

## 锰元素促进的人工合成化学及其应用

于夕雯<sup>1,2</sup>, 杨芸辉<sup>1,2,3,\*</sup>, 王从洋<sup>1,2,3,\*</sup>

<sup>1</sup> 北京分子科学国家研究中心, 中国科学院化学研究所, 中科院分子识别与功能重点实验室, 北京 100190

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

<sup>3</sup> 北京怀柔综合性国家科学中心物质科学实验室, 北京 101400

**摘要:** 光合作用是大自然中最重要的合成反应, 其产氧中心包括关键的锰-氧-钙结构单元。锰元素在地壳中储量大、毒性低、氧化态丰富, 具有独特的反应性, 因此, 人工利用锰元素实现自然界不能实现的物质合成具有重要的意义和广阔的前景。本文简述了锰元素促进的合成化学的发展历史, 及其近年来在无机电化学、有机合成等领域中的应用。

**关键词:** 锰; 锰氧化物; 羰基锰化合物; 合成化学

**中图分类号:** G64; O6

## Manganese-Enabled Synthetic Chemistry and Applications

YU Xiwen<sup>1,2</sup>, YANG Yunhui<sup>1,2,3,\*</sup>, WANG Congyang<sup>1,2,3,\*</sup>

<sup>1</sup> Beijing National Laboratory for Molecular Sciences, CAS Key Laboratory of Molecular Recognition and Function, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China.

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China.

<sup>3</sup> Physical Science Laboratory, Huairou National Comprehensive Science Center, Beijing 101400, P. R. China.

**Abstract:** Photosynthesis is the most important synthetic reaction in nature, the O<sub>2</sub>-evolution center of which contains the key Mn-O-Ca structure motif. Manganese features earth abundance, low toxicity, rich oxidative states, and unique reactivities, which makes it of great importance and hold huge potentials to achieve new synthesis unavailable by nature. In this paper, the history of manganese-enabled synthetic chemistry and its recent applications in inorganic electrochemistry and organic synthesis are reviewed briefly.

**Key Words:** Manganese; Manganese oxides; Manganese carbonyl complexes; Synthetic chemistry

### 1 锰化学的发展历史及其应用

光合作用为地球上的生物提供了能量和物质来源, 因此其被认为是地球上最重要的合成反应。光合系统中的产氧活性中心是一个锰-氧-钙的簇合物, 锰在其中发挥了关键作用。锰元素作为众多生物的必需元素之一, 它在保护细胞免受超氧自由基(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)侵害的机制中起着关键作用, 如锰超氧化物歧化酶(Mn-SOD), 可以将超氧自由基转化为双氧水。此外, 很多酶中也有锰元素的存在, 其可以参与到葡萄糖代谢、维生素 B<sub>1</sub> 的吸收利用和 RNA 的运作中<sup>[1]</sup>。人工合成化学可以创造自然界中无法产生的新物质, 为人类社会的可持续发展提供了关键的物质基础。人工利用锰元素实现不同于光

收稿: 2019-09-26; 录用: 2019-10-28; 网络发表: 2019-11-11

\*通讯作者, Email: yangyh@iccas.ac.cn; wangcy@iccas.ac.cn

基金资助: 国家自然科学基金(21772202, 21831008); 北京分子科学国家研究中心(BNLMS-CXXM-201901); 北京怀柔综合性国家科学中心物质科学实验室(Z181100004218004)

合作用的合成化学具有重要的意义和广阔的应用前景。

锰是元素周期表中的第 25 号元素, 最外层电子排布为  $3d^5 4s^2$ , 位于第四周期第 VIIB 族, 元素符号为 Mn, 英文名称为 Manganese, 是以地名命名的元素之一(Magnesia, 希腊)。锰元素是地壳中的丰产元素, 在所有元素中排在第十二位, 在过渡金属中排在第三位, 仅次于铁和钛。

锰化合物有着丰富的氧化态, 最低可至-3 价, 最高可至+7 价。较为常见的锰化合物包括+2 价的  $MnCl_2$ 、+4 价的  $MnO_2$  及+7 价的  $KMnO_4$  等。最早使用锰化合物的记录可以追溯到旧石器时代, 先民们使用软锰矿(主要成分为  $MnO_2$ )作为颜料绘制洞穴壁画。1774 年, 瑞典科学家 Johann Gahn 首次利用碳粉还原提纯后的软锰矿得到了一种新的金属单质, 即后来被命名为“Manganese”的锰单质<sup>[2]</sup>。在工业上, 常用电解硫酸锰的方法来制备金属锰。制取硫酸锰所用的锰矿粉分为菱锰矿(含有  $MnCO_3$ )和软锰矿(含有  $MnO_2$ )两种。主要涉及的化学反应如方程式(1)–(3)所示<sup>[3]</sup>。



注: 式(1)是菱锰矿粉制取  $MnSO_4$  的主要化学反应; 式(2)是对软锰矿进行还原焙烧, 还原得到 MnO 后, 用硫酸浸取来制取  $MnSO_4$  的主要化学反应; 式(3)是向隔膜电解槽注入含硫酸铵的硫酸锰水溶液, 接通直流电, 经电析, 在阴极板上析出金属锰的主要化学反应。

因为金属锰质地太脆不易被直接使用, 因此, 在被开采的锰矿石中, 95%都被用于制作合金——在钢中加入约 1%的锰可以提高其强度、工作性能和耐磨性。1883 年, 谢菲尔德大学的冶金学家 Robert Hadfield 获得了含有约 13%锰的“锰钢”的专利。这种金属非常强韧, 可用于制作铁轨、土方机械、保险柜、军盔、步枪枪管和牢房的钢条等。至今, 这种锰钢仍被称为 Hadfield 钢。

## 2 锰在无机电化学方面的应用与发展

随着科技的发展, 电池和超级电容器作为电化学的能量存储和转换装置, 广泛用于人类生活中, 而二者的性能很大程度上取决于电极中的活性材料, 锰作为一种高活性、高丰度、低价的金属, 被广泛应用于这类材料中。

### 2.1 具有纳米结构的锰氧化物在电池方面的应用

具有纳米结构的锰氧化物能进一步促进在固-液或固-液-气界面处发生的电化学反应。目前, 已发展出具有纳米结构的 Zn-MnO<sub>2</sub> 电池、Li-MnO<sub>2</sub> 电池、Mg-MnO<sub>2</sub> 电池等。在常见的便携式电池中, 初级 Zn-MnO<sub>2</sub> 电池由于其成本低和环境友好的特点, 占了每年总销售额的约 90%<sup>[4]</sup>。在这里, 以 Zn-MnO<sub>2</sub> 电池为例, 简要介绍具有纳米结构的锰氧化物的应用和发展。

1860 年, Leclanche 首次报道了以锌箔作阳极材料, 天然 MnO<sub>2</sub> 和炭黑作阴极材料, ZnCl<sub>2</sub>-NH<sub>4</sub>Cl(aq)为电解质的碳电池。在接下来的一百年中, 商业 Zn-MnO<sub>2</sub> 电池开始被广泛使用, 该电池通常由电解产生的 MnO<sub>2</sub> 与石墨阳极的混合物、锌阴极和合成凝胶电解质组成。但这种电池的实际电容值很小。随后人们发现, 具有纳米结构的 MnO<sub>2</sub> 具有高表面积, 能改善活性材料与电解质之间的有效接触, 从而使放电容量得到提升<sup>[5,6]</sup>。

2006 年, 陈军课题组<sup>[7]</sup>报道了不同类型的碱性 Zn-MnO<sub>2</sub> 电池的放电容量顺序, 分别为纳米级  $\gamma$ -MnO<sub>2</sub> > 纳米级  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> > 块状  $\gamma$ -MnO<sub>2</sub> > 纳米级  $\beta$ -MnO<sub>2</sub>。先前的研究表明 MnO<sub>2</sub> 的电化学性能主要与三个因素有关: 晶体结构、晶体尺寸和微观形态<sup>[6,8]</sup>, 由于它们通过基本结构单元(MnO<sub>6</sub> 八面体)的不同连接方式形成的隧道大小不同, 从而导致这类化合物的性质以及电极性能具有明显差别, 最终影响了电池放电容量的大小(图 1)。

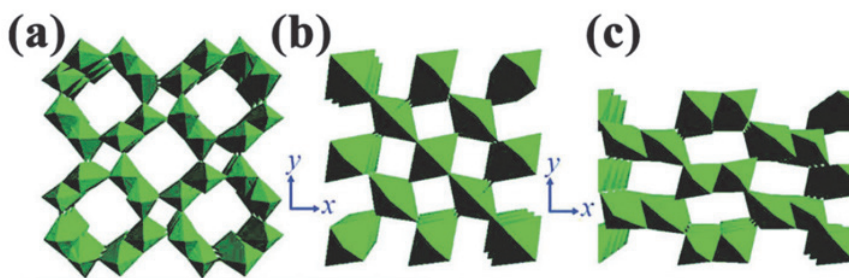


图1  $\alpha$ - $\text{MnO}_2$  (a),  $\beta$ - $\text{MnO}_2$  (b)和  $\gamma$ - $\text{MnO}_2$  (c)的晶体结构<sup>[7]</sup>

## 2.2 具有纳米结构的锰氧化物在超级电容器方面的应用

微超级电容器(MSCs)是一种新型超级电容器,其典型器件特征尺寸在微米范围内。与传统的超级电容器(SC)相比,由于扩散长度减小,MSCs具有高能量密度、功率密度和良好的充电及放电速率。基于 $\text{MnO}_2$ 材料的环境友好、理论容量大、稳定性好等特性,在合理的电位范围内, $\text{MnO}_2$ 可以广泛用作MSCs的活性材料。

2014年,杨会颖及其同事<sup>[9]</sup>开发了一种用于制造全固态柔性MSC的丝网印刷技术,以印刷Ag电极, $\text{MnO}_2$ /OLC(洋葱状碳)作活性材料;PVA(聚乙烯醇)/ $\text{H}_3\text{PO}_4$ 作固体电解质。随后,Kaner及其同事<sup>[10]</sup>通过合理设计电极微结构,将在高电压下工作的电解质与活性材料相结合,发展了基于石墨烯和 $\text{MnO}_2$ 的3D高性能混合MSC材料。这些微型器件使每平方厘米的超高电容接近400 mF,能量密度高达 $22 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{L}^{-1}$ ,为制造用于高性能MCS材料的电极开辟了新途径,对微电子领域贡献巨大。

## 3 锰在有机合成化学方面的应用与发展

20世纪以来,有机锰化合物在催化领域中逐渐展现出了越来越广泛的应用前景,比如酞菁锰、Salen锰、羰基锰及新兴的Pincer-锰化合物等在氧化反应、C—H键活化反应及氢化/脱氢反应中表现出了良好的催化活性。羰基锰化合物是低价锰化合物的重要组成部分,其价态主要包括+1、0和-1价。目前,商品化的羰基锰化合物有十羰基二锰( $\text{Mn}_2(\text{CO})_{10}$ )和五羰基溴化锰( $\text{MnBr}(\text{CO})_5$ )。从结构上讲,羰基锰化合物中的锰金属中心与羰基碳原子上的孤对电子形成 $\sigma$ 键的同时,其d轨道电子也会部分填充至羰基配体上的 $\pi$ 反键轨道,形成较强的 $d\pi \rightarrow p\pi^*$ 反馈作用,这种配位作用使得羰基锰化合物具备了较好的稳定性。羰基锰化合物以其独特的催化活性,在C—H键活化反应、硅氢化反应、环化反应、自由基反应、羰基化反应,以及亲电取代反应等领域发挥着越来越重要的作用。限于篇幅,此文仅结合本课题组的研究工作简要介绍低价锰化合物在C—H键活化领域及硅氢化领域中的部分应用,以飨读者。

### 3.1 羰基锰催化在C—H键活化方面的应用

1970年,Stone和Bruce等人<sup>[11]</sup>报道了五羰基甲基锰( $\text{MnMe}(\text{CO})_5$ )与偶氮苯的反应,两原料经过在石油醚中回流,最终转化为红色固态锰杂五元环化合物**3**。该当量反应首次实现了偶氮苯的邻位C—H键活化反应,获得了环锰化合物(图2)。

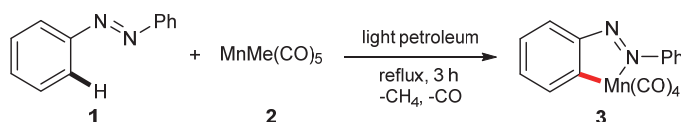


图2 首例锰杂五元环化合物的合成

2013年,本课题组<sup>[12]</sup>报道了第一例锰催化的末端炔烃参与的芳烃C—H键烯基化反应。该反应以五羰基溴化锰( $\text{MnBr}(\text{CO})_5$ )作催化剂,当含有多种取代基的反应物**4**与不同类型的芳基端炔或脂肪

端炔反应时, 均可以中等至优秀的产率获得邻位烯基化产物。该反应具有良好的官能团兼容性 & 底物适用性(图 3)。

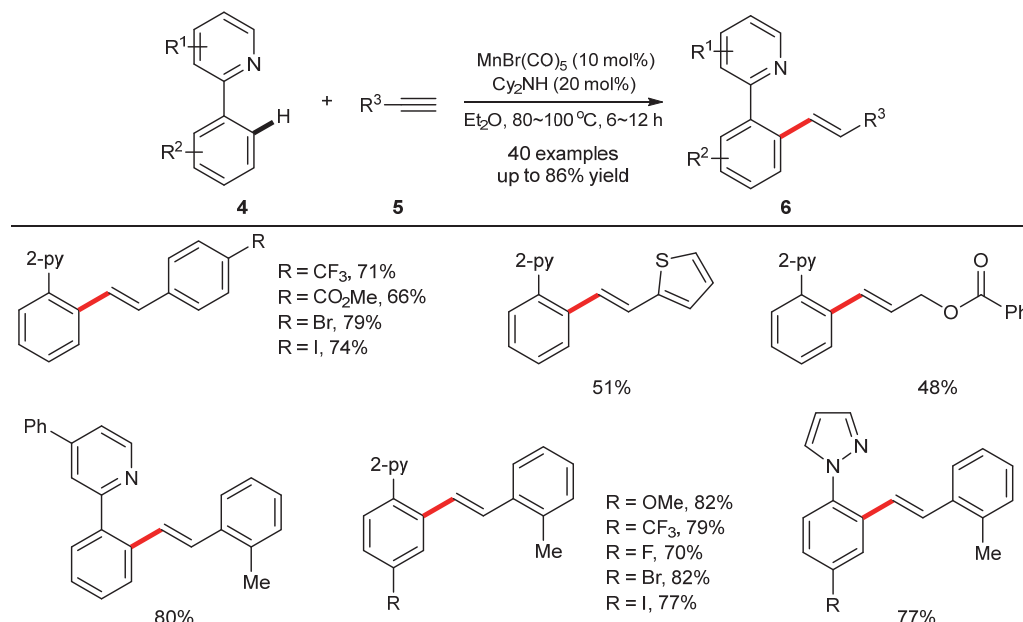


图 3 锰催化的芳基 C-H 键烯基化反应

2014 年, 本课题组<sup>[13]</sup>利用 *N*-H 亚胺为导向基团实现了锰催化的芳香亚胺化合物 **7** 与炔烃的 C-H 键活化以及[4+2]脱氢环化反应, 生成了一系列异喹啉衍生物 **9**。该反应体系简单, 反应过程中氢原子以氢气的形式释放, 具有良好的原子经济性(图 4)。

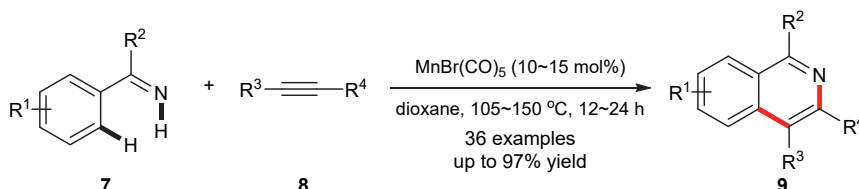


图 4 锰催化的亚胺与炔烃的脱氢环化反应

2016 年, 本课题组<sup>[14]</sup>报道了一种通过“面具策略”实现的锰催化的亚胺酸酯类化合物 **11** 与炔烃化合物发生的邻位烯基化反应, 一步得到邻烯基芳腈类衍生物。作者将腈类化合物 **10** 与醇反应转化相应的亚胺酸酯化合物 **11**, 即“戴上面具”; 随后在锰催化剂的作用下, 亚胺酸酯与炔烃发生邻位 C-H 键烯基化反应生成 **13**; 最后消除一分子醇, 脱除“面具”, 得到最终的邻烯基芳香腈类产物(图 5)。

2019 年, 本课题组<sup>[15]</sup>又完成了锰催化的芳腈化合物 **14** 与炔烃的邻位烯基化反应。苯基溴化镁(PhMgBr)是促进反应顺利进行所必不可少的添加剂。此外, 反应不仅具有较广泛的官能团耐受性, 还有着优秀的 *E*-式选择性(图 6)。

除了与 C≡C 叁键的加成反应之外, 锰催化的 C-H 键活化同样可以实现与 C=C 双键的官能化反应。2014 年, 本课题组<sup>[16]</sup>报道了锰-碱协同催化的 2-苯基吡啶与  $\alpha,\beta$ -不饱和羰基化合物的邻位烷基化反应。该反应以 MnBr(CO)<sub>5</sub> 作催化剂, 在催化量的弱碱二环己基胺(Cy<sub>2</sub>NH)存在的条件下, 成功实现了芳基邻位的 C-H 键烷基化反应, 得到产物 **17** (图 7)。

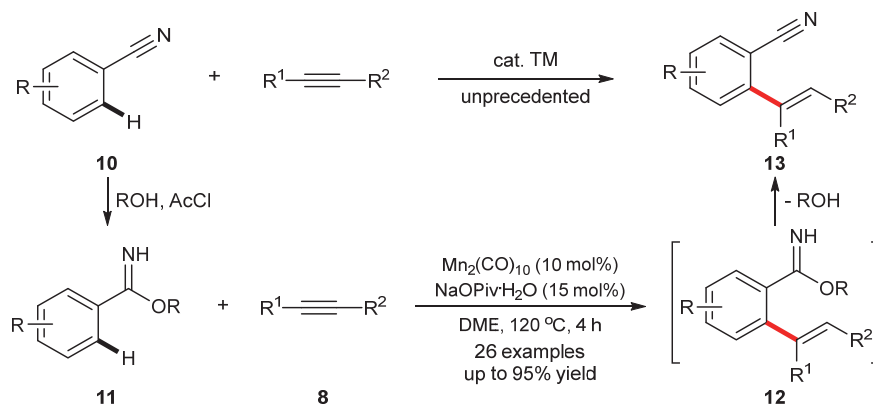


图5 锰催化的苯腈的邻位烯基化反应

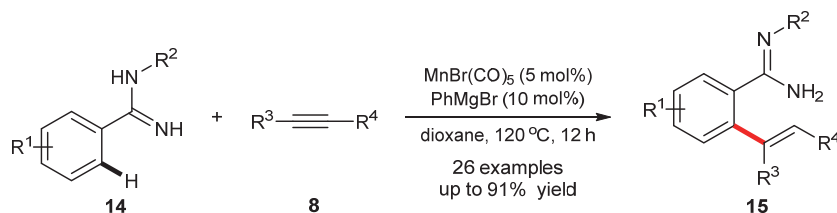
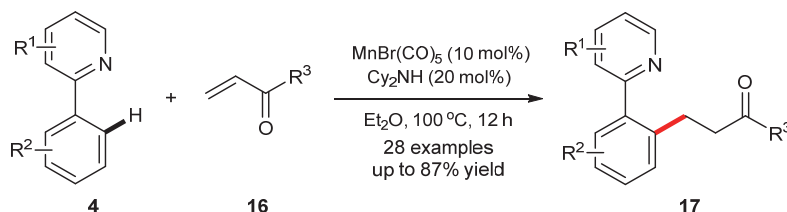


图6 锰催化的芳基肼与炔烃的邻位烯基化反应

图7 锰催化的苯基吡啶与 $\alpha,\beta$ -不饱和羰基化合物的反应

2018年,本课题组<sup>[17]</sup>采用独特的  $\text{MnBr}(\text{CO})_5$  与  $\text{Me}_2\text{Zn}$  体系,实现了苯乙酮衍生物 **18** 与惰性烯烃进行的反应。该反应中,酮羰基既作为弱配位的导向基团又作为氢受体,这种双重作用促使反应得以高效进行,最终成功实现苯乙酮的邻位 C—H 键活化反应,得到产物 **20** (图 8)。

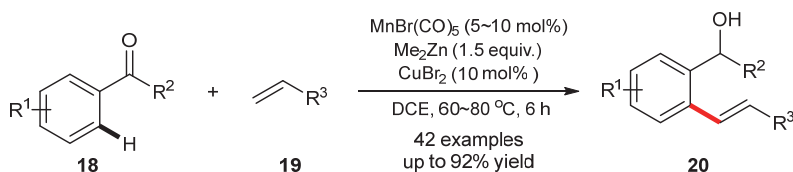


图8 锰催化的苯乙酮与惰性烯烃的反应

2019年,本课题组<sup>[18]</sup>又实现了锰催化的芳香酮的邻位 C—H 键烯丙基化反应。该反应具有单选择性、条件温和等特点。当烯丙基亲电试剂的  $\alpha,\beta,\gamma$ -位带有取代基时,反应均能以优异的  $\text{S}_{\text{N}}2'$  区域选择性生成邻位烯丙基化产物 **22** (图 9)。

含有  $\text{C}=\text{X}$  ( $\text{X}=\text{O}, \text{N}$ ) 不饱和键的化合物存在广泛,反应性能优良。2015年,本课题组<sup>[19]</sup>首次报道了锰催化的  $\text{C}_{\text{sp}^2}$ -H 键对醛及腈的亲核加成反应。2-苯基吡啶类芳香化合物的  $\text{C}_{\text{sp}^2}$ -H 键以及烯基吡啶的  $\text{C}_{\text{sp}^2}$ -H 键分别与醛或腈反应,水解后均能以良好的产率获得相应的醇 **26** 或酮 **27**。此外,该反应具有优异的底物普适性(图 10)。

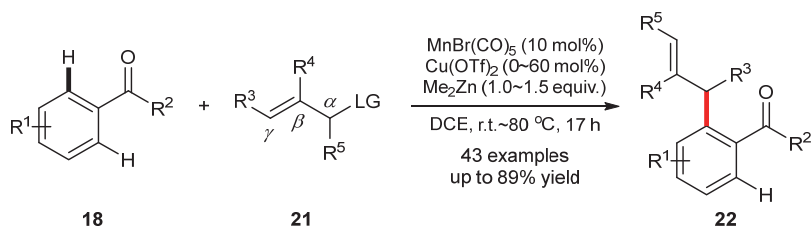
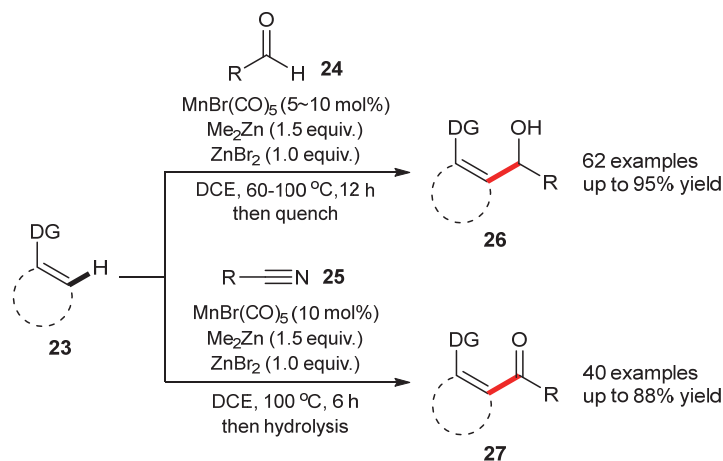
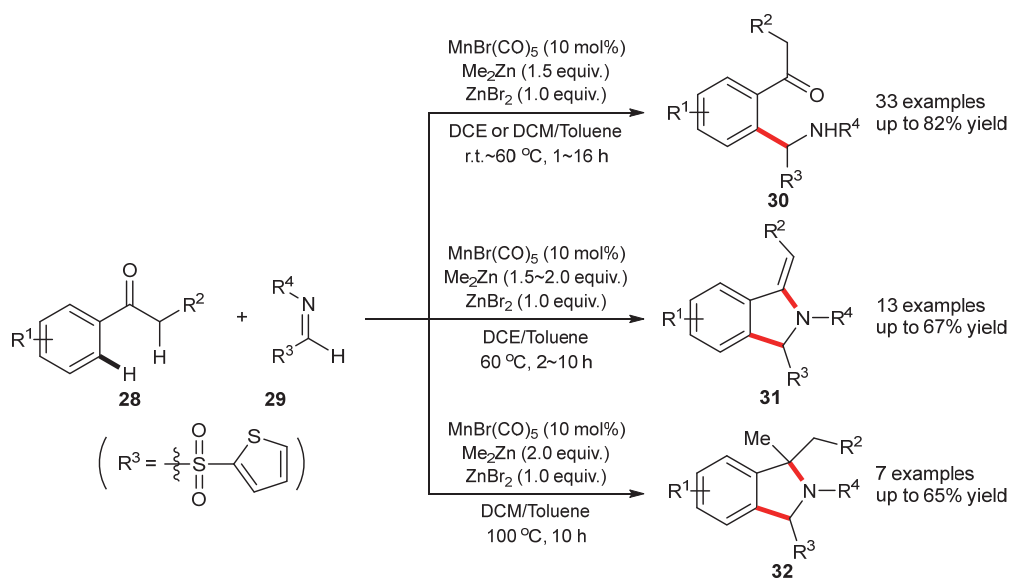


图9 锰催化的芳香酮邻位 C—H 键烯丙基化反应

图10 锰催化的  $sp^2$  碳氢键对醛/腈的亲核加成反应

2017 年,本课题组<sup>[20]</sup>报道了一例锰催化的芳香酮邻位 C—H 键与亚胺的加成反应。在该反应中,芳烃 C—H 键选择性地对 C=N 不饱和键进行加成反应,得到氢芳基化产物 **30**,而传统的 Mannich 反应则被完全抑制。升高反应温度时,则发生酮与亚胺的[3 + 2]环化,得到具有环外双键的异吲哚啉结构 **31**。继续微调反应条件,还可以实现酮、亚胺和甲基锌的新型三组分环化反应,得到含有季碳中心的异吲哚啉产物 **32** (图 11)。

图11 锰催化的芳香酮惰性  $C_{sp^2}$ -H 键与亚胺的加成反应

### 3.2 羰基锰催化在硅氢化反应方面的应用

1982 年, Yates 课题组<sup>[21]</sup>首次报道了在波长为 350 nm 的紫外光照射下  $\text{Mn}_2(\text{CO})_{10}$  催化的丙酮的硅氢化反应, 得到硅氧烷类化合物 **35**, 如图 12 所示。该反应体系中, 锰催化剂的用量仅为 0.0071 mol%。虽然反应的产率相对较低, 仅为 5% 左右, 但该反应为锰催化的硅氢化反应奠定了基础。

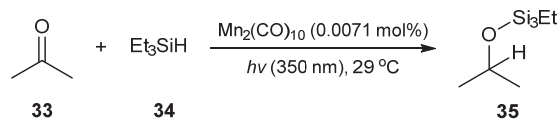


图 12 锰催化的丙酮与三乙基硅烷的反应

2018 年, 本课题组<sup>[22]</sup>报道了一例锰催化的硅烷对炔烃的加成反应, 以高区域选择性和高立体选择性的方式构建了一系列烯基硅烷类化合物。其中, 生成 *E*-式产物 **37** 的反应机制主要经历了包含 Mn-Si 中间体在内的金属有机过程; 而 *Z*-式产物 **38** 的形成主要是通过锰自由基及 Mn-H 中间体而构建的自由基机制完成的。此外, 该反应具有良好的官能团容忍性(图 13)。

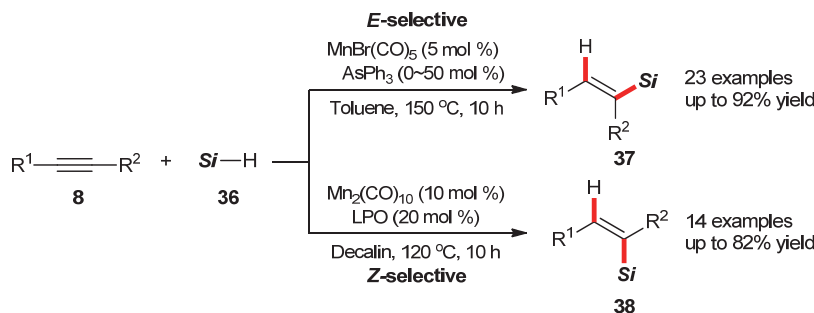


图 13 锰催化的硅烷与炔烃的选择性加成反应

随后, 本课题组<sup>[23]</sup>进一步实现了锰催化的烯烃与硅烷的反应, 可以选择性地得到硅氢化产物 **40** 和脱氢偶联产物 **41**。当以  $\text{MnBr}(\text{CO})_5$  作催化剂时, 主要发生硅烷对  $\text{C}=\text{C}$  双键的加成反应, 得到硅烷类化合物, 其中产物 **40** 产率高达 95%; 当使用  $\text{Mn}_2(\text{CO})_{10}$  作催化剂时, 则主要发生脱氢偶联反应, 得到烯基硅烷类化合物, 而产物 **41** 的产率最高可达 78% (图 14)。

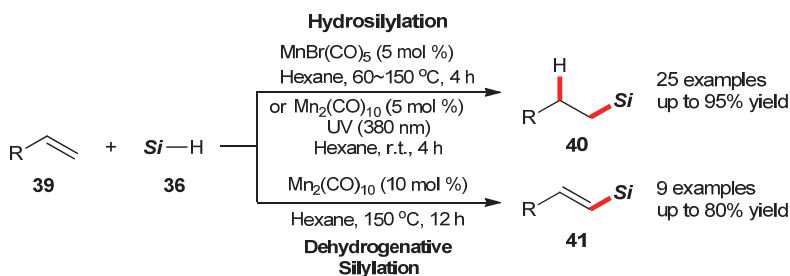


图 14 锰催化烯烃与硅烷的反应

### 3.3 其他锰催化的有机合成反应

2014 年, 本课题组<sup>[24]</sup>发展了一例锰催化的亚胺/腈、格氏试剂和四氢呋喃的三组分反应, 分别采用  $\text{Mn}(\text{TMHD})_3$  和  $\text{MnCl}_2$  作催化剂, 在较温和的反应条件下, 最终得到相应的 1,5-氨基醇化合物 **44** 和 1,5-酮醇化合物 **45**。在锰催化剂、格氏试剂及碘代芳烃存在的条件下, THF 经自由基途径发生  $\alpha$ -锰化, 成为卡宾等价物, 既可以与亲核的格氏试剂反应, 又可以与亲电的亚胺及腈发生偶联反应(图 15)。

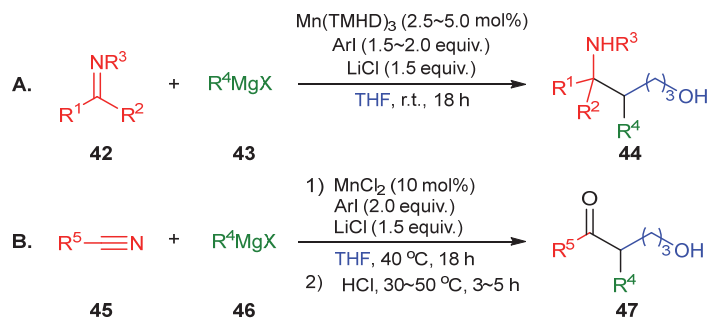


图 15 锰催化亚胺/腈、格氏试剂和四氢呋喃的三组分反应

## 4 结语

自然界中光合作用选择了锰元素作为其关键的产氧中心构建单元，为地球生物利用太阳光获取能量和物质来源发挥了重要作用。人工合成的锰化合物众多，具有复杂的价态和独特的电子构型，这使其在化学、材料、生物等多个领域都具有潜在的应用价值。自 18 世纪末期锰元素被分离出来以后，有关锰化合物的基础研究和其在合成化学及相关领域中的应用一直备受关注。随着人们对锰化学研究的不断深入，锰元素将在更广泛的领域展现广阔的应用前景，为人类社会的可持续发展发挥更重要的作用。

## 参 考 文 献

- [1] Emsley, J. *Nat. Chem.* **2014**, 6 (11), 1026.
- [2] 北京师范大学, 华中师范大学, 南京师范大学无机化学教研室. 无机化学. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 392.
- [3] 张泗文. 金属锰的生产. 四川化工, **1989**, No. 1, 57.
- [4] Xin, B.; Jiang, W.; Li, X.; Zhang, K.; Liu, C.; Wang, R.; Wang, Y. *Bioresour. Technol.* **2012**, 112, 186.
- [5] Ma, H.; Li, C.; Su, Y.; Chen, J. *J. Mater. Chem.* **2007**, 17, 684.
- [6] Cheng, F.; Chen, J.; Gou, X.; Shen, P. *Adv. Mater.* **2005**, 17, 2753.
- [7] Zhang, K.; Han, X.; Hu, Z.; Zhang, X.; Tao, Z.; Chen, J. *Chem. Soc. Rev.* **2015**, 44, 699.
- [8] Chou, S.; Cheng, F.; Chen, J. *J. Power Sources* **2006**, 162, 727.
- [9] Wang, Y.; Shi, Y.; Zhao, C. X.; Wong, J. I.; Sun, X. W.; Yang, H. Y. *Nanotechnology* **2014**, 25, 094010.
- [10] El-Kady, M. F.; Ihms, M.; Li, M.; Hwang, J. Y.; Mousavi, M. F.; Chaney, L.; Lech, A. T.; Kaner, R. B. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2015**, 112, 4233.
- [11] Bruce, M.; Iqbal, M.; Stone, F. J. *Chem. Soc. A* **1970**, 3204.
- [12] Zhou, B.; Chen, H.; Wang, C. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, 135 (4), 1264.
- [13] He, R.; Huang, Z. T.; Zheng, Q. Y.; Wang, C. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, 53, 4950.
- [14] Yang, X.; Jin, X.; Wang, C. *Adv. Synth. Catal.* **2016**, 358, 2436.
- [15] Jia, T.; Wang, C. *ChemCatChem* **2019**, 11, 1.
- [16] Zhou, B.; Ma, P.; Chen, H.; Wang, C. *Chem. Commun.* **2014**, 50, 14558.
- [17] Hu, Y.; Zhou, B.; Chen, H.; Wang, C. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, 57, 12071.
- [18] Ali, S.; Huo, J.; Wang, C. *Org. Lett.* **2019**, in press. DOI: 10.1021/acs.orglett.9b02554
- [19] Zhou, B.; Hu, Y.; Wang, C. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, 54, 13659.
- [20] Zhou, B.; Hu, Y.; Liu, T.; Wang, C. *Nat. Commun.* **2017**, 8 (1), 1169.
- [21] Yates, R. L. *J. Catal.* **1982**, 78, 111.
- [22] Yang, X.; Wang, C. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, 57, 923.
- [23] Yang, X.; Wang, C. *Chin. J. Chem.* **2018**, 36, 1047.
- [24] He, R.; Jin, X.; Chen, H.; Wang, C. *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, 136, 6558.

## 【作者简介】

王从洋, 2000 年本科毕业于南京大学, 2005 年博士毕业于北京大学, 随后在北京大学从事博士后研究工作, 获第三十八届中国博士后科学基金一等资助。2007 年在德国明斯特大学从事博士后研究工作, 获洪堡奖学金资助。2010 年入选中科院化学所“引进国外杰出青年人才计划”, 任研究员, 博士生导师, 课题组长。2015 年任中国科学院大学岗位



教授。2011 年获德国洪堡基金会仪器支持基金；2013 年获国家自然科学基金委员会“优秀青年基金”支持；2015 年获德国 Thieme Chemistry Journals Award 和 Asian Core Program Lectureship Awards。2017 年任《中国化学快报》(Elsevier)副主编和《中国化学》(Wiley-VCH) Rising Stars 编委；2019 年任 *Green Synthesis & Catalysis* (Elsevier)副主编，获第五届中国均相催化青年奖和第十届中国化学会-巴斯夫青年知识创新奖。2019 年成为中国化学会“青年化学家元素周期表”锰元素代言人。

### 欢迎订阅《大学化学》

《大学化学》是由教育部主管，北京大学和中国化学会共同主办的教育研究性学术刊物。以促进深化大学化学教育改革为宗旨，为提高我国化学教学水平服务。读者对象为高等学校化学教师、研究生、本科生，中学化学教师，对化学有浓厚兴趣的中学生，以及化学教育领域的各级管理人员和其他岗位上的化学工作者。主要栏目有：今日化学、教学研究与改革、知识介绍、化学实验、师生笔谈、自学之友、大学化学先修课程、竞赛园地、未来化学家、科普、国外化学教育、化学史以及专题讨论等。

《大学化学》现为月刊，大 16 开本，亚光铜版纸印刷。2020 年每本定价 20.00 元，全年出版 12 期，共 240.00 元。全国各地邮局均可订阅，邮发代号：82-314。为方便读者订阅，本刊编辑部全年办理邮购业务。

地址：北京大学化学学院《大学化学》编辑部；邮编：100871  
邮箱：dxhx@pku.edu.cn；网址：http://www.dxhx.pku.edu.cn  
电话：+86-10-62751721

《大学化学》编辑部

### 欢迎订阅《物理化学学报》

2020 年全国报刊杂志征订工作已经开始，敬请向贵单位推荐订阅 2020 年《物理化学学报》。

《物理化学学报》是由中国科学技术协会主管，中国化学会和北京大学共同主办，北京大学化学与分子工程学院学报编辑部编辑出版的学术刊物。设有“亮点”“当期推荐”“通讯”“展望”“专论”“综述”“论文”“人物专访”等栏目，报导物理化学学科及交叉学科的基础研究及应用研究的创新成果。

中国科学院院士唐有祺先生担任名誉主编，中国科学院院士刘忠范先生担任主编；编委会中有 14 位两院院士，2 位美国科学院院士，1 位加拿大科学院院士，10 位海外学者。2004 年，获得国内期刊界最高奖——第三届全国期刊奖百种重点期刊奖；2015 年入选国家新闻出版广电总局“百强报刊”。中国科协精品科技期刊工程项目资助出版。读者普遍认为《物理化学学报》具有极高的学术价值和收藏价值。WoS 公布的 2018 年影响因子为 1.05。

《物理化学学报》已被美国《科学引文索引》(SCI)网络版、美国《化学文献》(CA)、日本《科技文献速报》、俄罗斯《文献杂志》(AJ)、中国科协和国家自然科学基金委主办的《中国学术期刊文摘》、中国科学技术部万方数据网络中心的《中国科技论文与引文数据库》(CSTPCD)、中国科学院文献情报中心的《中国科学引文数据库》、中国生物学文献数据中心的《中国生物文摘》等国内外多种著名检索刊物和文献数据库摘引和收录。

《物理化学学报》现为月刊，大 16 开本，亚光铜版纸印刷。2020 年订价 50.00 元/册，全年订价 600.00 元。国内邮发代号 82-163，欢迎国内读者到当地邮局订阅，国外读者可通过中国国际图书贸易总公司订阅(Code No 1443-MO)。若通过邮局订阅有困难或错过订阅，请直接与编辑部联系。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆订阅。

地址：北京大学化学学院《物理化学学报》编辑部；邮编：100871  
邮箱：whxb@pku.edu.cn；网址：http://www.whxb.pku.edu.cn  
电话：+86-10-62751724

《物理化学学报》编辑部