

## 通过自由基历程烯烃1,2-双官能团化反应同时构建C—O键和C—X键研究进展

吴丹青, 刘佳俊, 李天宇, 徐大振\*, 苗志伟\*

南开大学化学学院, 元素有机化学国家重点实验室, 天津 300071

**摘要:** 通过自由基途径的烯烃1,2-双官能团化反应是有机合成中从烯烃直接构建C—X (X = C, N, O...)键的重要手段, 其优点包括良好的区域选择性、步骤经济性和原子经济性, 符合绿色化学的发展要求。含有碳-氧键的有机功能化合物种类很多, 发展简单高效构建碳-氧键的合成方法是有机化学家广泛关注的研究领域。本文综述了在构建碳-氧键的同时, 构建碳-碳键、碳-氮键、碳-硫键和碳-卤键的反应研究进程, 并对该领域的未来发展方向进行了展望。

**关键词:** 烯烃; 1,2-双官能团化; 碳-氧键构建; 区域选择性; 研究进展; 自由基历程

**中图分类号:** G64; O6

## Research Progress on the Simultaneous Construction of C—O and C—X Bonds via 1,2-Difunctionalization of Olefins through Radical Pathways

Danqing Wu, Jiajun Liu, Tianyu Li, Dazhen Xu\*, Zhiwei Miao\*

State Key Laboratory of Elemento-Organic Chemistry, College of Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China.

**Abstract:** The 1,2-difunctionalization of olefins via radical pathways is a crucial method in organic synthesis for the direct formation of C—X (X = C, N, O, etc.) bonds from olefins. This approach offers several advantages, including high regioselectivity, step economy, and atom economy, making it compatible with the principles of green chemistry. The development of simple and efficient methods for constructing carbon-oxygen bonds is a significant area of interest in organic chemistry due to the prevalence of organic functional compounds containing these bonds. This review summarizes the recent progress in constructing carbon-oxygen bonds concurrently with carbon-carbon, carbon-nitrogen, carbon-sulfur, and carbon-halogen bonds. Additionally, the article discusses the future directions for research in this field.

**Key Words:** Alkenes; 1,2-Difunctionalization; C—O bond construction; Regioselectivity; Research progress; Radical pathways

烯烃作为最常见的大宗化学品已经在工业生产中得到广泛应用, 如何通过直接和绿色的合成方法对烯烃碳-碳双键进行转化, 合成各种具有不同功能的复杂有机分子成为当今化学家的研究热点<sup>[1-3]</sup>。有机化学家们主要着眼于使用环保的廉价金属或通过电化学、光化学方法以自由基机理进行高效、高区域选择性、高原子经济性的烯烃官能团化反应<sup>[4,5]</sup>。通过烯烃的双官能团化反应直接构建C—X (X = C, N, O...)键已经成为形成C—X键最常见的方式, 而通过烯烃的1,2-双官能团化反应同时

收稿: 2024-03-23; 录用: 2024-05-21; 网络发表: 2024-05-29

\*通讯作者, Emails: miaozhiwei@nankai.edu.cn (苗志伟); xudazhen@nankai.edu.cn (徐大振)

基金资助: 国家自然科学基金面上项目(22071113); 福建省南平市科技项目(N2020Z008)

构建C—O和C—X键仍然是挑战性的问题<sup>[6-8]</sup>。

自由基途径的烯炔1,2-双官能团化反应主要使用不同类型的过渡金属催化体系和有机氧化剂促进反应的发生,所用的烯炔底物多为活化烯炔(如与芳基相连的烯炔等),催化体系所用的贵金属包括钯、铑、钌等<sup>[9-11]</sup>,仅有一些个例能够成功地在手性配体控制下完成烯炔1,2-双官能团化反应的不对称转化<sup>[12]</sup>,但是以廉价金属(如铁、钴、镍等)催化,或采用电解法和光催化法,以自由基历程进行烯炔1,2-双官能团化反应仍然鲜有报道。本文综述了近年来烯炔以自由基途径发生1,2-双官能团化反应同时构建C—O和C—X键的研究进展,并对该研究领域未来发展方向进行了展望。

## 1 通过自由基历程的烯炔1,2-双官能团化反应同时构建C—O键和C—C键

2013年,雷爱文等<sup>[13]</sup>报道了一种以苯酚衍生物作为酯基源与活化烯炔发生自由基氧化偶联反应合成苯并二氢呋喃衍生物的反应(图1)。该方法能够一步同时构建碳-碳键和碳-氧键,为酚类化合物参与烯炔双官能团化反应提供了一种高原子经济性、环境友好的方法,以酚羟基作为氧源通过一步反应实现2,3-二氢苯并呋喃的高效合成。该反应使用FeCl<sub>3</sub>作为催化剂,不需要添加配体而用2,3-二氯-5,6-二氰基苯醌(DDQ)作为氧化剂,可以得到38%–97%的产率。

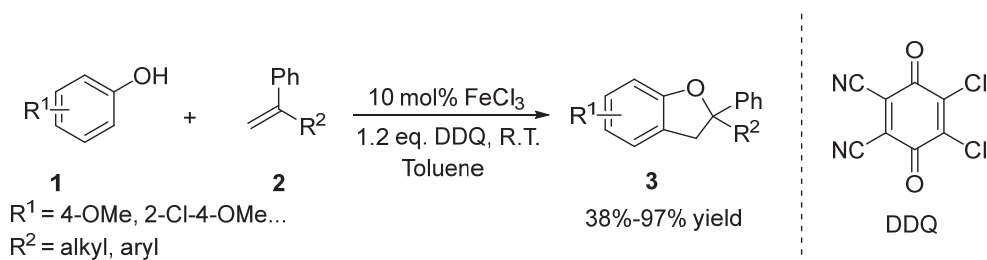


图1 雷爱文等报道Fe催化下自由基机理的烯炔双官能团化反应

作者提出了可能的反应机理(图2)。首先,DDQ氧化苯酚底物A1生成HDDQ自由基和苯酚自由基A2。氧自由基靠近铁原子,发生单电子转移(SET, Single Electron Transfer)过程,A2氧自由基转化为A3亚甲基自由基,而氯化铁同时作为一种Lewis酸可以促进自由基转移,进而导致亚甲基自由基A3与烯炔A6发生加成反应生成中间体A4。最后HDDQ自由基从A4中捕获一个氢自由基使A4转化为产物苯并二氢呋喃A5。

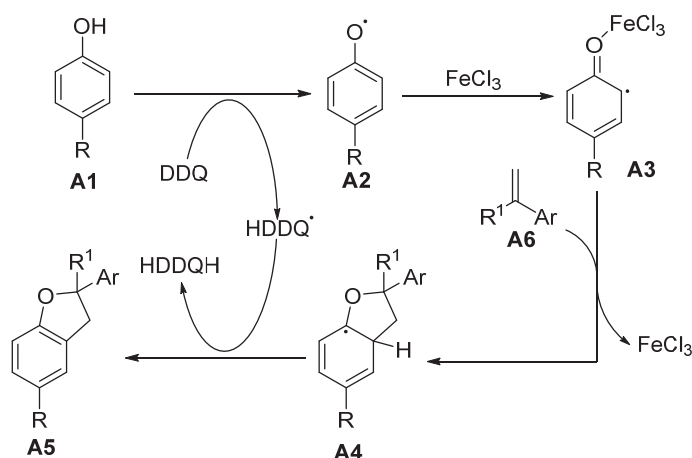


图2 Fe催化下活化烯炔与酚类发生自由基环化实现双官能团化机理

2018年, 李金恒等<sup>[14]</sup>报道了在氩气氛围下活化烯烃与苄位C(sp<sup>3</sup>)-H和过氧化物的三组分烯烃双官能团化反应(图3)。作者仅以CuI作为催化剂实现了碳-碳键和碳-氧键的同时构建, 产率范围是40%–86%。该方法将烯烃的双官能团化和活化C(sp<sup>3</sup>)-H的反应联系起来, 提供了制备多芳环化合物的直接合成方法。反应具有良好的底物耐受性, 对芳香过氧酸、烷基过氧酸均可取得较高收率, 通过取代基R<sup>4</sup>的改变可以实现第三个芳香环的引入, 并实现季碳中心的构建。

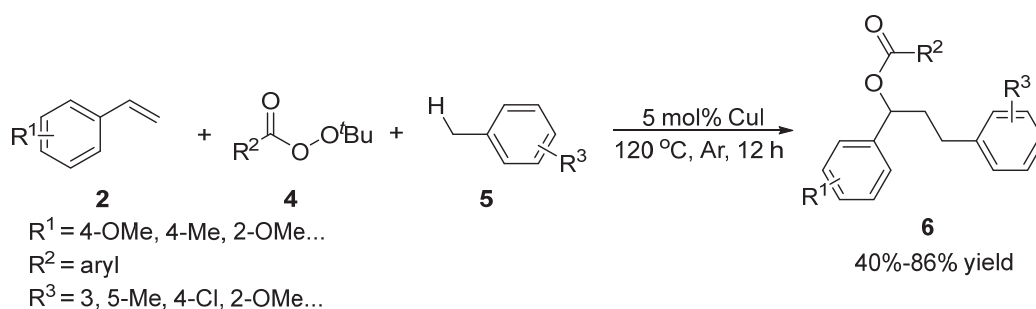


图3 李金恒等报道Cu催化自由基历程的烯烃1,2-双官能团化反应

作者对反应的历程进行了研究, 提出了可能的反应机理(图4)。首先, 叔丁基过氧化苯甲酸酯(B1)或过氧化二叔丁基(B1', DTBP)在加热条件下生成叔丁基氧自由基B2并生成苯甲酸, 自由基B2在Cu(I)存在下通过单电子转移过程与底物B3反应得到苄自由基B4。苄自由基B4加成到活化烯烃B5的双键上, 形成自由基中间体B6, 然后在Cu(II)的存在下发生氧化反应转化为阳离子中间体B7。最后, 阳离子中间体B7直接与第一步生成的苯甲酸反应生成目标产物B8。

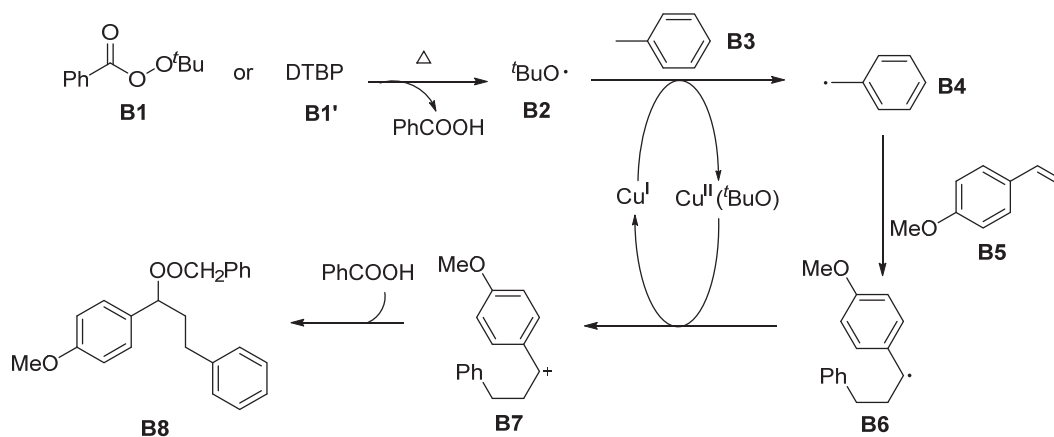


图4 Cu催化芳基烯烃与芳基烃和过酸酯反应实现烯烃1,2-双官能团化反应机理

2019年, Mandal等<sup>[15]</sup>报道了一种三组分反应, 在非那烯类分子(PLY, Phenalenyl Ligand)催化下活化烯烃实现1,2-双官能团化(图5)。该反应在室温下即可进行, 不需要加入金属或光催化剂, 同样可以作为构建多芳环化合物的合成方法, 反应的收率为23%–84%。通过实验和密度泛函理论(DFT, Density Functional Theory)计算证明PLY可以发生单电子转移引发反应并参与循环。相比于过渡金属和光催化体系, 该方法操作简便、工业应用价值高, 为后续研究烯烃的双官能团化反应提供了新的思路。

作者提出了可能的反应机理(图6), 首先底物7在PLY负离子的还原作用下脱除重氮基生成芳基自由基, 该自由基与烯烃底物C1结合生成自由基C2, 该自由基可以被PLY氧化为碳正离子C6, 也可以

与亲核试剂结合生成自由基C3，再被PLY氧化生成碳正离子C4，C4再脱去一个质子即可转化为产物C5。由于亲核试剂相比于PLY可以优先与自由基C2结合，且产生的C3自由基也更稳定，故C3转化为C4的反应过程比C2转化为C6的过程更有利，作者通过DFT计算证明了该机理的正确性。

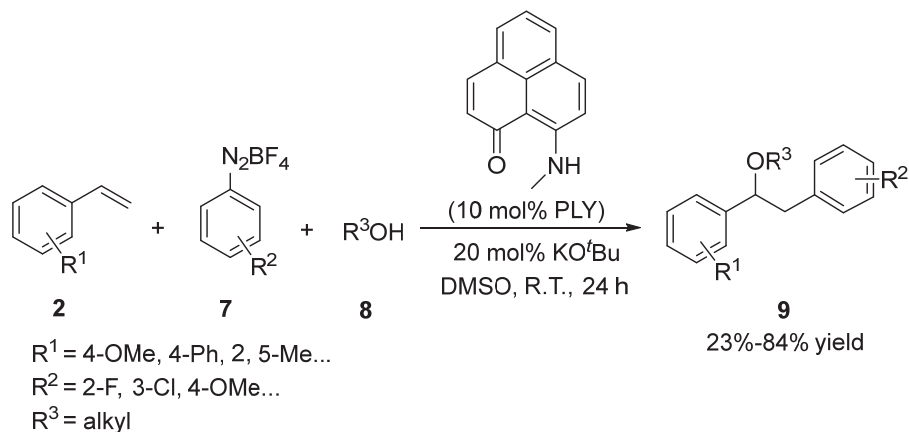


图5 Mandal等报道PLY配体氧化下自由基机理的烯烃1,2-双官能团化反应

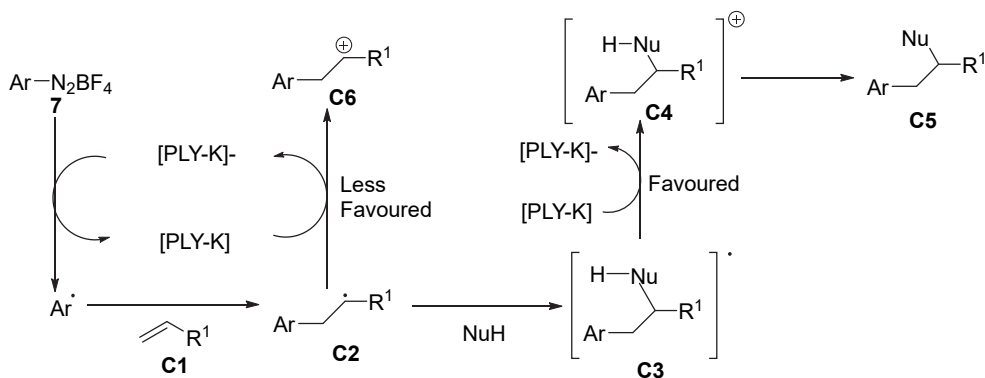


图6 PLY配体氧化下烯烃1,2-双官能团化反应机理

2020年，李素华等<sup>[16]</sup>报道了一种二价钴催化，以溴代三氟甲烷作为CF<sub>3</sub>源，以空气中的氧气作为氧源，简单烯烃发生1,2-双官能团化的反应(图7)。该反应底物范围广，活化烯烃和非活化烯烃均可取得不错的收率，反应条件温和，当取代基为三元环时不会发生开环反应，而是选择性的与烯烃发生反应，反应条件筛选和底物扩展可以得到40%–94%的收率。该反应为在复杂有机分子中引入三氟甲基提供了简便、直接的方法，该方法在药物研发后期修饰阶段具有良好的应用前景。

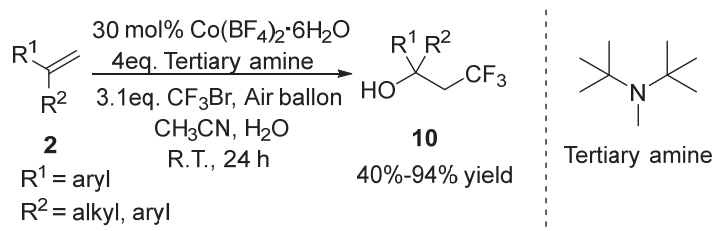


图7 李素华等报道Co催化下经自由基历程烯烃发生1,2-双官能团化引入羟基和三氟甲基

作者对反应的机理进行了研究(图8), 首先 $\text{CF}_3\text{Br}$ 接受钴-叔胺络合物**Int 1**提供的一个电子, 生成三氟甲基自由基和钴-叔胺络合物自由基阳离子**Int 2**, 而**Int 2**可以通过还原体系中的叔胺**Int 3**再生为**Int 1**, 实现**Int 1**的再生。三氟甲基自由基则和烯烃底物**D1**结合生成活性更高的**D2**碳自由基, 该自由基与空气中的氧气结合生成过氧化物自由基**D3**, **D3**从体系中攫取一个氢原子后得到更稳定的过氧化物**D4**, 最后在**Int 1**提供的电子的帮助下**D4**中的过氧键发生断裂生成产物**D5**。作者对反应中起到关键作用的钴-胺络合物**Int 1**进行了研究, 提出并证明了该反应的单电子转移过程的效率取决于Co原子中心与N原子的距离, 增大胺类化合物的位阻会抑制反应的发生, 故可以通过设计减小胺类化合物的位阻, 加快反应速率。

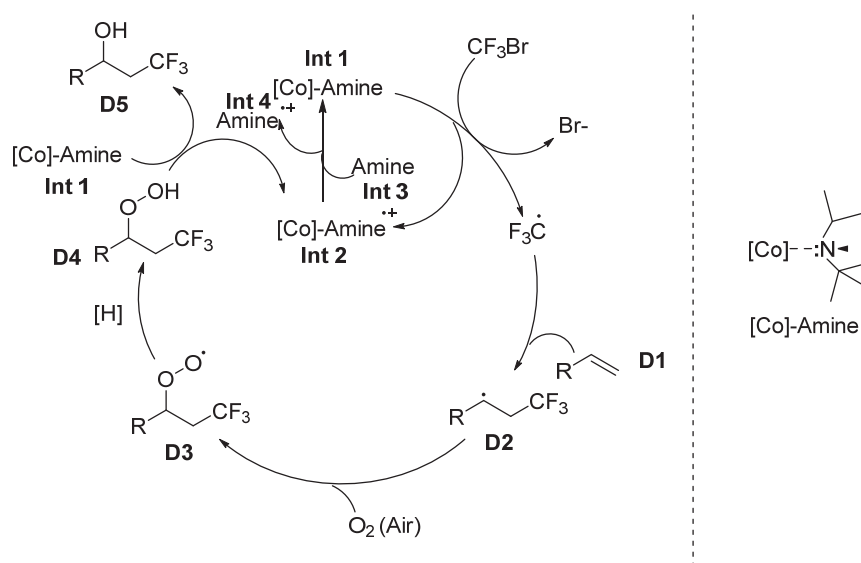


图8 Co催化下烯烃发生1,2-双官能团化引入羟基和三氟甲基的机理

2021年, 金灿等<sup>[17]</sup>报道了可见光/叔胺催化、空气氧化的非活化烯烃羟基和二氟乙酰胺化反应(图9)。作者以罗丹明6G (Rhodamine 6G)作为光催化剂, 在光照条件下完成光介导的串联自由基反应, 克服了非活化烯烃双官能团化反应活性较低的难点, 且这种转化可以和大多数非活化烯烃相容, 对不同官能团取代的溴代二氟乙酰胺也有良好的耐受性, 该反应高效地实现了烯烃的区域选择性羟基化和二氟乙酰胺化, 并可以得到44%–83%的产率。

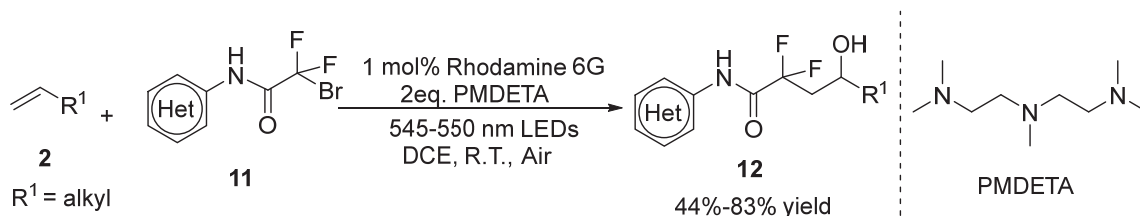


图9 金灿等报道可见光催化下实现自由基历程的烯烃1,2-双官能团化反应

作者提出了该反应可能的反应机理(图10), 以烯丙基苯**E1**为例, 首先在可见光照射下, 光催化剂**Rhodamine 6G (PC)**被激发为激发态**PC\***, 通过五甲基二乙基三胺(PMDETA)还原, 得到**PMDETA<sup>+</sup>**, 同时**PC\***被还原为**PC<sup>-</sup>**。反应底物**E2**可以从还原态光催化剂中得到一个电子, 生成二氟乙酰胺自由基和溴阴离子, 同时**PC<sup>-</sup>**失电子回到基态。随后二氟乙酰胺自由基与烯丙基苯**E1**反应,

得到亚甲基自由基**E7**，该自由基可进一步被氧气捕获并转化为过氧自由基**E6**。**E6**和**E7**之间的自由基偶联反应生成了不稳定的过氧化物**E5**，发生氧-氧键的均裂，生成氧自由基**E4**。自由基**E4**从**PMDETA**<sup>+</sup>中攫取一个氢原子后，最终生成产物**E3**。

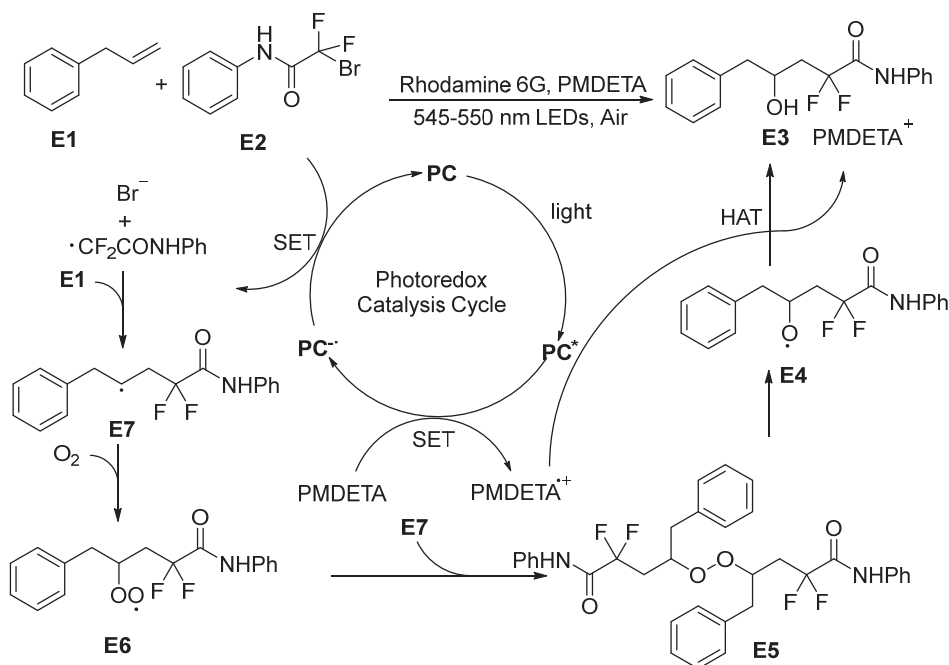


图10 可见光催化下实现烯烃1,2-双官能团化的反应机理

## 2 通过自由基历程的烯烃1,2-双官能团化反应同时构建C—O键和C—N键

2008年, Chemler等<sup>[18]</sup>报道了一种2,2,6,6-四甲基哌啶氧化物(TEMPO)参与的高对映选择性烯烃1,2-双官能团化反应(图11)。该反应是铜催化对映选择性构建碳-氮键和碳-氧键的首次报道, 作者利用Cu-手性噁唑啉催化剂实现产物的对映选择性控制, 可以得到47%–97%的收率和50%–90%的*ee*值(enantiomeric excess, 对映体过量百分数)。产物通过水解TEMPO生成羟基并保留原有的手性构型。通过该法可以不对称合成生物活性分子中常见的咪唑骨架, 在药物的合成中有良好的应用前景。

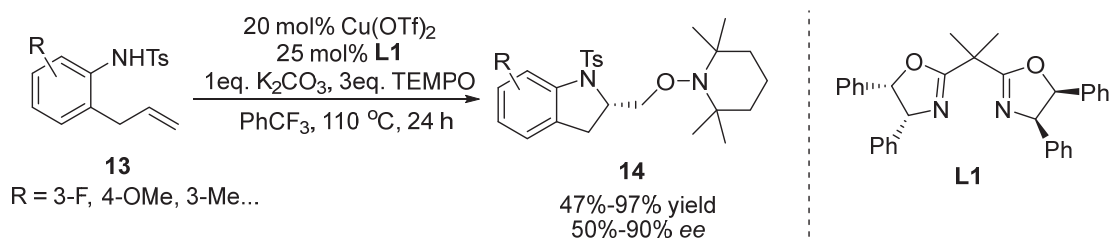


图11 Chemler等报道Cu催化下自由基历程的烯烃1,2-双官能团化反应

2015年, 张万斌等<sup>[19]</sup>报道了一种钪催化自由基历程的活化烯烃与羧酸发生烯烃1,2-双官能团化构建碳-氧键和碳-氮键的反应(图12)。作者认为是体系中二价钪与氧气反应原位生成过氧化氢, 再和醋酸反应生成过氧化醋酸中间体, 该中间体起到自由基引发剂的作用且是一种绿色氧化剂, 避免加入高价碘、钨试剂等高毒性氧化剂。作者通过条件筛选和底物扩展, 得到70%–98%的收率。

2019年, 王秋等<sup>[20]</sup>报道了一种1,3-共轭二烯和羧酸、*O*-酰基羟胺的三组分反应(图13), 该反应以

醋酸铜作为催化剂, 不需要加入配体, 即可高效实现碳-氧键和碳-氮键的同时构建。作者认为自由基来自于O-酰基羟胺中氮-氧键的断裂, 由于氮自由基的位阻使得该反应有良好的区域选择性, 仅在烯烃的端位反应, 此外, 该反应具有良好底物耐受性, 适用于广泛的共轭烯烃和有机羧酸, 有良好的应用前景, 作者进行了反应条件筛选和底物扩展, 可以得到21%–79%的产率。

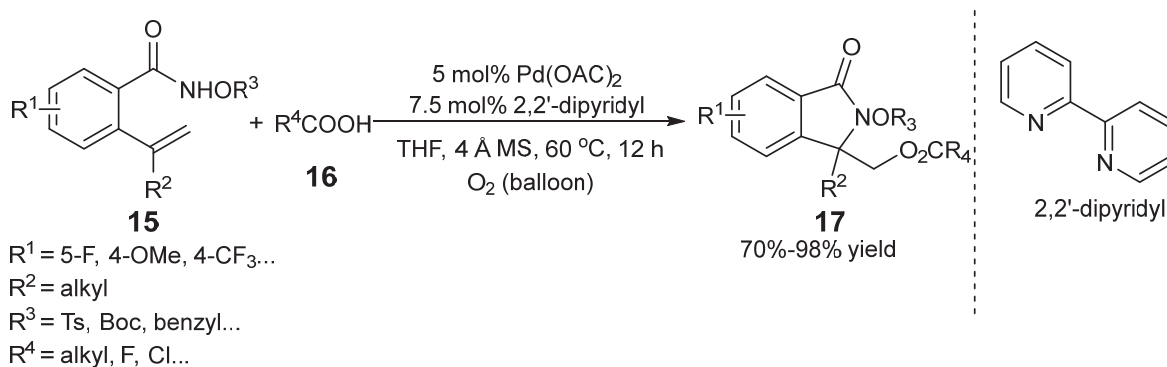


图12 张万斌等报道Pd催化下自由基历程的烯烃1,2-双官能团化反应

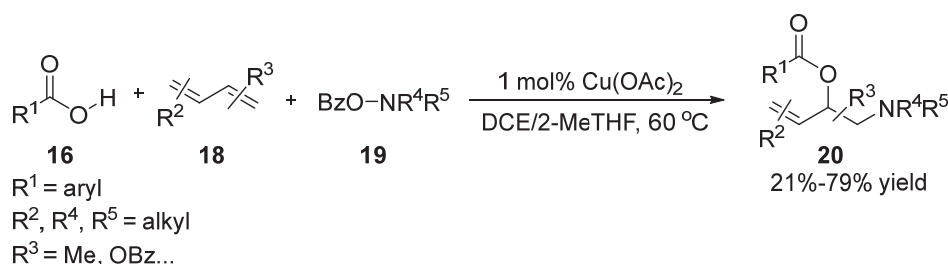


图13 王秋等报道Cu催化下自由基历程烯烃1,2-双官能团化三组分反应

2022年, 黄静美等<sup>[21]</sup>报道了一种采用电化学法实现简单烯烃与磺酰亚胺的氧化偶联反应(图14)。该过程不使用金属催化剂和化学氧化剂, 而是通过磺酰亚胺产生的氮自由基 $2'$ 与活化烯烃反应, 具有高原子经济性的特点, 可以得到44%–97%的收率。反应也可以在非活化烯烃底物上进行, 但产率偏低, 仅部分非活化烯烃可以完成反应。

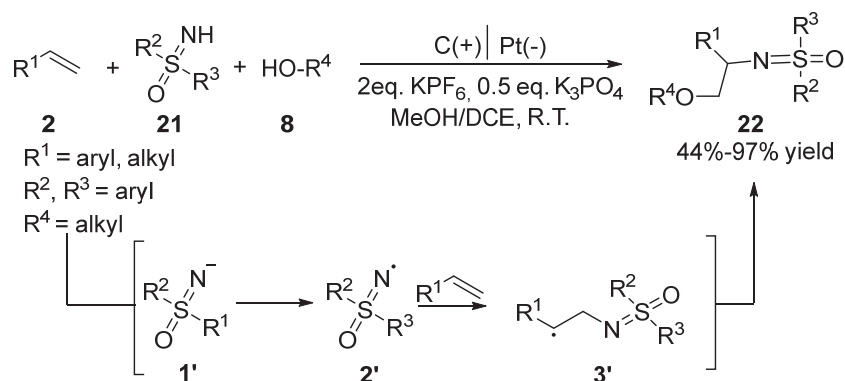


图14 黄静美等报道电解法实现自由基机理的烯烃1,2-双官能团化反应

作者对该反应的机理进行了研究, 认为磺酰亚胺负离子 $1'$ 在阳极失去一个电子后生成了磺酰亚胺自由基 $2'$ , 该自由基区域选择性地与烯烃底物(以苯乙烯为例)结合, 生成的碳自由基 $3'$ 在阳极失去一

个电子变为碳正离子，与醇类底物**8**结合后得到产物**22**，在电解池的阴极表面上氢离子得到电子转化为氢气，磺酰亚胺底物可以以负离子**1'**的形式大量存在。

### 3 通过自由基历程的烯烃1,2-双官能团化反应同时构建C—O键和C—S键

2018年，韩健林等<sup>[22]</sup>报道了电化学条件下活化烯烃与醇(酚)和硫酚的1,2-烯烃双官能团化反应(图15)。该反应首次提出了在电催化下利用烯烃、醇(酚)和硫酚发生三组分“一锅法”反应同时构建碳-氧键和碳-硫键的合成策略。该反应具有良好的底物耐受性和区域选择性，许多氧源如脂肪族醇和酚类化合物均适用于该反应，不外加氧源时，体系中的水可参与反应引入羟基，但产率偏低。作者通过反应条件筛选和底物扩展，得到了38%–87%的收率，克级放大后仍可得到较高收率，为制备芳香硫醚类化合物开发了一种绿色高效的合成方法。

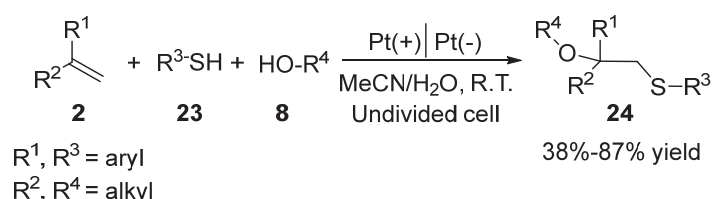


图15 韩健林等报道电解法实现自由基机理的烯烃1,2-双官能团化反应

2019年，孙建伟等<sup>[23]</sup>报道了一种电化学合成 $\beta$ -羟基砜、 $\beta$ -烷氧基砜和 $\beta$ -磺酰内酯的烯烃双官能团化反应(图16)，作者通过电化学方法高效完成活化烯烃与苯亚磺酸的反应，避免了化学氧化剂的使用，当以水和乙腈作为溶剂时可以引入羟基，而以醇作为溶剂并添加分子筛时可以引入烷氧基，烯烃底物中含有羧基时，可以合成 $\beta$ -磺酰内酯。作者通过反应条件筛选和底物扩展，得到38%–85%的收率。

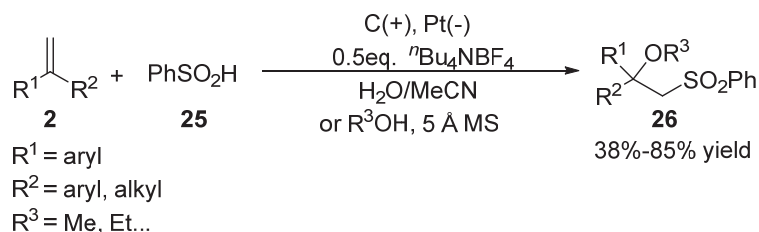


图16 孙建伟等报道电解法实现自由基机理的烯烃1,2-双官能团化反应

2022年，高保等<sup>[24]</sup>报道了一种以DMSO为溶剂，硫醇和缺电子烯烃的双官能团化反应，该反应可高效合成合成 $\beta$ -羟基硫化物(图17)。该反应以空气中的氧气作为氧化剂，不需要外加金属催化剂，即可高效实现碳-氧键和碳-硫键的同时构建。该反应具有简单的操作条件，广泛的底物范围以及优良的官能团兼容性，并适用于一些药物和生物活性分子，作者进行了反应条件筛选和底物扩展，得到了68%–96%的收率。

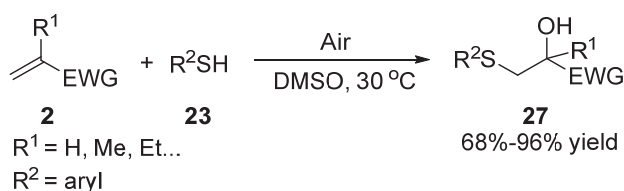


图17 高保等报道DMSO介导下实现自由基机理的烯烃1,2-双官能团化反应

作者对该反应的机理进行了研究(图18), 以对甲基苯硫酚**F1**为例, **F1**在空气中的氧气作用下产生自由基**F2**, 自由基**F2**与缺电子烯烃反应生成自由基**F3**, 再与空气中的氧气结合产生过氧自由基**F4**, 该自由基不稳定, 快速从体系中获取一个氢转化为中间体**F5**, 在溶剂DMSO的存在下, 中间体**F5**的自氧化反应受到抑制, 故和含有巯基的**F1**发生分子间氧化还原反应, 生成产物**F6**和自由基**F2**, 从而继续驱动反应的进行。

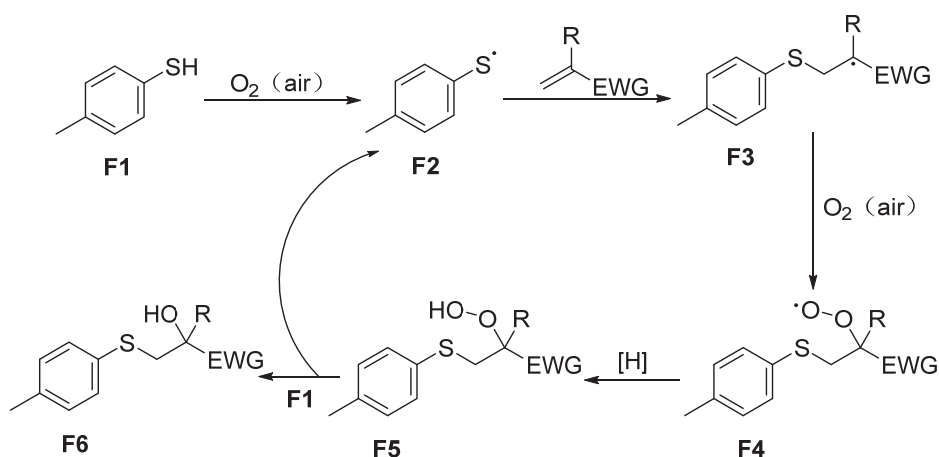


图18 DMSO介导下发生烯炔双官能团化合成 $\beta$ -羟基硫化物的反应机理

2022年, 刘晨江等<sup>[25]</sup>在不需外加光催化剂下通过可见光驱动活化烯炔与杂环硫醇反应, 实现 $\beta$ -羟基硫化物的合成(图19)。该反应只需添加碱和溶剂即可在光催化下进行, 作者通过反应条件的筛选和底物扩展得到了45%–95%的收率。产物所含羟基中的氧来自空气中的氧气, 当体系中含水时也可取得相同产物, 但产率有所降低, 作者认为这与反应过程中形成的电子给体-电子受体复合物(EDA, Electron-Donor-Acceptor)中间体有关, 而中间体的相互作用存在自由基过程。随后作者通过机理实验和DFT计算证明了该中间体的存在, 为后续苯环和杂环反应的机理研究提供了参考。

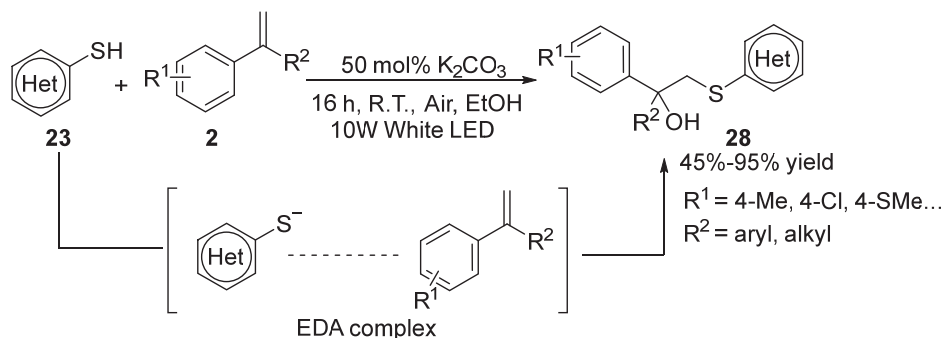


图19 刘晨江等报道可见光催化下经自由基历程实现烯炔1,2-双官能团化反应

#### 4 通过自由基历程的烯炔1,2-双官能团化反应同时构建C—O键和C—X键

2015年, Adinath等<sup>[26]</sup>报道了一种以醇为溶剂, 活化烯炔与碘酸钠和盐酸羟胺的双官能团化反应, 该反应在室温下反应30 min即可实现碳-氧键和碳-碘键的构建(图20)。作者认为反应是由碘酸钠和盐酸羟胺先反应产生碘分子和一氧化氮, 再由碘分子引发自由基反应实现烯炔的双官能团化。该反应条件温和, 不需要外加金属催化剂, 反应时间短, 可以得到70%–93%的收率, 是一种高效快速制备 $\beta$ -碘醚的新方法。

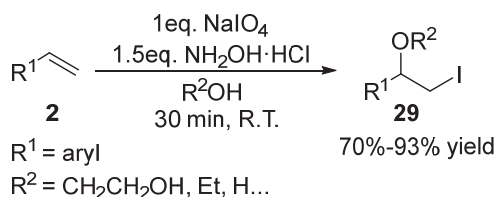


图20 Adinath Majee等报道烯烃与碘酸钠、盐酸羟胺反应经自由基历程实现1,2-双官能团化反应

2019年, 李金衡等<sup>[27]</sup>报道了一种电化学条件下烯烃与羧酸、*N*-溴代丁二酰亚胺(NBS)的三组分反应(图21), 实现了碳-氧键和碳-溴键的同时构建。该反应开创性的将NBS应用到电化学条件下烯烃的双官能团化反应中, 并在TEMPO的作用下成功引发了烯烃的自由基反应, 于简单、温和的条件下实现了碳-溴键的构建, 并可以取得40%–88%的收率。

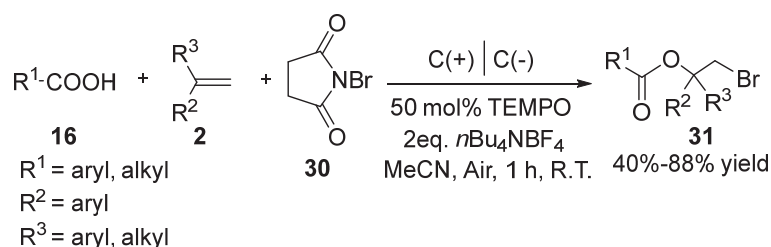


图21 李金衡等报道电解条件下烯烃与羧酸、NBS反应经自由基历程实现1,2-双官能团化反应

作者对该反应的机理进行了研究(图22), 首先在阳极, TEMPO失去电子转化为了TEMPO<sup>+</sup>, 随后, NBS产生的溴自由基在TEMPO<sup>+</sup>的氧化下与烯烃底物反应形成了环状溴鎓离子, 同时使TEMPO<sup>+</sup>还原为TEMPO, 而羧酸作为亲核试剂对溴鎓离子进行亲核进攻开环, 再脱质子化得到产物, 产生的质子迅速在阴极得到电子, 生成氢气离开体系。

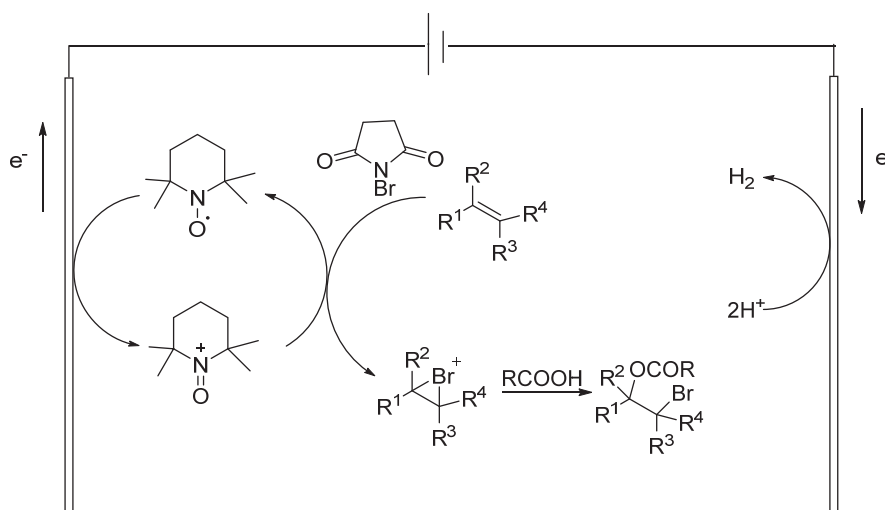


图22 电化学法烯烃发生三组分反应构建C—O键和C—Br键的反应机理

2020年, 李金衡等<sup>[28]</sup>对之前的方法进行了改进, 报道了一种活化烯烃在电解条件和二茂铁催化下, 与醇和卤代烃反应实现碳-氧键和碳-卤键同时构建的烯烃双官能团化反应(图23)。该方法是首次使用卤代烃作为亲核试剂引发烯烃的电化学双官能团化反应, 可以实现之前难以构建的碳-氯键的官

能团化反应，同时实现卤代烃的脱卤，这是因为在电化学和二茂铁催化下活化烯烃产生活性更高的自由基正离子中间体，有利于实现较为稳定的碳-氯键的断裂。作者通过反应条件筛选和底物扩展，烯烃的双官能团化可以35%–98%的收率，而脱卤可以取得56%–80%的收率。

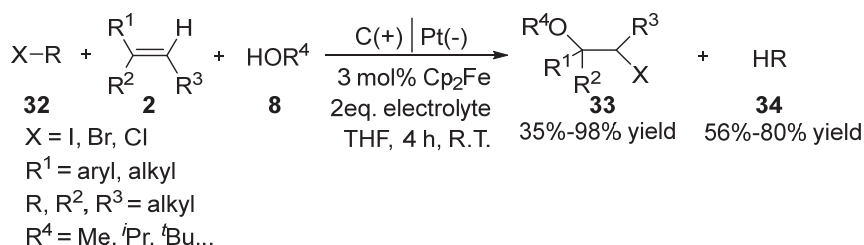


图23 李金衡等报道电解条件下烯烃与醇、卤代烃反应经自由基历程实现1,2-双官能团化和脱卤反应

2023年，李慧琳等<sup>[29]</sup>报道了一种缺电子烯烃在NBS和醇类试剂存在下直接发生烯烃双官能团化同时构建碳-氧键和碳-溴键的反应(图24)。该方法操作简单、反应条件温和、非对映选择性高、底物范围广，不同于使用强氧化剂或电化学条件，作者仅通过加入NBS即可引发并完成自由基反应，可以得到56%–98%的收率。

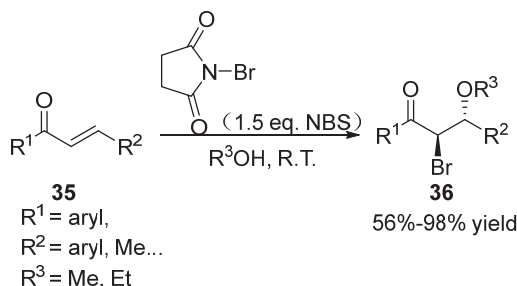


图24 李慧琳等报道烯烃在NBS作用下经自由基历程实现1,2-双官能团化反应

## 5 结语

通过自由基途径的烯烃1,2-双官能团化反应同时构建C–O键和C–X键是有机合成中重要的合成策略，本文介绍了通过自由基反应机理在构建C–O键的同时分别构建C–C键、C–N键、C–S键和C–X键的研究进展，并针对不同的构建方法和反应机理进行了讨论。经过十几年的发展，虽然烯烃1,2-双官能团化反应得到了一定的发展，但目前仍处于起步阶段，面临许多机遇与挑战。未来该领域的研究重点包括：(1) 针对反应中氧原子存在不同的进攻位点，反应的区域选择性较差的问题，发展新的合成策略或催化体系，提高烯烃1,2-双官能团化反应的区域选择性；(2) 针对非活化烯烃反应收率较低或不能反应的问题，发展电化学法或光催化法实现非活化烯烃1,2-双官能团化反应；(3) 针对自由基引发需要加入自由基引发剂或采用高能耗的电化学法等问题，开发新型自由基引发剂或新的电化学方法，降低能耗节约生产成本。未来随着合成化学研究的不断深入，烯烃1,2-双官能团化反应一定会迎来更大的发展。

## 参 考 文 献

- [1] Huang, H. M.; Xie, Y. J.; Hu, J. H.; Xie, P.; Qian, B. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 18327.
- [2] Dagousset, G.; Barthelemy, A. L.; Tuccio, B.; Magnier, E. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *57*, 13790.

- [3] Shi, X. D.; Zhang, S. Y.; Wang, C. H.; Ye, X. H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, 59, 20470.
- [4] Shenvi, R. A.; Crossley, S. W. M.; Obradors, C.; Martinez, R. M. *Chem. Rev.* **2016**, 116, 8912.
- [5] Zhu, S. Q.; Tu, H. Y.; Qing, F. L.; Chu, L. L. *Synthesis* **2020**, 52, 1346.
- [6] Hemric, B. N. *Org. Biomol. Chem.* **2021**, 19, 46.
- [7] Vessally, E.; Ebadi, A.; Hossaini, Z.; Heravi, M. R. P.; Azizi, B. *RSC Adv.* **2021**, 11, 13138.
- [8] Sodeoka, M.; Egami, H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, 53, 8294.
- [9] Sigman, M. S.; Jensen, K. H. *Org. Biomol. Chem.* **2008**, 6, 4083.
- [10] Chen, Q. Y.; Guo, Y.; Zhao, Z. G.; Li, L.; Huang, M. W.; Liu, C.; Xiao, J. C. *Org. Lett.* **2015**, 17, 4714.
- [11] Muñiz, K. *Chem. Soc. Rev.* **2004**, 33, 166.
- [12] Sigman, M. S.; Jensen, K. H. *Org. Biomol. Chem.* **2008**, 6, 4083.
- [13] Lei, A. W.; Huang, Z. L.; Jin, L. Q.; Feng, Y.; Peng, Pan.; Yi, H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, 52, 7151.
- [14] Li, J. H.; Song, L. J.; Jiang, S. S.; Gu, C. C.; Li, Y.; Dong, Y. X. *Org. Lett.* **2018**, 20, 7594.
- [15] Mandal, S. K.; Swain, A. K.; Ahmed, J.; Govindarajan, R. *J. Org. Chem.* **2019**, 84, 13490.
- [16] Li, S. H.; Li, Q. K.; Huang, R.; Meng, B. Y.; Peng, D. Q.; Wang, S. H.; Liu, S. H.; Fan, W. *ACS. Catal.* **2020**, 10, 4012.
- [17] Jin, C.; Yu, C. M.; Yan, Z. Y.; Huang, P. Y.; Shi, X. Y.; Zhuang, X. H.; Zhu, R.; Sun, B. *Org. Lett.* **2021**, 23, 617.
- [18] Chemler, S. R.; Kim, J. W.; Fuller, P. H. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, 130, 17638.
- [19] Zhang, W. B.; Yang, G. Q.; Zhang, X. H.; Wu, L.; Li, Y.; Kou, X. Z. *Org. Lett.* **2015**, 17, 5566.
- [20] Wang, Q.; Chen, A. W.; Hemric, B. N. *ACS Catal.* **2019**, 9, 10070.
- [21] Huang, J. M.; Wan, J. L. *Org. Lett.* **2022**, 24, 8914.
- [22] Han, J. L.; Wang, Y.; Deng, L. L.; Mei, H. B.; Du, B. N.; Pan, Y. *Green Chem.* **2018**, 20, 3444.
- [23] Sun, J. W.; Ma, D. K.; Yan, J. Y.; Zhang, Z. F. *Chin. Chem. Lett.* **2019**, 30, 1509.
- [24] Gao, B.; Liu, X. J.; Yan, Q.; Yang, R. T.; Jiang, T.; Zhang, X. L. *Synthesis* **2022**, 54, 2258.
- [25] Liu, C. J.; Xia, Y.; Jin, W. W.; Zhang, Y. H.; Wang, B.; Liu, T. X.; Xue, F.; Chen, Z. R. *Green Chem.* **2022**, 24, 3250.
- [26] Majee, A.; Zyryanov, G. V.; Hajra, A.; Kundu, S. K.; Santra, S.; Chakraborty, N. *RSC Adv.* **2015**, 5, 56780.
- [27] Li, J. H.; Song, R. J.; Wan, C. *Org. Lett.* **2019**, 21, 2800.
- [28] Li, J. H.; Song, R. J.; Zhang, T. T.; Luo, M. J.; Li, Y. *Org. Lett.* **2020**, 22, 7250.
- [29] Li, H. L.; Li, Z. Q.; Zhai, L. L.; Fang, B. W. *Tetrahedron Letters.* **2023**, 126, 154647.