

金/铱接力催化炔基酰胺环化/不对称烯丙基苄基化串联反应^{*}

王瑞祥^{†,a} 赵庆如^{†,b} 顾庆^{*,b} 游书力^{*,a,b}

(^a 华东师范大学 庄长恭研究所 上海 200062)

(^b 中国科学院上海有机化学研究所 金属有机化学国家重点实验室 上海 200032)

摘要 苄基亲核试剂参与的不对称烯丙基取代反应可以快速构筑含苄基片段的手性分子, 受到了有机化学家的广泛关注. 其中使用 5-亚甲基二氢噁唑作为苄基亲核试剂等同体, 可以实现形式上的不对称苄位烯丙基取代反应. 然而由于 5-亚甲基二氢噁唑化合物稳定性较差, 合成也存在一定困难, 对于发展高效的不对称苄位烯丙基取代反应提出了新挑战. 本工作发展了金/铱催化的炔基酰胺环化/不对称烯丙基苄基化串联反应. 首先金催化炔基酰胺环化生成 5-亚甲基二氢噁唑, 随后亲核进攻烯丙基铱中间体, 以良好的收率(49%~87%)以及优秀的对映选择性控制(98%~>99% *ee*)得到芳基苄位烯丙基取代的手性分子.

关键词 不对称催化; 烯丙基苄基化; 炔基酰胺环化; 串联反应; 金; 铱

Gold/Iridium Catalyzed Alkynylamide Cyclization/Asymmetric Allylic Benzylation Cascade Reaction^{*}

Wang, Rui-Xiang^{†,a} Zhao, Qing-Ru^{†,b} Gu, Qing^{*,b} You, Shu-Li^{*,a,b}

(^a Chang-Kung Chuang Institute, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

(^b State Key Laboratory of Organometallic Chemistry, Shanghai Institute of Organic Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract Asymmetric allylic substitution reactions involving benzyl nucleophilic reagents can rapidly construct chiral molecules containing benzyl fragments, which has attracted widespread attention from organic chemists. Formal asymmetric allylic benzylation reactions have been achieved by utilizing methylene oxazole as an equivalent of benzyl nucleophile. However, the development of highly efficient asymmetric allylic benzylation reactions remains a great challenge mainly due to the poor stability and synthetic difficulty of methylene oxazole. In this work, we have developed gold- and iridium-catalyzed alkynylamide cyclization/asymmetric allylic benzylation cascade reactions. In the presence of gold-carbene complex (**AuI**) and the combination of [Ir(cod)Cl]₂ and (*S*_A)-Carreira ligand, a wide range of enantioenriched oxazole derivatives, bearing a benzylic stereogenic center, were obtained in 49%~87% yields with 98%~>99% *ee*. A general procedure is described as the following: To a dried Schlenk tube were added [Ir(cod)Cl]₂ (5.4 mg, 0.008 mmol, 4 mol%), (*S*_A)-**L1** (16.2 mg, 0.032 mmol, 16 mol%) and 1,2-dichloroethane (1 mL) under argon atmosphere. The mixture was stirred at room temperature for 15 minutes to give a chiral iridium complex solution. Under an argon atmosphere, alkynylamide (0.2 mmol, 1.0 equiv.), allyl alcohol (0.4 mmol, 2.0 equiv.), **AuI** (0.02 mmol, 12.4 mg, 10 mol%), Fe(OTf)₂ (0.2 mmol, 70.6 mg, 1.0 equiv.) and 3 Å molecular sieves (80.0 mg) were added to another dry Schlenk tube, and then the above-prepared iridium catalyst was added. The reaction mixture was stirred at 40 °C until the starting materials were consumed (monitored by thin layer chromatography, TLC). The mixture was quenched with water (5 mL), and extracted with dichloromethane (5 mL × 3). The combined organic layers were dried over anhydrous Na₂SO₄, filtered, and then concentrated in vacuo to afford the crude product. The residue was purified by column chromatography (*V*(petroleum ether)/*V*(ethyl acetate)=15/1 or 10/1) to afford product **3**.

Keywords asymmetric catalysis; allylic benzylation; alkynylamide cyclization; cascade reaction; gold; iridium

1 引言

过渡金属催化不对称烯丙基取代反应是有机合成中最重要的反应类型之一, 使用不同的亲核试剂, 可以

实现碳-碳键和碳-杂原子键的高效构建, 已成为制备手性化合物的重要方法^[1]. 根据亲核试剂共轭酸 pK_a 的大小, 通常分为软亲核试剂($pK_a < 25$)和硬亲核试剂($pK_a > 25$). 例如, 由甲基芳香化合物产生的苄基亲核试剂就

^{*} Dedicated to the 90th anniversary of *Acta Chimica Sinica*.

^{*} E-mail: qinggu@sioc.ac.cn; slyou@sioc.ac.cn

[†] These authors contributed equally to this work.

Received March 30, 2023; published May 8, 2023.

Supporting information for this article is available free of charge via the Internet at <http://sioc-journal.cn>.

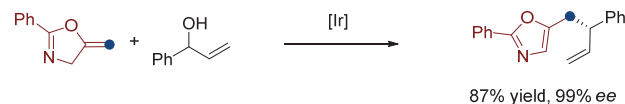
Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 21821002, 22031012, 22071260).

^{*} 庆祝《化学学报》创刊 90 周年.

项目受国家自然科学基金(Nos. 21821002, 22031012, 22071260)资助.

是一类重要的硬亲核试剂,其参与的苄位烯丙基取代反应可以快速引入苄基片段,所得的产物结构广泛存在于天然产物及药物活性分子中,因此受到了化学工作者们的广泛关注^[2].然而,由于苄位氢原子酸性较弱(pK_a 一般大于 25),其不对称烯丙基取代反应极具挑战,实现反应的区域及对映选择性控制困难,相关研究非常有限.在这一方面,Trost 课题组^[3]作出了开创性的工作,他们使用 Lewis 酸($BF_3 \cdot OEt_2$)作为添加剂,和 2-甲基吡啶衍生物中氮原子产生配位作用增强苄位氢原子的酸性,使其在强碱条件下易于形成较“软”的亲核试剂,成功实现了钼催化的不对称苄位烯丙基取代反应.之后 Walsh 等^[4]使用 $Cr(CO)_3$ 与甲苯形成 η^6 配合物,增强甲基的酸性,从而易于形成亲核试剂,实现了钼催化甲苯类化合物参与的烯丙基取代反应.我们课题组使用 $BF_3 \cdot OEt_2$ 活化策略,以及使用 Knochel 试剂($TMPZnBr \cdot LiBr$)^[5]存在下现场生成相应的苄基亲核试剂,分别发展了钇催化 2-甲基吡啶和 2-甲基噻唑等杂环芳烃参与的不对称烯丙基苄基化反应,快速地合成一系列手性苄位烯丙基取代产物^[6-8].此外,使用 5-亚甲基二氢噻唑作为苄基亲核试剂等同体,利用其环外烯炔作为亲核位点,在反应过程中发生芳构化反应,实现了形式上 5-甲基噻唑等杂芳环化合物的不对称苄位烯丙基取代反应^[9](图 1).然而由于 5-亚甲基二氢噻唑易发生芳构化,不够稳定,其合成存在一定困难.受 Helaja 课题组^[10]发展的金催化合成 5-亚甲基二氢噻唑工作的启发,我们设想是否可以利用金/铱接力催化的串联反应^[11]来一步实现炔基酰胺自身环化后的不对称苄位烯丙基化反应(图 1).本工作我们将汇报该课题的研究结果.

Our previous work:



This work:

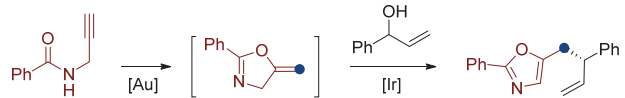


图 1 不对称烯丙基苄基化串联反应

Figure 1 Asymmetric allylic benzylation reaction

2 结果与讨论

2.1 反应条件筛选

首先,我们使用炔基酰胺 **1a** 和烯丙醇 **2a** 作为模板底物,以 5 mol% **Au1** 为环异构化反应催化剂,以 4 mol% $[Ir(cod)Cl]_2$ /16 mol% (S_a)-**L1** 为烯丙基取代反应催化剂, $Fe(OTf)_2$ 作为酸促进剂, 3 Å 分子筛作为添加剂,在 1,2-二氯乙烷(DCE)中, 40 °C 下反应 36 h,反应能够顺利发生,以 60%的核磁收率和 >99% *ee* 的对映选择性控制得到目标产物 **3a** (Table 1, Entry 1). 随着 **Au1** 催化

剂用量的增加,反应收率也有所提高.当使用 10 mol% 的 **Au1** 时,反应能够以 95%的核磁收率, >99% *ee* 的对映选择性控制得到 **3a** (Entry 2),而 **Au1** 用量增加至 20 mol%,收率不再提高(Entry 3, 94%核磁收率).在该条件下,还分别考察了 $AuCl_3$, Ph_3PAuCl , Me_2SAuCl 和 Ph_3PAuMe 等金催化剂,发现均无法得到更好的结果 (Entries 4~7).接下来对 Carreira 类配体也进行考察,当使用 3,3'-位碘代或 6,6'-位溴代的 Carreira 配体 **L2** 和 **L3** 时,无论是反应的收率还是对映选择性控制都有所降低 (Entries 8, 9, 36% NMR yield, 52% *ee*; 66% NMR yield, 96% *ee*).对常用溶剂也进行了考察,当使用 1,4-二氧六环、四氢呋喃和甲苯时,反应能够顺利发生,但仅能以中等的收率得到产物 (Entries 10~12, 20%~54% NMR yield);当使用 MeCN 时,反应则不发生(Entry 13);使用氯仿时,反应也能够获得 70%的核磁收率和大于 99% *ee* 的对映选择性控制(Entry 14).因此,使用 DCE 作为反应的最优溶剂,对于添加剂酸和分子筛进行考察,反应结果未得到进一步提高(见 Supporting Information).通过上述条件筛选,确定了反应最优条件:以 **Au1** (10 mol%), $[Ir(cod)Cl]_2$ (4 mol%), (S_a)-Carreira 配体 **L1**

表 1 反应条件优化^a

Table 1 Optimization of the reaction conditions

Entry	[Au] (x mol%)	L	Solvent	Yield of 3a ^b	<i>ee</i> of 3a ^c
1 ^e	Au1	(S_a)- L1	DCE	60%	>99%
2	Au1	(S_a)- L1	DCE	95% (87% ^d)	>99%
3 ^f	Au1	(S_a)- L1	DCE	94%	>99%
4	$AuCl_3$	(S_a)- L1	DCE	68%	>99%
5	Ph_3PAuCl	(S_a)- L1	DCE	50%	>99%
6	Me_2SAuCl	(S_a)- L1	DCE	75%	49%
7 ^g	Ph_3PAuMe	(S_a)- L1	DCE	trace	N.D. ^h
8	Au1	(S_a)- L2	DCE	36%	52%
9	Au1	(S_a)- L3	DCE	66%	96%
10	Au1	(S_a)- L1	dioxane	54%	>99%
11	Au1	(S_a)- L1	THF	20%	N.D. ^h
12	Au1	(S_a)- L1	toluene	52%	>99%
13	Au1	(S_a)- L1	MeCN	trace	N.D. ^h
14	Au1	(S_a)- L1	$CHCl_3$	70%	>99%

^a 反应条件: **1a** (0.2 mmol), **2a** (0.4 mmol, 2 equiv.), $[Ir(cod)Cl]_2$ (4 mol%), **L** (16 mol%), **[Au]** 催化剂 (10 mol%), $Fe(OTf)_2$ (0.2 mmol, 1.0 equiv.), 3 Å 分子筛 (80.0 mg), DCE (2 mL) 为溶剂, 40 °C 下反应. ^b 核磁共振氢谱 (¹H NMR) 测定反应粗产物 **3a** 的收率 (二溴甲烷为内标). ^c 高效液相色谱法 (HPLC) 测定. ^d 分离收率. ^e 使用 5 mol% **Au1** 催化剂. ^f 使用 20 mol% **Au1** 催化剂. ^g 反应 48 h. ^h N.D. = not determined.

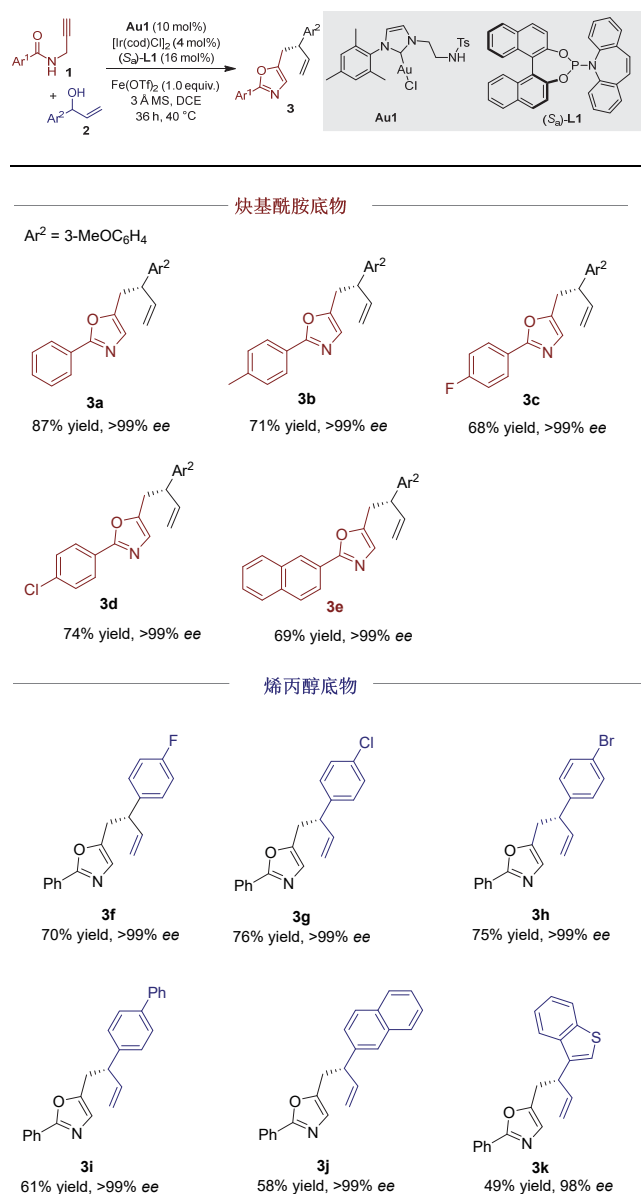
(16 mol%)作为催化剂, $\text{Fe}(\text{OTf})_2$ (1.0 equiv.)作为酸促进剂, 3 Å 分子筛作为添加剂, 在 DCE 中 40 °C 进行反应。

2.2 底物拓展

在确定了最优条件后, 对反应底物的普适性进行考察(表 2)。首先对炔基酰胺底物进行了考察, 当炔基酰胺苯环上带有给电子基如甲基(**1b**)或拉电子基氟和氯(**1c**, **1d**)时, 反应均能以中等到良好的收率和优秀的对映选择性控制得到产物(**3b**~**3d**, 68%~74% yields, >99% ee)。当使用炔基萘酰胺时, 反应也可以很好地兼容, 以 69% 收率和 >99% ee 的对映选择性控制得到产物 **3e**。

表 2 底物范围^a

Table 2 Substrate scope



^a 反应条件: **1** (0.2 mmol), **2** (0.4 mmol, 2 equiv.), **Au1** (10 mol%), $[\text{Ir}(\text{cod})\text{Cl}]_2$ (4 mol%), $(S)_\text{a}$ -**L1** (16 mol%), $\text{Fe}(\text{OTf})_2$ (0.2 mmol, 1.0 equiv.), 3 Å 分子筛 (80.0 mg), DCE (2 mL) 为溶剂, 40 °C 下反应。

随后, 对于烯丙醇底物也进行了考察, 当苯环对位带有卤素如 F, Cl, Br 时, 反应能够以中等到良好的收率和优秀的对映选择性控制得到产物(**3f**~**3h**, 70%~76% yields, >99% ee), 当使用联苯、萘或苯并噻吩取代的烯丙醇底物(**2i**~**2k**)时, 反应也能够很好地兼容(49%~61% yields, 98%~>99% ee)。

2.3 可能的反应机理

我们推测了可能的反应机理, 在催化循环 1 中 **1a** 在 **Au1** 作用下环化得到中间体 **4**, 在催化循环 2 中铱催化剂首先与烯丙基底物 **2a** 配位, 氧化加成, 得到 π -烯丙基中间体物种 **III**, 中间体 **4** 对其亲核进攻, 同时双键异构化得到物种 **IV**, 随后金属解离得到产物 **3a**, 并释放出催化剂, 完成循环(图 2)。

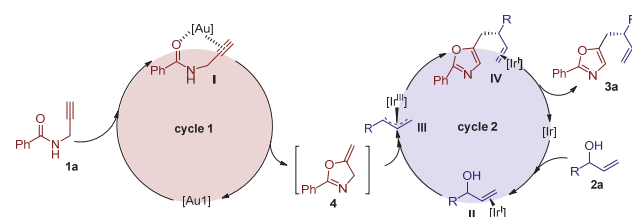


图 2 可能的催化循环

Figure 2 Plausible catalytic cycle

3 结论

发展了金/铱催化的炔基酰胺环化/不对称烯丙基苯基化串联反应。在 **Au1** 催化剂存在下, 炔基酰胺环化后生成 5-亚甲基二氢噁唑, 利用芳香性的驱动力原位双键异构化, 亲核进攻烯丙基铱中间体, 以良好的收率(49%~87%)以及优秀的对映选择性控制(98%~>99% ee)得到系列噁唑苯位烯丙基取代的手性分子。

4 实验部分

在氩气氛围下, 向干燥的 Schlenk 管中加入 $[\text{Ir}(\text{cod})\text{Cl}]_2$ (5.4 mg, 0.008 mmol, 4 mol%), $(S)_\text{a}$ -**L1** (16.2 mg, 0.032 mmol, 16 mol%), 干燥 1,2-二氯乙烷(1 mL)。在室温下搅拌反应 15 min, 颜色由浅黄色变为深红色, 获得手性铱催化剂。

在氩气氛围下, 向另一个干燥的 Schlenk 管中加入炔基酰胺(0.2 mmol, 1.0 equiv.), 烯丙醇 (0.4 mmol, 2.0 equiv.), **Au1** (0.02 mmol, 12.4 mg, 10 mol%), $\text{Fe}(\text{OTf})_2$ (0.2 mmol, 70.6 mg, 1.0 equiv.)和 3 Å 分子筛(80.0 mg), 加入制备好的铱催化剂。反应混合物在 40 °C 下搅拌, 直至原料消耗完毕(薄层色谱监控)。反应体系用水淬灭(5 mL), 二氯甲烷(5 mL×3)萃取。有机层收集后, 经无水硫酸钠干燥, 过滤, 真空浓缩得到粗产物。柱层析色谱(*V*(石油醚)/*V*(乙酸乙酯)=15/1 或 10/1)纯化分离得到目标产物 **3**。

References

- [1] (a) Trost, B. M.; Crawley, M. L. *Chem. Rev.* **2003**, *103*, 2921. (b) Lu, Z.; Ma, S. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 258. (c) Weaver, J. D.; Recio, A., III; Grenning, A. J.; Tunge, J. A. *Chem. Rev.* **2011**, *111*, 1846. For a book, see: (d) *Transition Metal Catalyzed Enantioselective Allylic Substitution: Organic Synthesis*, Ed.: Kazmaier, U., Springer, Heidelberg, **2012**.
- [2] (a) *Heterocycles in Natural Product Synthesis*, Eds.: Majumdar, K. C.; Chattopadhyay, S. K., Wiley-VCH, Weinheim, **2011**. (b) *Metallation of Azoles and Related Five-Membered Ring Heterocycles: Topics in Heterocyclic Chemistry*, Vol. 29, Ed.: Gribble, G. W., Springer, Heidelberg, **2012**. (c) *Heterocyclic Chemistry in Drug Discovery*, Ed.: Li, J.-J., Wiley, Hoboken, **2013**. (d) Roughley, S. D.; Jordan, A. M. *J. Med. Chem.* **2011**, *54*, 3451. (e) Vitaku, E.; Smith, D. T.; Njardarson, J. T. *J. Med. Chem.* **2014**, *57*, 10257.
- [3] (a) Trost, B. M.; Thaisrivongs, D. A. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 14092. (b) Trost, B. M.; Thaisrivongs, D. A. *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 12056. (c) Trost, B. M.; Thaisrivongs, D. A.; Hartwig, J. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 12439.
- [4] (a) Sha, S.-C.; Jiang, H.; Mao, J.; Bellomo, A.; Jeong, S. A.; Walsh, P. J. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 1070. (b) Mao, J.; Zhang, J.; Jiang, H.; Bellomo, A.; Zhang, M.; Gao, Z.; Dreher, S. D.; Walsh, P. J. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 2526.
- [5] (a) Mosrin, M.; Knochel, P. *Org. Lett.* **2009**, *11*, 1837. (b) Duez, S.; Steib, A. K.; Manolikakes, S. M.; Knochel, P. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 7686. (c) Haas, D.; Hammann, J. M.; Greiner, R.; Knochel, P. *ACS Catal.* **2016**, *6*, 1540.
- [6] (a) Liu, X.-J.; You, S.-L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2017**, *56*, 4002. (b) Liu, X.-J.; Zhang, W.-Y.; Zheng, C.; You, S.-L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, e202200164.
- [7] For selected reviews on Ir-catalyzed asymmetric allylic substitution reactions, see: (a) Hartwig, J. F.; Stanley, L. M. *Acc. Chem. Res.* **2010**, *43*, 1461. (b) Liu, W.-B.; Xia, J.-B.; You, S.-L. *Top. Organomet. Chem.* **2012**, *38*, 155. (c) Zhuo, C.-X.; Zheng, C.; You, S.-L. *Acc. Chem. Res.* **2014**, *47*, 2558. (d) Hethcox, J. C.; Shockley, S. E.; Stoltz, B. M. *ACS Catal.* **2016**, *6*, 6207. (e) Qu, J.; Helmchen, G. *Acc. Chem. Res.* **2017**, *50*, 2539. (f) Rössler, S. L.; Petrone, D. A.; Carreira, E. M. *Acc. Chem. Res.* **2019**, *52*, 2657. (g) Cheng, Q.; Tu, H.-F.; Zheng, C.; Qu, J.-P.; Helmchen, G.; You, S.-L. *Chem. Rev.* **2019**, *119*, 1855.
- [8] For selected recent examples on Ir-catalyzed asymmetric allylic substitution reactions: (a) Singha, S.; Serrano, E.; Mondal, S.; Daniliuc, C. G.; Glorius, F. *Nat. Catal.* **2020**, *3*, 48. (b) Butcher, T. W.; Yang, J. L.; Amberg, W. M.; Watkins, N. B.; Wilkinson, N. D.; Hartwig, J. F. *Nature* **2020**, *583*, 548. (c) Chen, P.; Li, Y.; Chen, Z.-C.; Du, W.; Chen, Y.-C. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 7083. (d) Han, M.; Yang, M.; Wu, R.; Li, Y.; Jia, T.; Gao, Y.; Ni, H.-L.; Hu, P.; Wang, B.-Q.; Cao, P. *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 13398. (e) Tu, H.-F.; Yang, P.; Lin, Z.; Zheng, C.; You, S.-L. *Nat. Chem.* **2020**, *12*, 838. (f) Rossi-Ashton, J. A.; Clarke, A. K.; Donald, J. R.; Zheng, C.; Taylor, R. J. K.; Unsworth, W. P.; You, S.-L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 7598. (g) Wang, J.; Qi, X.; Min, X.-L.; Yi, W.; Liu, P.; He, Y. *J. Am. Chem. Soc.* **2021**, *143*, 10686. (h) Davis, C. R.; Luvaga, I. K.; Ready, J. M.; *J. Am. Chem. Soc.* **2021**, *143*, 4921. (i) Jiang, R.; Ding, L.; Zheng, C.; You, S.-L. *Science* **2021**, *371*, 380. (j) Crisenza, G. E. M.; Faraone, A.; Gandolfo, E.; Mazzarella, D.; Melchiorre, P. *Nat. Chem.* **2021**, *13*, 575. (k) Xiao, L.; Wei, L.; Wang, C.-J. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 24930. (l) Peng, Y.; Huo, X.; Luo, Y.; Wu, L.; Zhang, W. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 24941. (m) Zhang, M.-M.; Chen, P.; Xiong, W.; Hui, X.-S.; Lu, L.-Q.; Xiao, W.-J. *CCS Chem.* **2021**, *3*, 3383. (n) Deng, Y.; Liang, X.; Wei, K.; Yang, Y.-R. *J. Am. Chem. Soc.* **2021**, *143*, 20622. (o) Zhao, Q.-R.; Jiang, R.; You, S.-L. *Acta Chim. Sinica* **2021**, *79*, 1107 (in Chinese). (赵庆如, 蒋茹, 游书力, 化学学报, **2021**, *79*, 1107.) (p) Yang, P.-S.; Liu, C.-X.; Zhang, W.-W.; You, S.-L. *Acta Chim. Sinica* **2021**, *79*, 742 (in Chinese). (杨普苏, 刘晨旭, 张文文, 游书力, 化学学报, **2021**, *79*, 742.) (q) Ding, L.; Song, H.; Zheng, C.; You, S.-L. *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 4770. (r) Liu, X.-J.; Zhang, W.-Y.; Zheng, C.; You, S.-L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e2022001. (s) Moghadam, F. A.; Hicks, E. F.; Sercel, Z. P.; Cusumano, A. Q.; Bartberger, M. D.; Stoltz, B. M. *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 7983. (t) Yang, P.; Wang, R.-X.; Cheng, Y.-Z.; Zheng, C.; You, S.-L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202213520. (u) Yang, W.-L.; Shang, X.-Y.; Luo, X.; Deng, W.-P. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202203661. (v) Jiang, R.; Zhao, Q.-R.; Zheng, C.; You, S.-L. *Nat. Catal.* **2022**, *5*, 1089. (w) Zhang, J.; Yang, W.-L.; Zheng, H.; Wang, Y.; Deng, W.-P. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202117079. (x) Wu, Z.-H.; Wang, H.-Y.; Yang, H.-L.; Wei, L.-H.; Hayashi, T.; Duan, W.-L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202213904. (y) Yang, W.-L.; Shang, X.-Y.; Ni, T.; Yan, H.; Luo, X.; Zhen, H.; Li, Z.; Deng, W.-P. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202210207. (z) Fu, C.; Xiong, Q.; Xiao, L.; He, L.; Bai, T.; Zhang, Z.; Dong, X.-Q.; Wang, C.-J. *Chin. J. Chem.* **2022**, *40*, 1059. (aa) Tang, X.; Su, Z.; Lin, Q.; Lin, L.; Dong, S.; Feng, X. *Chin. J. Chem.* **2022**, *40*, 1793. (ab) Jia, S.-H.; Chen, S.-Y.; Liu, Z.-S.; Cheng, H.-G.; Zhou, Q.-H. *Chin. J. Org. Chem.* **2022**, *42*, 3373 (in Chinese). (贾仕虎, 陈思元, 刘泽水, 程鸿刚, 周强辉, 有机化学, **2022**, *42*, 3373.) (ac) Xie, J.-H.; Hou, Y.-M.; Feng, Z.; You, S.-L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, *63*, e202216396. (d) Liu, X.-J.; Zheng, C.; Yang, Y.-H.; Jin, S.; You, S.-L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, *58*, 10493.
- [10] (a) Seppanen, O.; Aikonen, S.; Muuronen, M.; Alamillo-Ferrer, C.; Bures, J.; Helaja, J. *Chem. Commun.* **2020**, *56*, 14697. (b) Yang, G.; Ke, Y.-M.; Zhao, Y. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 12775. (c) Ma, Y.; Ali, H. S.; Hussein, A. A. *Catal. Sci. Technol.* **2022**, *12*, 674.
- [11] (a) Kim, U. B.; Jung, D. J.; Jeon, H. J.; Rathwell, K.; Lee, S. *Chem. Rev.* **2020**, *120*, 13382. (b) Wei, L.; Wang, C.-J. *Chem. Catal.* **2023**, *3*, 100455.

(Cheng, B.)