自由基再从体系中捕获氢原子。最后,在氧化体系中,硫醚基团被氧化成亚砷。

1.6 硫醇与烯烃反应合成砜

不仅如此,通过硫醇与烯烃反应获得砜类产物,近年来也有报道。王桦课题组^[50]采用 I₂O₅ 为氧化剂, 1,8-二氮杂二环-双环(5,4,0)-7-十一烯(DBU)为碱,在芳基烯烃的 β -位引入了砜基基团,产率中等至较高(Eq. 22)。之后,潘远江课题组^[51]采用 CuI/4-二甲氨基吡啶(DMAP)体系,以空气中的氧气作氧化剂,同样成功地实现了该类型的反应,产率最高可达 84%。

但是,在非碱性体系中,烯烃与硫酚的磺基化反应则不会发生消除以随即恢复烯烃结构,而是会使得烯烃在 β -位磺基化的同时也在 α -位发生氧化性的官能团化^[52]. Yadav 课题组^[53]研究了在氧气氛围下,以 AgNO_3 与 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 为协同氧化剂,以烯烃与硫酚为原料合成 β -羰基磺基化合物的反应,产率大部分大于80% (Eq. 23).

2 二硫醚参与构建 C—S 键反应

二硫醚在 C—S 键成键反应中也是一类表现优良的分子. 近年来,围绕烯烃与二硫醚反应构建 C—S 键的研究主要集中于合成硫醚类化合物的反应^[54]. 张兴国课题组^[55]发展了 $\text{Cu}(\text{OTf})_2$ 催化芳基烯烃与二硫醚的硫醚化反应,在芳基烯烃的 β -位引入硫醚基团,产率中等至较高(Eq. 24). 在二硫醚产生硫自由基之后,再与烯烃反应,后续的反应机理与上述硫酚与烯烃反应的过程类似. 因此,该部分对二硫醚参与反应的机理不再赘述.

此外,二硫醚也能参与烯烃双官能团化反应(不仅是硫醚化),反应在简单条件下即可实现,且通常有碘参与反应^[56]. 孙凯等^[57]利用离子液体催化剂,一步完成了分别在烯烃的 β -位构建 C—S 键、 α -位构建 C—N 键而同时硫醚化、胺化的反应,产率大部分大于80% (Eq. 25).

纪顺俊课题组^[58]以 $\text{RhCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 为催化剂,烯酸和二硫醚为原料,在烯酸 C=C 键的 β -位引入了硫醚基团,产率中等至较高(Eq. 26). 通过控制对照实验探究其反应机理发现,如果以酯基替换底物中的羧基,则得不到

相应的产物,表明乙烯基上的羧基是必不可少,其起到了定位导向的作用.

其他类型的 α,β -不饱和羰基化合物(如 α,β -不饱和酰胺)与二硫醚反应,在 C=C 键上构建 C—S 键同样引起了科学家的兴趣^[59-61]. 纪顺俊课题组^[62]开发了铑、铜共催化二硫醚在 α,β -不饱和酰胺的 β -位构建 C—S 键反应,产率中等至较高(Eq. 27).

当烯烃的 C=C 键与卤素直接相连时,会在反应过程中赋予底物更多的变化方向,由此可合成更加复杂的分子,在合成方法学领域具有重要的研究意义^[63-64]. 王磊课题组^[65]开发了铜催化 2-(β,β -二溴乙基)苯酚类化合物与二硫醚反应合成 2-硫醚苯并呋喃类化合物的方法,取得了较好的结果,产率大部分大于70% (Eq. 28).

3 硫代磺酸酯参与构建 C—S 键反应

近年来,随着研究硫代磺酸酯的报道逐渐增多,其合成方法与相关应用也被逐步开发^[66]. 不仅如此,由于其稳定好,硫代磺酸酯还是一类有效构建 C—S 键的合成子^[67]. Reddy 课题组^[68]以 N,N -二甲基甲酰胺(DMF)为溶剂,醋酸钠为添加剂,通过 β -碘代磺基化合物和硫代磺酸酯反应,合成了一系列 β -硫醚磺基双取代的酮类化合物,产率大部分大于70% (Eq. 29).

同时,也有利用烯烃和硫代磺酸酯构建 C—S 键而实现双官能团化的研究. 宋秋玲课题组^[69]开发了 CuTc 、 B_2Pin_2 体系下芳基烯烃、硫代磺酸酯和 $\text{BrCF}_2\text{COOEt}$ 之间的三组分自由基型反应,该方法可直接一步在烯烃的 α -位构建 C—S 键和 β -位构建 C—C 键,产率中等至较高而且具有较好的对映选择性(Eq. 30).

当然, 硫代磺酸酯还可作为磺基化的来源, 参与到与烯烃构建 C—S 键的反应中^[70], 甚至基于此而同样实现烯烃的双官能团化. Jang 课题组^[71]以硫代磺酸酯和芳基乙烯为原料, 合成了一系列 β -羟基磺类化合物, 产率大部分大于 70% (Eq. 31).

如果利用 β,β -二溴乙烯类化合物为底物, 可在简单条件下, 充分利用硫代磺酸酯的磺基和炔硫基, 高原子利用率同时在 C=C 键的 α -位和 β -位实现不同形式 C—S 键的构建. Reddy 课题组^[72]以碳酸铯为碱, 合成了一系列 1,2-磺基磺类化合物, 产率中等至较高 (Eq. 32). 该反应可能的过程如下: 硫代磺酸酯在加热的条件下产生磺基自由基和炔硫基自由基, 它们分别与 β,β -二溴乙烯在碱性条件下产生的 1-溴炔烃反应, 随后继续在碱性条件下脱溴并发生质子化而恢复烯烃结构.

4 亚磺参与构建 C—S 键反应

对亚磺类化合物与烯烃的 C—S 键形成反应, 相关报道主要集中在二甲基亚磺(DMSO), 这是因为其不仅可作为一种廉价易得的非质子性极性溶剂, 而且在甲磺基的引入方法中备受关注^[73]. 同时, 2(5H)-呋喃酮作为一类分子内存在内酯结构的特殊烯烃, 当其 C=C 键与杂原子相连时, 官能团兼容性强的高效衍生化反应日益受到关注^[74-76]. 鉴于此, 本课题组^[77]开发了铜催化 3,4-二卤-2(5H)-呋喃酮与 DMSO 之间的甲磺基化反应, 产率大部分大于 70% (Eq. 33). 值得注意的是, 该反应底物范围不局限于 DMSO, 其他类型的亚磺, 如二苄基亚磺、二苯基亚磺和二丁基亚磺也能适用于该转化, 实现不同的炔硫基化. 当使用甲基苯基亚磺(即 R^2 、 R^3 不同)时, 则会发生苯磺基化反应, 这可能与亚磺的分解方式有关.

在含有氢卤酸或可产生氢卤酸的氛围下, 如果烯烃与 DMSO 的反应体系中还存在另一亲核试剂(如醇), 则可以进一步发生双官能团化反应. 李映伟课题组^[78]研究了碘化铵促进的烯烃、DMSO 和乙醇之间的三组分双

官能团化反应, 合成了一系列 β -炔氧基硫醚化合物, 产率大部分大于 70% (Eq. 34).

对于其他含有硫醚化的双官能团化反应类型的探索, 一直有文献报道^[79]. 同样采用碘化铵为添加剂, 陈路课题组^[80]开发了一步在烯烃 C=C 键的 α -位与 β -位上均引入甲磺基的方法 (Eq. 35). 为了实现 β -氯代硫醚的合成, 胥波课题组^[81]开发了盐酸反应体系, 而田红玉课题组^[82]以 $(\text{COCl})_2$ 为添加剂进行反应.

除了甲磺基化反应, DMSO 也可以实现基于烯烃骨架的甲磺基引入, 得到磺基烯烃产物^[83]. 如果反应体系中有氧气的参与, 还可以获得 β -羰基磺类化合物^[84]. 雷爱文课题组^[85]研究了在钯铜共催化体系中, CO 与 O_2 辅助参与的 β -羰基磺的合成, 产率中等至较高 (Eq. 36). 机理验证实验表明, 反应体系中 CO 与 O_2 的作用在于促进 C—Y 键的断裂. 由于该转化可选择性地断裂 C—C 键或其他 C—Y 键, 使反应底物适用范围大大拓宽.

除了 DMSO, 科学家们同样开拓了以其他亚磺类化合物作为构建 C—S 键硫源的反应^[86]. 值得一提的是, 当采用某些具有特殊结构的亚磺类化合物为原料时, 此类转化在复杂分子合成方面表现优异^[87]. Magauer 课题组^[88]开发了亚磺类化合物与烯烃的 [3+2] 环加成反应, 以中等至较高的产率合成了一系列四氢噻吩衍生物 (Eq. 37). 该反应对于芳基烯烃、其他类型的 α,β -不饱和共轭二烯等都具有良好的适用性, 而且此方法可应用于生物活性物质或药物分子的合成.

5 磺酰肼/磺酰氯参与构建 C—S 键反应

5.1 磺酰肼与烯烃反应合成硫醚

磺酰肼也可在还原性氛围中作为合成硫醚类化合物的硫源^[89], 该类硫醚化反应往往是在有单质碘的体

系下进行的^[90]。田仕凯课题组^[91]开发了通过 *N*-芳基丙烯酰胺和磺酰肼的硫醚化反应合成 3-位硫醚取代的 2-吡啶酮的方法(Eq. 38)。该串联环化反应只需要加入碘单质, 产率最高可达 97%。

对于分子间双官能团化反应, 田仕凯课题组^[92]以芳基乙烯、磺酰肼和醇为原料, 单质碘为催化剂, 以中等至较高的产率合成了一系列 β -羟基硫醚化合物(Eq. 39)。田仕凯课题组^[93]还发现, 如果以烯基碘化合物作为反应底物, 则此类以磺酰肼为硫源的硫醚化反应可在无外加碘的体系中进行(Eq. 40)。

5.2 磺酰肼与烯烃反应合成硫

相比之下, 科学家的研究重点在于开发以磺酰肼作为硫基来源的方法, 此类硫基化反应的相关报道也较多^[94]。Peddinti 课题组^[95]以芳基乙烯和磺酰肼为原料, 在单质碘和叔丁基过氧化氢协同氧化体系中以中等至较高的产率合成了烯基硫醚类化合物(Eq. 41)。

如果烯烃与磺酰肼的反应体系中有氧气参与, 则可在烯烃的 β -位构建 C—S 键的同时也在 α -位构建 C—O 键^[96]。王桦课题组^[97]报道了氧气氛围下铜催化的芳基乙烯化合物与磺酰肼的硫基化反应, 以较高的产率合成了一系列 β -羰基硫醚类化合物(Eq. 42)。

张贵生课题组^[98]基于四丁基溴化铵和叔丁基过氧化氢体系也实现了该类反应。值得一提的是, 合成此类 β -羰基硫醚的底物不仅局限于简单的芳基乙烯, 当芳基乙烯 C=C 键的 α -位上连有羧基^[99]、酰胺基^[100]或

叠氮基^[101]时, 这些底物也可经历类似的过程转化为 β -羰基硫醚类化合物(Eq. 43)。

不仅如此, 仍以磺酰肼和芳基乙烯为原料, 科学家们也开发了在氧气氛围下 β -羟基硫醚类化合物的合成方法^[102]。Mal 课题组^[103]成功实现了空气氛围中氧气氧化的 β -羟基硫醚类化合物的合成。

其他条件下, 也能实现烯烃的各种双官能团化反应, 合成 β -碘代硫醚^[104]和 β -过氧基硫醚^[105]等多种类型的化合物。在有水和空气的条件下, 汪志勇课题组^[106]还实现了磺酰肼、芳基乙烯和亚硝酸叔丁酯(TBN)三组分合成 α -硫基酮肟的反应(Eq. 44)。在该自由基型的双官能团化反应中, TBN 既是反应的氧化剂又提供了亚硝基自由基, 而该亚硝基自由基则是羟亚胺基的来源。

近年来, 磺酰肼参与的烯烃硫基化^[107]或硫基化^[108]反应同样得到了较大发展。易文斌课题组^[109]仅使用还原剂 PPh_3 作为反应唯一的添加剂, 以烯烃和三氟甲基磺酰肼为原料, 实现了 β -氯代三氟甲基硫醚的合成, 产率中等至较高(Eq. 45)。最近, 易文斌课题组^[110]继续拓展了此类反应, 发现该类反应也可在铜催化下进行。

此外, 赵玉芬课题组^[111]使用芳基乙烯和磺酰肼为原料, 叔丁基过氧化氢为氧化剂, 合成了 β -羰基硫醚类化合物。赵铭钦课题组^[112]研究了铜催化磺酰肼、芳基乙烯和 *N,N'*-四甲基二硫双硫羧胺之间的三组分反应, 该方法可一步在芳基乙烯 C=C 键的 α -位和 β -位构建 C—S 键(Eq. 46)。

Buchwald 课题组^[113]还研究了铜催化 1,5-烯酸与磺酰氯之间的磺基化反应. 结果表明, 当使用 Ag_2CO_3 作为碱时, 该反应能以极佳的产率(95%)和较高的 *ee* 值(77%)合成磺基取代的五元环内酯化合物(Eq. 47). 机理研究表明, 反应过程中的铜络合物可能采用扭曲的方形平面几何构象, 与铜原子相互作用的单电子最高占用轨道(SOMO)可能接近垂直于苯环平面的位置, 而芳基在过渡态中存在空间位阻, 最终产生了手性.

6 亚磺酸钠/亚磺酸参与构建 C—S 键反应

6.1 亚磺酸钠与烯烃反应合成硫醚

亚磺酸钠作为一类来源广泛、合成简便、价格便宜的含硫试剂^[114], 近年来其参与的 C—S 键形成反应引起了科学家的广泛关注. 在还原性体系中, 可利用亚磺酸钠高效地实现烯烃的硫醚化反应^[115]. 林森课题组^[116]开发了在单质碘/ PPh_3 协同还原下芳基乙烯、亚磺酸钠和醇的三组分反应, 一步同时在烯烃 C=C 键的 β -位构建 C—S 键和 α -位构建 C—O 键(Eq. 48).

最近, 我们^[117]以 1,1-二芳基乙烯和亚磺酸钠为原料, 仅使用氢碘酸为还原剂, 合成了一系列烯基硫醚类化合物, 产率最高可达 99% (Eq. 49). 机理研究表明, 反应体系的氢碘酸在还原亚磺酸钠后产生氧化产物单质碘, 该单质碘继续承担了氧化相关中间体脱氢的作用 (Scheme 6). 对所合成的化合物进行光学性能考察, 发现该类烯基硫醚化合物是一类新型的三取代烯基类聚集诱导发光(AIE)分子, 可应用于苦味酸的荧光检测.

6.2 亚磺酸钠与烯烃反应合成砜

亚磺酸钠也是常见的砜基直接来源^[118]. 王桦课题组^[119]开发了单质碘促进下芳基乙烯与亚磺酸钠的砜基化反应, 在芳基乙烯的 β -位引入砜基基团. 同样是室温下单质碘促进的反应, 黄焰根课题组^[120]研究了铜催

图式 6 1,1-二芳基乙烯的直接硫醚化反应

Scheme 6 Direct thioetherification of 1,1-diarylethene

化时芳基乙烯与三氟甲基亚磺酸钠的砜基化, 但该方法是在烯烃 C=C 键的 α -位引入三氟甲砜基(Eq. 50).

2(5*H*)-呋喃酮是一含有多官能团的特殊烯烃, 其反应性质^[75-76,121-122]及合成应用^[123-125]一直是个令人感兴趣的课题^[74], 本课题组^[126]也开发了 3,4-二卤-2(5*H*)-呋喃酮与亚磺酸钠的砜基化反应(Eq. 51). 该反应只需加入四丁基溴化铵作为相转移催化剂, 无需其他的添加剂, 产率最高可达 94%. 机理验证实验表明, 在该反应体系中亚磺酸钠被氧化为砜基自由基, 空气中的氧气和离去的溴自由基分别起到了启动氧化和承担氧化循环的作用.

以其他官能团化的烯烃为原料进行的砜基化也有报道^[127]. 李玮课题组^[128]使用 β,γ -不饱和酮为原料, 经亚磺酸钠砜基化, 以中等至较高的产率合成了带有砜基的异噻唑啉类化合物(Eq. 52). 机理研究表明, 反应中的中间体是酮型氧自由基, 并且该反应可能是经过 5-*exo-trig* 型环合过程实现的(Scheme 7).

在亚磺酸钠参与的烯烃砜基化反应中, 同样也可实现双官能团化. Itoh 课题组^[129]以芳基乙烯和亚磺酸钠为原料, 单质碘为添加剂, 实现了空气氛围下 β -羟基砜的合成. Yadav 课题组^[130]使用过硫酸钾为氧化剂, 开发了亚磺酸钠与芳基乙烯反应合成 β -羰基砜的方法. 尹双凤课题组^[131]以 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为氯源, 亚磺酸钠为砜基源, 合成了一系列 β -氯代砜类化合物(Eq. 53).

图式 7 烯基肟与亚磺酸钠的氧磺基化反应

Scheme 7 Oxysulfonylation of alkenyl oximes with sodium sulfinates

近来, 亚磺酸钠参与的三组分反应也引人注目^[132], 其不仅可使烯烃进行双官能团化反应^[133], 也可使烯烃被三官能团化. 周荣课题组^[134]研究了空气氛围下铜催化的亚磺酸钠、芳基乙烯与芳基重氮盐的三组分反应 (Eq. 54). 结果表明, 通过该反应可以简单高效地合成 α -芳基偶氮取代的 β -羰基磺类化合物, 产率大部分大于 70% (Scheme 8).

图式 8 α -芳基偶氮基- β -羰基磺的合成

Scheme 8 Synthesis of α -arylhydrazo- β -ketosulfones

近年来, 亚磺酸与烯烃反应构建 C—S 键的方法也有报道, 且主要集中在磺基化反应^[135-136]. 纪顺俊课题

组^[137]开发了以烯丙基醇类化合物合成烯丙基磺类化合物的方法 (Eq. 55). 该反应仅需 5 min 即可以较高产率获得目标产物, 并且在该转化中, 分子内双键发生了迁移.

不仅如此, 科学家们在基于亚磺酸与烯烃的双官能团化反应领域里同样开展了一些系统性研究^[138]. 雷爱文课题组^[139]通过空气中氧气参与烯烃与亚磺酸的磺基化反应, 在温和的条件下以较高的产率合成了一系列 β -羟基磺 (Eq. 56). 机理验证实验表明, 产物中羟基来源于空气中的氧气, 而 PPh_3 起到了还原剂的作用.

刘国生课题组^[140]使用亚磺酸作为磺基来源, NFSI 为氟原子来源, 合成了 β -氟代磺类化合物 (Eq. 57). 该反应具有良好的底物适用性, 反应产率中等至较高, 且对映选择性较高.

7 其他有机硫试剂与烯烃的反应

近年来, 科学家们也开发了其他类型的有机硫试剂, 尤其是新兴的硫亲电试剂^[141-142], 用以与烯烃反应构筑 C—S 键^[143]. 赵晓丹课题组^[144]使用手性硒催化剂, 以 $(\text{PhSO}_2)_2\text{NSCF}_3$ 为 SCF_3 的来源, 以极佳的产率和 *ee* 值合成了一系列三氟甲基取代的四氢萘化合物 (Eq. 58). 不仅如此, 他们^[145]还以相同的试剂和催化剂, 成功实现了链状烯烃双键迁移的立体选择性三氟甲基磺基化反应 (Eq. 59).

当然, 以 $(\text{PhSO}_2)_2\text{NSCF}_3$ 为 SCF_3 的来源, 也能在普通烯烃的 β -位成功引入三氟甲基^[146]. Cho 课题组^[147]以丙烯酮为底物, 在 C=C 键的 α -位引入了三氟甲基.

除 $(\text{PhSO}_2)_2\text{NSCF}_3$ 外, N -三氟甲基硫基丁二酰亚胺^[148]与 N -三氟甲基硫基邻苯二甲酰亚胺^[149]也是表现优异的三氟甲基化试剂, 均可应用于烯烃底物^[150-151]。汪君课题组^[152]发现, 在以轴手性联萘为配体的铜催化体系中, 以二乙基锌为亲核试剂, N -三氟甲基硫基邻苯二甲酰亚胺为亲电试剂, 可以较高产率在 α,β -不饱和酮的 $\text{C}=\text{C}$ 键上引入乙基和三氟甲基(Eq. 60)。

对基于烯烃底物不对称合成的双官能团化, 也可使用手性催化剂。赵晓丹课题组^[153]使用手性硒为催化剂, N -烯硫基丁二酰亚胺为亲电三氟甲基硫基来源, TMSN_3 为亲核试剂, 以较高的产率同时在烯烃 $\text{C}=\text{C}$ 键上构筑 $\text{C}-\text{S}$ 与 $\text{C}-\text{N}$ 键(Scheme 9)。

图式 9 硒催化 N -烯丙基磺酰胺的叠氮硫醚化反应

Scheme 9 Selenide-catalyzed azidothiolation of N -allyl sulfonamides

除此之外, 科学家们也开发了其他更多类型的亲电性硫试剂^[154], 如三氟甲基硫代过氧化物(**1**)^[155]、 N -三氟甲基硫基糖精(**2**)^[156-157]以及 2-(三氟甲基硫代)丙二酸二乙酯(**3**)^[158]等(图 1)。得益于此, 有机硫试剂参与的 $\text{C}-\text{S}$

图 1 几种亲电性有机硫试剂

Figure 1 Some electrophilic organosulfur reagents

成键反应得到了更深层次的发展, 但相关应用研究也亟待进行。

事实上, 推而广之, 针对烯烃等底物, 近年来一些基于无机硫源(如 S_8 ^[159]、 AgSCF_3 ^[160-161]和焦亚硫酸钠^[162]等)的有机合成研究也日益活跃。但限于篇幅, 本文暂时未能逐一展开综述。

8 总结与展望

综上所述, 本文阐述了非光催化、非电化学促进下, 烯烃与有机硫试剂反应构建 $\text{C}-\text{S}$ 键的方法, 主要包括以硫醇、二硫醚、亚砷、砷、磺酰类或亚磺酰类化合物为原料, 通过简单高效的途径合成硫醚、亚砷或者砷类化合物。在这些非光催化与电化学方法转化中, 实现烯烃底物的区域选择性和立体选择性的官能团化反应, 特别是多官能团化是近年来研究热点。

值得注意的是, 对于以上起始原料实现烯烃的官能团化, 使用光催化^[163-166]或电化学^[167-170]方法具有较好的前景。这是因为, 这些转化反应条件温和^[171-172], 减少了氧化剂的使用量甚至无需添加氧化剂。并且对金属催化反应的进行了更深入的研究, 特别是在体系中存在大量硫化物的情况下, 仍能克服对金属的中毒现象。但是, 本文限于篇幅未对光催化与电化学反应进行详细阐述。展望未来, 通过不拘泥于光催化与电化学的方法, 使用上述各种廉价的有机硫试剂或者功能化的有机硫试剂作为硫源, 巧妙地实现功能化含硫分子的定向合成, 在今后仍然具有很大的挑战性。

References

- [1] Trost, B. M.; Kalnins, C. A. *Chem.-Eur. J.* **2019**, *25*, 11193.
- [2] Hofman, K.; Liu, N.-W.; Manolikakes, G. *Chem.-Eur. J.* **2018**, *24*, 11852.
- [3] Mampuy, P.; McElroy, C. R.; Clark, J. H.; Orru, R. V. A.; Maes, B. U. W. *Adv. Synth. Catal.* **2020**, *362*, 3.
- [4] Zhang, S. N.; Yang, S. H.; Huang, L. H.; Zhao, B. L.; Cheng, K.; Qi, C. Z. *Chin. J. Org. Chem.* **2015**, *35*, 2259 (in Chinese). (张诗浓, 杨胜虎, 黄乐浩, 赵保丽, 程凯, 齐陈泽, 有机化学, **2015**, *35*, 2259.)
- [5] Fang, Y. Y.; Luo, Z. G.; Xu, X. M. *RSC Adv.* **2016**, *6*, 59661.
- [6] Huang, G. B.; Li, X. Y.; Luo, J. R.; Luo, Z. H.; Tan, M. X. *Chin. J. Org. Chem.* **2019**, *39*, 617 (in Chinese). (黄国保, 李秀英, 罗金荣, 罗志辉, 谭明雄, 有机化学, **2019**, *39*, 617.)
- [7] Guo, W.; Tao, K. L.; Tan, W.; Zhao, M. M.; Zheng, L. Y.; Fan, X. L. *Org. Chem. Front.* **2019**, *6*, 2048.
- [8] Li, Y. Q.; Fan, Y. H. *Synth. Commun.* **2019**, *49*, 3227.
- [9] Cabrero-Antonino, J. R.; Leyva-Perez, A.; Corma, A. *Adv. Synth. Catal.* **2012**, *354*, 678.
- [10] Mosaferi, E.; Ripsman, D.; Stephan, D. W. *Chem. Commun.* **2016**, *52*, 8291.
- [11] Kucinski, K.; Pawluc, P.; Hreczycho, G. *Adv. Synth. Catal.* **2015**, *357*, 3936.
- [12] Taniguchi, N. *ChemistrySelect* **2018**, *3*, 6209.
- [13] Taniguchi, N.; Kitayama, K. *Synlett* **2018**, *29*, 2712.
- [14] Chun, S.; Chung, J.; Park, J. E.; Chung, Y. K. *ChemCatChem* **2016**,

- 8, 2476.
- [15] Rosa, C. H.; Peixoto, M. L. B.; Rosa, G. R.; Godoi, B.; Galetto, F. Z.; D'Oca, M. G. M.; Godoi, M. *Tetrahedron Lett.* **2017**, *58*, 3777.
- [16] Biermann, U.; Metzger, J. O. *Eur. J. Org. Chem.* **2018**, 730.
- [17] Choudhuri, K.; Mandal, A.; Mal, P. *Chem. Commun.* **2018**, *54*, 3759.
- [18] Lu, Q. Q.; Wang, H. M.; Peng, P.; Liu, C.; Huang, Z. Y.; Luo, Y.; Lei, A. W. *Org. Chem. Front.* **2015**, *2*, 908.
- [19] Wang, H. M.; Wang, G. Y.; Lu, Q. Q.; Chiang, C.-W.; Peng, P.; Zhou, J. F.; Lei, A. W. *Chem.-Eur. J.* **2016**, *22*, 14489.
- [20] Li, C. S.; Li, J. X.; Tan, C. W.; Wu, W. Q.; Jiang, H. F. *Org. Chem. Front.* **2018**, *5*, 3158.
- [21] Zheng, Y.; He, Y.; Rong, G. W.; Zhang, X. L.; Weng, Y. C.; Dong, K. Y.; Xu, X. F.; Mao, J. C. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 5444.
- [22] Cui, H. H.; Liu, X. X.; Wei, W.; Yang, D. S.; He, C. L.; Zhang, T. T.; Wang, H. J. *Org. Chem.* **2016**, *81*, 2252.
- [23] Wang, D. Y.; Yan, Z. H.; Xie, Q. H.; Zhang, R. X.; Lin, S.; Wang, Y. X. *Org. Biomol. Chem.* **2017**, *15*, 1998.
- [24] Liu, S. S.; Klusmann, M. *Chem. Commun.* **2020**, *56*, 1557.
- [25] Zhou, S.-F.; Pan, X. Q.; Zhou, Z.-H.; Shoberu, A.; Zou, J.-P. *J. Org. Chem.* **2015**, *80*, 3682.
- [26] Du, B. N.; Wang, Y.; Mei, H. B.; Han, J. L.; Pan, Y. *Adv. Synth. Catal.* **2017**, *359*, 1684.
- [27] Zhao, J.-J.; Tang, M.; Zhang, H.-H.; Xu, M.-M.; Shi, F. *Chem. Commun.* **2016**, *52*, 5953.
- [28] Hui, Y. H.; Jiang, J.; Wang, W. T.; Chen, W. L.; Cai, Y. F.; Lin, L. L.; Liu, X. H.; Feng, X. M. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2010**, *49*, 4290.
- [29] Tian, X.; Cassani, C.; Liu, Y. K.; Moran, A.; Urakawa, A.; Galzerano, P.; Arceo, E.; Melchiorre, P. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 17934.
- [30] Kitanosono, T.; Sakai, M.; Ueno, M.; Kobayashi, S. *Org. Biomol. Chem.* **2012**, *10*, 7134.
- [31] White, J. D.; Shaw, S. *Chem. Sci.* **2014**, *5*, 2200.
- [32] Chen, J. A.; Meng, S. X.; Wang, L. M.; Tang, H. M.; Huang, Y. *Chem. Sci.* **2015**, *6*, 4184.
- [33] Farley, A. J. M.; Sandford, C.; Dixon, D. J. *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, *137*, 15992.
- [34] Huo, C. D.; Wang, Y. J.; Yuan, Y.; Chen, F. J.; Tang, J. *Chem. Commun.* **2016**, *52*, 7233.
- [35] Xi, H.; Deng, B. C.; Zong, Z. Z.; Lu, S. L.; Li, Z. P. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 1180.
- [36] He, L.; Guo, H.; Li, Y.-Z.; Du, G.-F.; Dai, B. *Chem. Commun.* **2014**, *50*, 3719.
- [37] Cong, Z.-S.; Li, Y.-G.; Du, G.-F.; Gu, C.-Z.; Dai, B.; He, L. *Chem. Commun.* **2017**, *53*, 13129.
- [38] Kawazoe, S.; Yoshida, K.; Shimazaki, Y.; Oriyama, T. *Tetrahedron Lett.* **2015**, *56*, 410.
- [39] Li, Z.; Song, G. Y.; He, J. J.; Du, Y.; Yang, J. Y. *J. Sulfur Chem.* **2017**, *38*, 686.
- [40] Wei, Q.; Hou, W. D.; Liao, N.; Peng, Y. G. *Adv. Synth. Catal.* **2017**, *359*, 2364.
- [41] Wan, J.-P.; Zhong, S. S.; Xie, L. L.; Cao, X. J.; Liu, Y. Y.; Wei, L. *Org. Lett.* **2016**, *18*, 584.
- [42] Jiang, Y. J.; Liang, G. H.; Zhang, C.; Loh, T.-P. *Eur. J. Org. Chem.* **2016**, 3326.
- [43] Siddaraju, Y.; Prabhu, K. R. *J. Org. Chem.* **2017**, *82*, 3084.
- [44] Orsi, D. L.; Easley, B. J.; Lick, A. M.; Altman, R. A. *Org. Lett.* **2017**, *19*, 1570.
- [45] Tamai, T.; Ogawa, A. *J. Org. Chem.* **2014**, *79*, 5028.
- [46] Tamai, T.; Fujiwara, K.; Higashimae, S.; Nomoto, A.; Ogawa, A. *Org. Lett.* **2016**, *18*, 2114.
- [47] Yang, X.-H.; Davison, R. T.; Nie, S.-Z.; Cruz, F. A.; McGinnis, T. M.; Dong, V. M. *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 3006.
- [48] Yang, X.-H.; Davison, R. T.; Dong, V. M. *J. Am. Chem. Soc.* **2018**, *140*, 10443.
- [49] Zhang, Y. X.; Wong, Z. R.; Wu, X. X.; Lauw, S. J. L.; Huang, X.; Webster, R. D.; Chi, Y. G. R. *Chem. Commun.* **2016**, *53*, 184.
- [50] Wang, L. L.; Yue, H. L.; Yang, D. S.; Cui, H. H.; Zhu, M. H.; Wang, J. M.; Wei, W.; Wang, H. J. *Org. Chem.* **2017**, *82*, 6857.
- [51] Liang, X.; Xiong, M. T.; Zhu, H. P.; Shen, K. X.; Pan, Y. J. *J. Org. Chem.* **2019**, *84*, 11210.
- [52] Wang, Y. J.; Jiang, W.; Huo, C. D. *J. Org. Chem.* **2017**, *82*, 10628.
- [53] Singh, A. K.; Chawla, R.; Keshari, T.; Yadav, V. K.; Yadav, L. D. S. *Org. Biomol. Chem.* **2014**, *12*, 8550.
- [54] Yang, L.; Wen, Q.; Xiao, F. H.; Deng, G.-J. *Org. Biomol. Chem.* **2014**, *12*, 9519.
- [55] Tu, H.-Y.; Hu, B.-L.; Deng, C.-L.; Zhang, X.-G. *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 15558.
- [56] Liu, Y. R.; Hu, B. L.; Zhang, X. G. *Chin. J. Chem.* **2017**, *35*, 307.
- [57] Sun, K.; Lv, Y. H.; Shi, Z. D.; Mu, S. Q.; Li, C. H.; Wang, X. *Org. Biomol. Chem.* **2017**, *15*, 5258.
- [58] Liu, C.; Fang, Y.; Wang, S.-Y.; Ji, S.-J. *ACS Catal.* **2019**, *9*, 8910.
- [59] Lin, C.; Li, D. Y.; Wang, B. J.; Yao, J. Z.; Zhang, Y. H. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 1328.
- [60] Liu, S.-L.; Li, X.-H.; Shi, T.-H.; Yang, G.-C.; Wang, H.-L.; Gong, J.-F.; Song, M.-P. *Eur. J. Org. Chem.* **2017**, 2280.
- [61] Shang, Z. H.; Chen, Q. Y.; Xing, L. L.; Zhang, Y. L.; Wait, L.; Du, Y. F. *Adv. Synth. Catal.* **2019**, *361*, 4926.
- [62] Liu, C.; Fang, Y.; Wang, S.-Y.; Ji, S.-J. *Org. Lett.* **2018**, *20*, 6112.
- [63] Tan, Y.-H.; Li, J.-X.; Hong, W.-K.; Wang, Z.-Y. *Chin. J. Org. Chem.* **2011**, *31*, 616 (in Chinese). (谭越河, 李建设, 洪文坤, 汪朝阳, 有机化学, **2011**, *31*, 616.)
- [64] Mao, C.-X.; Wang, Z.-Y.; Tan, Y.-H.; Xue, F.-L. *Chin. J. Org. Chem.* **2011**, *31*, 1377 (in Chinese). (毛超旭, 汪朝阳, 谭越河, 薛福玲, 有机化学, **2011**, *31*, 1377.)
- [65] Liu, J.; Chen, W.; Wang, L. *RSC Adv.* **2013**, *3*, 4723.
- [66] Cao, L.; Luo, S.-H.; Jiang, K.; Hao, Z.-F.; Wang, B.-W.; Pang, C.-M.; Wang, Z.-Y. *Org. Lett.* **2018**, *20*, 4754.
- [67] Li, J.; Rao, W. D.; Wang, S.-Y.; Ji, S.-J. *J. Org. Chem.* **2019**, *84*, 11542.
- [68] Reddy, R. J.; Kumar, J. J.; Kumari, A. H. *Eur. J. Org. Chem.* **2019**, 3771.
- [69] Kong, W. G.; Yu, C. J.; An, H. J.; Song, Q. L. *Org. Lett.* **2018**, *20*, 4975.
- [70] Shyam, P. K.; Son, S.; Jang, H.-Y. *Eur. J. Org. Chem.* **2017**, 5025.
- [71] Son, S.; Shyam, P. K.; Park, H.; Jeong, I.; Jang, H.-Y. *Eur. J. Org. Chem.* **2018**, 3365.
- [72] Reddy, R. J.; Kumari, A. H.; Kumar, J. J.; Nanubolu, J. B. *Adv. Synth. Catal.* **2019**, *361*, 1587.
- [73] Shukla, G.; Srivastava, A.; Nagaraju, A.; Raghuvanshi, K.; Singh, M. S. *Adv. Synth. Catal.* **2015**, *357*, 3969.
- [74] Wang, B.-W.; Liu, Y.; Hao, Z.-F.; Hou, J.-Q.; Li, J.-Y.; Li, S.-T.; Pan, S.-H.; Zeng, M.-H.; Wang, Z.-Y. *Chin. J. Org. Chem.* **2018**, *38*, 1872 (in Chinese). (王柏文, 刘园, 郝志峰, 侯佳琦, 李健怡, 李舒婷, 潘思慧, 曾铭豪, 汪朝阳, 有机化学, **2018**, *38*, 1872.)
- [75] Yang, K.; Gao, J.-J.; Luo, S.-H.; Wu, H.-Q.; Pang, C.-M.; Wang, B.-W.; Chen, X.-Y.; Wang, Z.-Y. *RSC Adv.* **2019**, *9*, 19917.
- [76] Wu, H.-Q.; Yang, K.; Chen, X.-Y.; Arulkumar, M.; Wang, N.; Chen, S.-H.; Wang, Z.-Y. *Green Chem.* **2019**, *21*, 3782.
- [77] Cao, L.; Luo, S.-H.; Wu, H.-Q.; Chen, L.-Q.; Jiang, K.; Hao, Z.-F.; Wang, Z.-Y. *Adv. Synth. Catal.* **2017**, *359*, 2961.
- [78] Gao, X. F.; Pan, X. J.; Gao, J.; Jiang, H. F.; Yuan, G. Q.; Li, Y. W. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 1038.
- [79] Hua, J. W.; Xu, J. Q.; Xu, J.; Zhou, B. C.; Zhang, D.; Yang, Z.; Fang, Z.; Guo, K. *Eur. J. Org. Chem.* **2019**, 4056.
- [80] He, R. F.; Chen, X. W.; Li, Y. B.; Liu, Q.; Liao, C. S.; Chen, L.; Huang, Y. B. *J. Org. Chem.* **2019**, *84*, 8750.
- [81] Ebule, R.; Hammond, G. B.; Xu, B. *Eur. J. Org. Chem.* **2018**, 4705.
- [82] Lan, L. Y.; Gao, Y.; Ding, R.; Zhang, T.; Liu, Y. G.; Sun, B. G.; Tian, H. Y. *Synth. Commun.* **2019**, *49*, 539.
- [83] Gao, X. F.; Pan, X. J.; Gao, J.; Huang, H. W.; Yuan, G. Q.; Li, Y. W. *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 210.
- [84] Jiang, Y. J.; Loh, T.-P. *Chem. Sci.* **2014**, *5*, 4939.
- [85] Shao, A. L.; Gao, M.; Chen, S. T.; Wang, T.; Lei, A. W. *Chem. Sci.* **2017**, *8*, 2175.

- [86] Huang, J. J.; Hu, G.; An, S. Y.; Chen, D. D.; Li, M. L.; Li, P. F. *J. Org. Chem.* **2019**, *84*, 9758.
- [87] Yan, J. J.; Pulis, A. P.; Perry, G. J. P.; Procter, D. I. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2019**, *58*, 15675.
- [88] Haut, F.-L.; Habiger, C.; Speck, K.; Wurst, K.; Mayer, P.; Korber, J. N.; Muller, T.; Magauer, T. *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 13352.
- [89] Xu, X. M.; Li, J. Z.; Wang, Z. L. *Chin. J. Org. Chem.* **2020**, *40*, 886 (in Chinese).
(徐鑫明, 李家柱, 王祖利, 有机化学, **2020**, *40*, 886.)
- [90] Deng, L. L.; Liu, Y. Y. *ACS Omega* **2018**, *3*, 11890.
- [91] Wang, F.-X.; Tian, S.-K. *J. Org. Chem.* **2015**, *80*, 12697.
- [92] Yang, F.-L.; Wang, F.-X.; Wang, T.-T.; Wang, Y.-J.; Tian, S.-K. *Chem. Commun.* **2014**, *50*, 2111.
- [93] Yang, F.-L.; Gui, Y.; Yu, B.-K.; Jin, Y.-X.; Tian, S.-K. *Adv. Synth. Catal.* **2016**, *358*, 3368.
- [94] Singh, R.; Allam, B. K.; Singh, N.; Kumari, K.; Singh, S. K.; Singh, K. N. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 2656.
- [95] Aegurla, B.; Peddinti, R. K. *Asian J. Org. Chem.* **2018**, *7*, 946.
- [96] Liu, C. R.; Ding, L. H.; Guo, G.; Liu, W. W. *Eur. J. Org. Chem.* **2016**, 910.
- [97] Wei, W.; Liu, C. L.; Yang, D. S.; Wen, J. W.; You, J. M.; Suo, Y. R.; Wang, H. *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 10239.
- [98] Wan, X.; Sun, K.; Zhang, G. S. *Sci. China: Chem.* **2017**, *60*, 353.
- [99] Tang, Y. C.; Fan, Y. Y.; Gao, H. J.; Li, X. Q.; Xu, X. S. *Tetrahedron Lett.* **2015**, *56*, 5616.
- [100] Tang, Y. C.; Zhang, Y.; Wang, K. F.; Li, X. Q.; Xu, X. S.; Du, X. H. *Org. Biomol. Chem.* **2015**, *13*, 7084.
- [101] Chen, W. T.; Liu, X. Y.; Chen, E.; Chen, B. H.; Shao, J. A.; Yu, Y. P. *Org. Chem. Front.* **2017**, *4*, 1162.
- [102] Terent'ev, A. O.; Mulina, O. M.; Pirogach, D. A.; Demchuk, D. V.; Syroeshkin, M. A.; Nikishin, G. I. *RSC Adv.* **2016**, *6*, 93476.
- [103] Choudhuri, K.; Achar, T. K.; Mal, P. *Adv. Synth. Catal.* **2017**, *359*, 3566.
- [104] Sun, K.; Lv, Y. H.; Zhu, Z. H.; Jiang, Y. Q.; Qi, J. J.; Wu, H. K.; Zhang, Z. G.; Zhang, G. S.; Wang, X. *RSC Adv.* **2015**, *5*, 50701.
- [105] Xu, R.; Li, Z. P. *Tetrahedron Lett.* **2018**, *59*, 3942.
- [106] Wang, B.; Tang, L.; Liu, L. Y.; Li, Y. N.; Yang, Y.; Wang, Z. Y. *Green Chem.* **2017**, *19*, 5794.
- [107] Wang, D. Y.; Zhang, R. X.; Lin, S.; Yan, Z. H.; Guo, S. M. *Synlett* **2016**, *27*, 2003.
- [108] Ni, J. X.; Jiang, Y.; An, Z. Y.; Lan, J. F.; Yan, R. L. *Chem. Commun.* **2019**, *55*, 7343.
- [109] Jiang, L. Q.; Ding, T. Q.; Yi, W.-B.; Zeng, X.; Zhang, W. *Org. Lett.* **2018**, *20*, 2236.
- [110] Wei, J. J.; Liang, S. S.; Jiang, L. Q.; Mumtaz, Y.; Yi, W.-B. *J. Org. Chem.* **2020**, *85*, 977.
- [111] Xia, Y. Y.; Chen, X. L.; Qu, L. B.; Sun, K.; Xia, X. Y.; Fu, W. K.; Chen, X.; Yang, Y. K.; Zhao, Y. F.; Li, C. J. *Asian J. Org. Chem.* **2016**, *5*, 878.
- [112] Lai, M.; Wu, Z. Y.; Li, S.-J.; Wei, D. H.; Zhao, M. Q. *J. Org. Chem.* **2019**, *84*, 11135.
- [113] Zhu, R.; Buchwald, S. L. *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, *137*, 8069.
- [114] Shi, J.; Tang, X.-D.; Wu, Y.-C.; Li, H.-N.; Song, L.-J.; Wang, Z.-Y. *Eur. J. Org. Chem.* **2015**, 1193.
- [115] Lin, Y.-M.; Lu, G.-P.; Wang, G.-X.; Yi, W.-B. *J. Org. Chem.* **2017**, *82*, 382.
- [116] Wang, D. Y.; Zhang, R. X.; Ning, W.; Yan, Z. H.; Lin, S. *Org. Biomol. Chem.* **2016**, *14*, 5136.
- [117] Wang, B.-W.; Jiang, K.; Li, J.-X.; Luo, S.-H.; Wang, Z.-Y.; Jiang, H.-F. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2020**, *59*, 2338.
- [118] Shi, J.; Tang, X.-D. L.; Wu, Y.-C.; Fang, J.-F.; Cao, L.; Chen, X.-Y.; Wang, Z.-Y. *RSC Adv.* **2016**, *6*, 25651.
- [119] Zhang, N.; Yang, D. S.; Wei, W.; Yuan, L.; Cao, Y. J.; Wang, H. *RSC Adv.* **2015**, *5*, 37013.
- [120] Hua, L.-N.; Li, H.; Qing, F.-L.; Huang, Y. G.; Xu, X.-H. *Org. Biomol. Chem.* **2016**, *14*, 8443.
- [121] Wu, H.-Q.; Luo, S.-H.; Cao, L.; Shi, H.-N.; Wang, B.-W.; Wang, Z.-Y. *Asian J. Org. Chem.* **2018**, *7*, 2479.
- [122] Wu, H.-Q.; Yang, K.; Luo, S.-H.; Wu, X.-Y.; Wang, N.; Chen, S.-H.; Wang, Z.-Y. *Eur. J. Org. Chem.* **2019**, *28*, 4572.
- [123] Wu, Y.-C.; Luo, S.-H.; Mei, W.-J.; Cao, L.; Wu, H.-Q.; Wang, Z.-Y. *Eur. J. Med. Chem.* **2017**, *139*, 84.
- [124] Wu, Y.-C.; Cao, L.; Mei, W.-J.; Wu, H.-Q.; Luo, S.-H.; Zhan, H.-Y.; Wang, Z.-Y. *Chem. Biol. Drug Des.* **2018**, *92*, 1232.
- [125] Luo, S.-H.; Yang, K.; Lin, J.-Y.; Gao, J.-J.; Wu, X.-Y.; Wang, Z.-Y. *Org. Biomol. Chem.* **2019**, *17*, 5138.
- [126] Cao, L.; Li, J.-X.; Wu, H.-Q.; Jiang, K.; Hao, Z.-F.; Luo, S.-H.; Wang, Z.-Y. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2018**, *6*, 4147.
- [127] Ke, M. L.; Huang, G. X.; Ding, L.; Fang, J. J.; Chen, F.-E. *ChemCatChem* **2019**, *11*, 4720.
- [128] Wang, L.-J.; Chen, M. M.; Qi, L.; Xu, Z. D.; Li, W. *Chem. Commun.* **2017**, *53*, 2056.
- [129] Kariya, A.; Yamaguchi, T.; Nobuta, T.; Tada, N.; Miura, T.; Itoh, A. *RSC Adv.* **2014**, *4*, 13191.
- [130] Chawla, R.; Singh, A. K.; Yadav, L. D. S. *Eur. J. Org. Chem.* **2014**, 2032.
- [131] Zeng, K.; Chen, L.; Chen, Y.; Liu, Y. P.; Zhou, Y. B.; Au, C.-T.; Yin, S.-F. *Adv. Synth. Catal.* **2017**, *359*, 841.
- [132] Xiong, Y.; Sun, Y. W.; Zhang, G. Z. *Org. Lett.* **2018**, *20*, 6250.
- [133] Kramer, P.; Halacziewicz, M.; Sun, Y.; Kelm, H.; Manolikakes, G. *J. Org. Chem.* **2020**, *85*, 3617.
- [134] Gao, W.-C.; Cheng, Y.-F.; Shang, Y.-Z.; Chang, H.-H.; Li, X.; Zhou, R.; Qiao, Y.; Wei, W.-L. *J. Org. Chem.* **2018**, *83*, 11956.
- [135] Shen, T.; Yuan, Y. Z.; Song, S.; Jiao, N. *Chem. Commun.* **2014**, *50*, 4115.
- [136] Wei, W.; Wen, J. W.; Yang, D. S.; Du, J.; You, J. M.; Wang, H. *Green Chem.* **2014**, *16*, 2988.
- [137] Chu, X.-Q.; Meng, H.; Xu, X.-P.; Ji, S.-J. *Chem.-Eur. J.* **2015**, *21*, 11359.
- [138] Wei, W.; Wen, J. W.; Yang, D. S.; Wu, M.; You, J. M.; Wang, H. *Org. Biomol. Chem.* **2014**, *12*, 7678.
- [139] Lu, Q. Q.; Zhang, J.; Wei, F. L.; Qi, Y.; Wang, H. M.; Liu, Z. L.; Lei, A. W. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2013**, *52*, 7156.
- [140] Yuan, Z. L.; Wang, H.-Y.; Mu, X.; Chen, P. H.; Guo, Y.-L.; Liu, G. S. *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, *137*, 2468.
- [141] Liu, X.; An, R.; Zhang, X. L.; Luo, J.; Zhao, X. D. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2016**, *55*, 5846.
- [142] Luo, J.; Liu, Y. N.; Zhao, X. D. *Org. Lett.* **2017**, *19*, 3434.
- [143] Zhang, J. J.; Yang, J.-D.; Zheng, H.-L.; Xue, X.-S.; Mayr, H.; Cheng, J.-P. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2018**, *57*, 12690.
- [144] Luo, J.; Cao, Q. X.; Cao, X. H.; Zhao, X. D. *Nat. Commun.* **2018**, *9*, 527.
- [145] Liu, X.; Lang, Y. Y.; Ji, J. Y.; Luo, J.; Zhao, X. J. *Am. Chem. Soc.* **2018**, *140*, 4782.
- [146] Zhang, P. P.; Li, M.; Xue, X.-S.; Xu, C.-F.; Zhao, Q. C.; Liu, Y. F.; Wang, H. Y.; Guo, Y. L.; Lu, L.; Shen, Q. L. *J. Org. Chem.* **2016**, *81*, 7486.
- [147] Yoo, J.; Ha, H.-J.; Kim, B.; Cho, C.-W. *J. Org. Chem.* **2020**, *85*, 7077.
- [148] Tian, H.; Yu, J. P.; Yang, H. J.; Zhu, C. J.; Fu, H. *Adv. Synth. Catal.* **2016**, *358*, 1794.
- [149] Xiao, Q.; He, Q. J.; Li, J. C.; Wang, J. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 6090.
- [150] Jia, Y. M.; Qin, H. M.; Wang, N.; Jiang, Z.-X.; Yang, Z. G. *J. Org. Chem.* **2018**, *83*, 2808.
- [151] Sicignano, M.; Rodriguez, R. I.; Capaccio, V.; Borello, F.; Cano, R.; De Riccardis, F.; Bernardi, L.; Diaz-Tendero, S.; Della Sala, G.; Aleman, J. *Org. Biomol. Chem.* **2020**, *18*, 2914.
- [152] Jin, M. Y.; Li, J. C.; Huang, R. K.; Zhou, Y. X.; Chung, L. W.; Wang, J. *Chem. Commun.* **2018**, *54*, 4581.
- [153] Liang, Y. Y.; Zhao, X. D. *ACS Catal.* **2019**, *9*, 6896.
- [154] Xu, C. F.; Shen, Q. L. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 4561.
- [155] Yang, T.; Lu, L.; Shen, Q. L. *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 5479.
- [156] Luo, J.; Zhu, Z. C.; Liu, Y. N.; Zhao, X. D. *Org. Lett.* **2015**, *17*, 3620.
- [157] Zhu, Z. C.; Luo, J.; Zhao, X. D. *Org. Lett.* **2017**, *19*, 4940.
- [158] Song, T.; Zhao, X. M.; Wang, X. L. *J. Org. Chem.* **2019**, *84*, 15648.

- [159] Nguyen, T. B. *Adv. Synth. Catal.* **2020**, 362, 3448.
- [160] Yin, F.; Wang, X.-S. *Org. Lett.* **2014**, 16, 1128.
- [161] Cheng, Z.-F.; Tao, T.-T.; Feng, Y.-S.; Tang, W.-K.; Xu, J.; Dai, J.-J.; Xu, H.-J. *J. Org. Chem.* **2018**, 83, 499.
- [162] Meng, Y. Y.; Wang, M.; Jiang, X. F. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2020**, 59, 1346.
- [163] Cui, H. H.; Wei, W.; Yang, D. S.; Zhang, Y. L.; Zhao, H. J.; Wang, L. L.; Wang, H. *Green Chem.* **2017**, 19, 3520.
- [164] Wang, J. L.; Huang, B. B.; Yang, C.; Xia, W. J. *Chem. Commun.* **2019**, 55, 11103.
- [165] Wu, J.; Zhang, Y. L.; Gong, X. C.; Meng, Y. G.; Zhu, C. Y. *Org. Biomol. Chem.* **2019**, 17, 3507.
- [166] Gallhof, M.; Kell, L.; Brasholz, M. *Chem.-Eur. J.* **2020**, 26, 1772.
- [167] Wang, Y.; Deng, L. L.; Mei, H. B.; Du, B. N.; Han, J. L.; Pan, Y. *Green Chem.* **2018**, 20, 3444.
- [168] Li, D. D.; Li, S. B.; Peng, C.; Lu, L. J.; Wang, S. C.; Wang, P.; Chen, Y.-H.; Cong, H. J.; Lei, A. W. *Chem. Sci.* **2019**, 10, 2791.
- [169] Luo, M.-J.; Liu, B.; Li, Y.; Hu, M.; Li, J.-H. *Adv. Synth. Catal.* **2019**, 361, 1538.
- [170] Zhu, H.-D.; Hao, W.-J.; Zhu, C.-F.; Guo, C.; Tu, S.-J.; Jiang, B. *Org. Lett.* **2020**, 22, 4471.
- [171] Tang, N. N.; Shao, X.; Wang, M. Y.; Wu, X. X.; Zhu, C. *Acta Chim. Sinica* **2019**, 77, 922 (in Chinese).
(汤娜娜, 邵鑫, 王明扬, 吴新鑫, 朱晨, 化学学报, **2019**, 77, 922.)
- [172] Yang, J. H.; Fu, X. B.; Lu, Z. H.; Zhu, G. G. *Acta Chim. Sinica* **2019**, 77, 901 (in Chinese).
(杨俊航, 傅晓波, 卢增辉, 朱钢国, 化学学报, **2019**, 77, 901.)

(Cheng, F.)