

水相有机反应研究新进展

周 翌 段建凤 穆小静 肖尚友*

(重庆大学化学化工学院 重庆 401331)

摘要 近年来, 以水作为溶剂的有机合成已成为一个研究热点. 随着越来越多水相反应催化剂的发现, 不断有相关的水相有机反应被报道. 综述了近五年水相有机反应的最新进展.

关键词 水相; 有机反应; 有机合成; 绿色化学

Progress of the Organic Reactions in Aqueous Medium

Zhou, Zhao Duan, Jianfeng Mu, Xiaojing Xiao, Shangyou*

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 4001331)

Abstract In recent years, organic synthesis in aqueous medium has become an important issues. With the discovery of effective catalysts, more and more organic reactions carried out in aqueous medium have been reported. The recent advance in organic reactions in aqueous medium is reviewed.

Keywords aqueous medium; organic reaction; organic synthesis; green chemistry

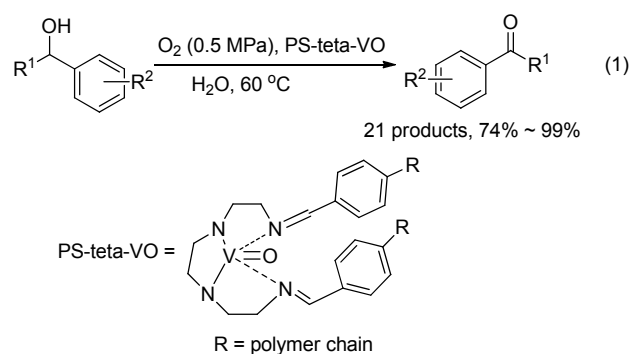
在有机合成中, 大量易燃、易爆、易挥发的有机溶剂的使用给环境带来了巨大的危害, 因此, 如何减少有机溶剂的使用或者寻找有机溶剂的替代品成为有机合成的主要课题. 基于此, 离子液体、超临界流体、水等介质先后被应用于有机合成, 展现出很好的前景.

与传统溶剂相比, 水作为有机反应溶剂具有独特的优势. 首先, 水具有安全、廉价、无毒、无污染等特点, 契合现代绿色化学的理念; 其次, 由于水自身能电离出 H^+ 与 OH^- , 对一些有机溶剂具有酸碱催化作用; 最后, 由于大量有机物在水中的溶解度较小, 当反应本身冷却到室温时, 反应产物可析出或分层, 后处理过程极为简便. 因此, 自 1882 年在水中成功合成靛蓝后, 水作为有机反应溶剂的研究逐渐增多.

近年已有多篇相关综述发表, 如刘慧强^[1]、王玉炉^[2]、杨军^[3]及 Anuj^[4]等对水相有机反应进行了全面总结. 但是, 近几年又有一些新的研究成果相继报道, 因此, 针对近 5 年的最新研究成果, 我们综述了水相有机反应的最新进展.

1 氧化反应

在水中的氧化反应之前也有相关报道, 其中 Islam 等^[5]以聚合物固载的氧钒为催化剂, 在 0.5 MPa 氧气条件下, 在水中氧化伯醇和仲醇类化合物(Eq. 1). 取得了 74%~99% 的收率, 且催化剂经过 5 次重复使用后, 仍然保持了良好的催化活性. 但是, 氧化剂压力过高, 对设备有很高的要求, 增加生产成本, 不利于工业化应用.



Arora 等^[6]以脂肪酶为催化剂, 研究了苯甲醛的

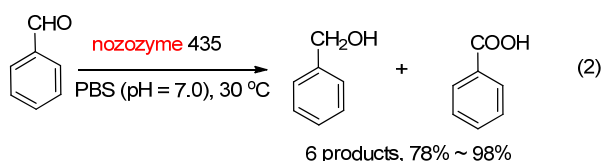
* Corresponding author. E-mail: xsy6508@163.com

Received September 8, 2017; revised October 20, 2017; published online November 3, 2017.

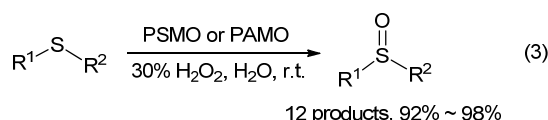
Project supported by the Foundation of Chongqing Science and Technology Commission for Generic Technology in the Key Industry (No. cstc2016zdcy-ztxx10001).

重庆市科委重点产业共性关键技术创新专项(No. cstc2016zdcy-ztxx10001)资助项目.

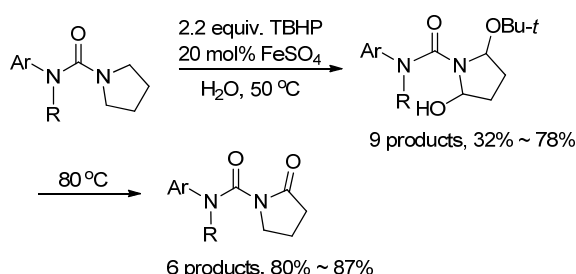
Canizzaro 反应(Eq. 2), 反应可在 pH=7 的磷酸盐缓冲液中进行. 不过以酶为催化剂, 体系温度及 pH 需严格控制, 且酶的活性易丧失, 无法重复使用.



Boruah 等^[7]以聚合物固载的金属 PSMO [PSMO=Mo(O₂)₂-(sulfonate) poly(sodium vinyl sulfonate)] 或 PAMO [PAMO=Mo₂O₂-(O₂)₄(carboxylate) poly(sodium acrylate)] 为催化剂, H₂O₂ 为氧化剂, 水为溶剂, 室温下将有机硫化物选择性氧化为亚砷(Eq. 3), 取得了良好的收率. 催化剂经过 10 次重复使用, 对收率几乎没有影响.



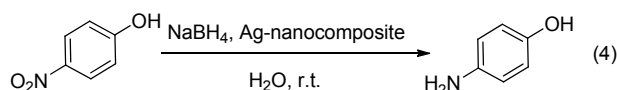
丁宏谦等^[8]在水中以叔丁基过氧化氢(TBHP)为氧化剂, FeSO₄ 为催化剂, 芳基脲类化合物邻近 N 原子的 C—H 键分别被氧化为羟基与叔丁羟基(Scheme 1), 收率为 32%~78%, 当温度上升到 80 °C 时, 被氧化为羰基. 该体系以不同温度来控制氧化程度, 首次实现了脂肪脲类催化活化.



图式 1 芳基脲类化合物的氧化
Scheme 1 Oxidation of aryl ureas

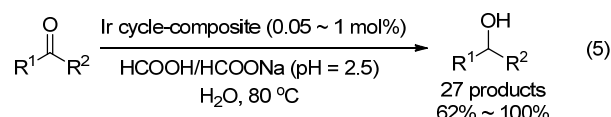
2 还原反应

Maryami 等^[9]以银离子纳米复合物为催化剂, 在水中还原对硝基苯酚(Eq. 4). 转化率达 100%. 该催化剂制备简单、环保, 经多次使用, 催化活性未明显减弱.



魏雅雯等^[10]以碳氮环化铱为催化剂, 在 pH=2.5 的 HOAc-NaOAc 缓冲溶液中还原醛和酮类化合物(Eq. 5), 取得了很好的效果. 研究发现溶液 pH 值对此反应有明

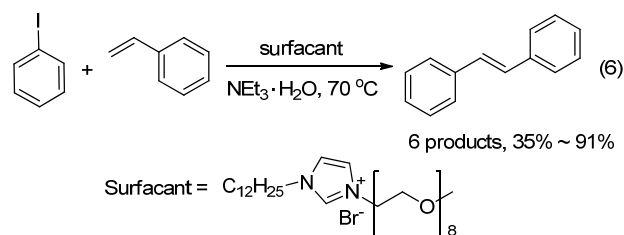
显影响.



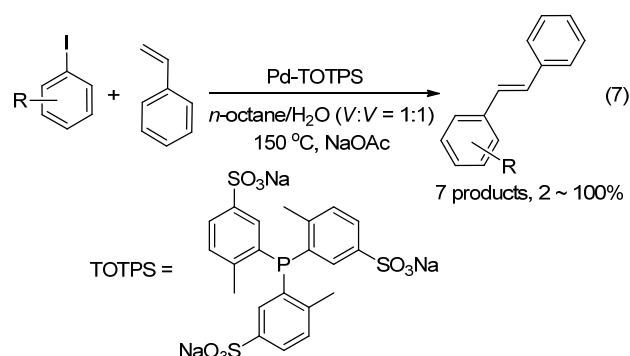
3 偶联反应

3.1 Heck 偶联反应

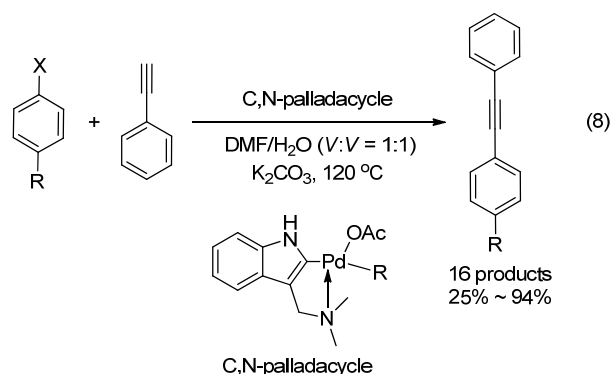
Taira 等^[11]在水中加入表面活性剂, 形成胶束, 并以醋酸铅为催化剂, 研究了碘苯与苯乙烯的 Mizorokie Heck 反应(Eq. 6), 收率达 91%.



Jagtap 等^[12]首次在水-正己烷双相体系中, 以一种钯离子复合物为催化剂, 吗啉为碱, 研究了 Heck 反应(Eq. 7). 研究发现催化剂可以回收使用, 且对于收率没有明显影响.

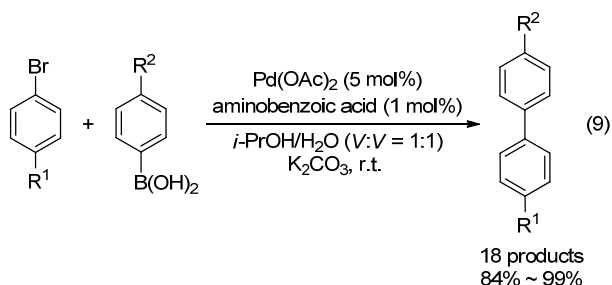


Karami 等^[13]以含氮杂环的钯络合物为催化剂, 在水与 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)的混合溶剂中研究了芳基卤素与苯乙炔的 Sonogashira 偶合反应(Eq. 8), 所需催化剂含量低至 0.1%, 收率达 25%~94%.

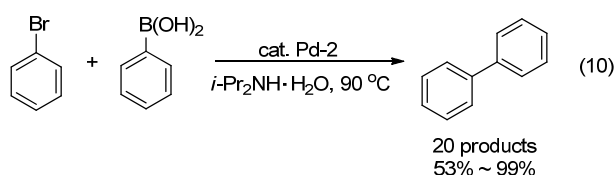


3.2 Suzuki 偶联反应

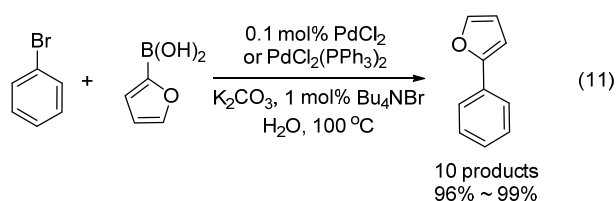
Sarmah 等^[14]首次用氨基苯甲酸促进水相中钯催化的 Suzuki-Miyaura 反应(Eq. 9), 取得了 84%~99% 的收率. 与之前使用的含有磷、氮元素配体的钯复合物相比, 反应更加简单.



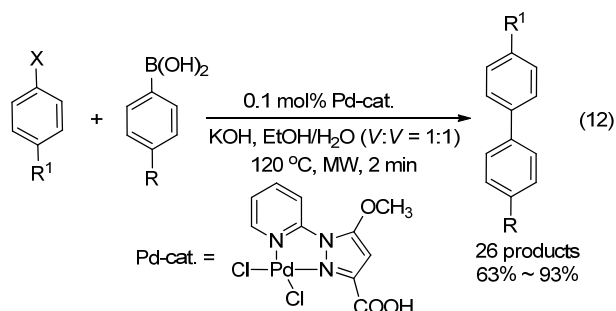
杨帆等^[15]首次在水中以一种铅-氧化铅纳米粒(cat. Pd-2: 由碳纳米管固定的铅-氧化铅纳米材料)作为非均相催化剂, 进行 Suzuki 反应(Eq. 10). 发现此催化剂可有效促进反应进行. 与以前所使用的铅类均相催化剂相比, 这种非均相催化剂更易于分离并重复使用, 使用 10 次后, 催化活性无明显减弱.



Bumagin 等^[16]以三苯基膦钯类化合物为催化剂, 首次研究了以杂环基团为底物的 Suzuki 反应(Eq. 11), 反应时间缩短至 10 min, 降低了催化剂用量, 取得了 94%~99% 的收率.

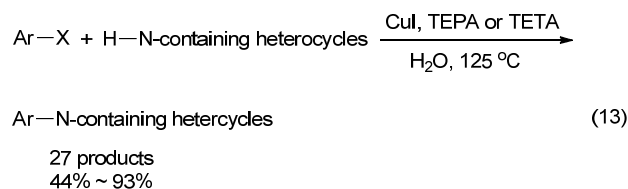


申利群等^[17]以一种新型催化剂催化 Suzuki 反应(Eq. 12). 在微波辅助下, 在乙醇与水的混合溶液进行反应,



反应时间缩短至 2 min, 催化剂循环 5 次后, 转化率降至 25%.

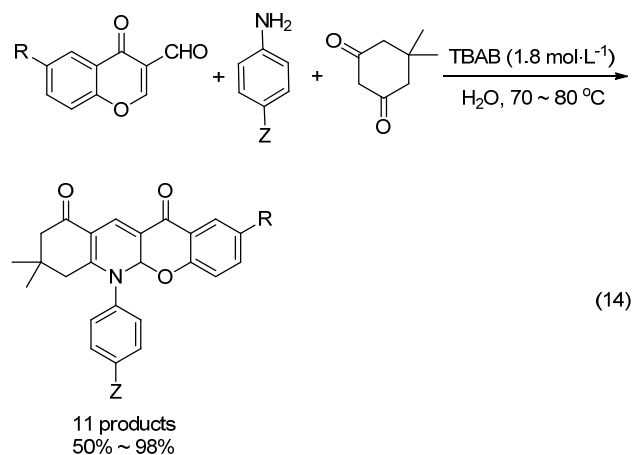
杨启超等^[18]以三乙烯四胺(TETA)与四乙烯五胺(TEPA)为有机碱, 以碘化铜为催化剂, 水为溶剂, 研究了碘(溴)芳基化合物与环状胺类化合物的乌尔曼偶合反应(Eq. 13), 获得了 44%~93% 的收率.



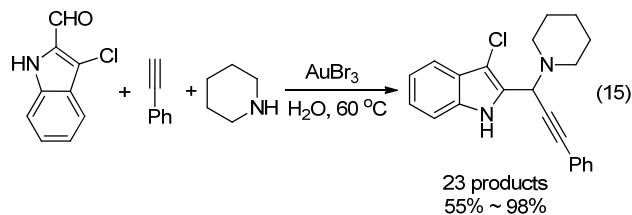
4 缩合反应

4.1 Mannich 缩合反应

Ghosh 等^[19]在含四丁基溴化铵(TBAB)胶束的水溶液中, 成功实现了 3-甲醛色酮与取代苯胺及 5,5-二甲基-1,3-二酮合成喹啉二酮并色酮类生物的反应(Eq. 14), 取得了 50%~98% 的收率, 此胶束体系可以重复使用 7 次. 与文献报道的离子液体与有机溶剂中的反应相比, 反应时间更短, 后处理更加简便.

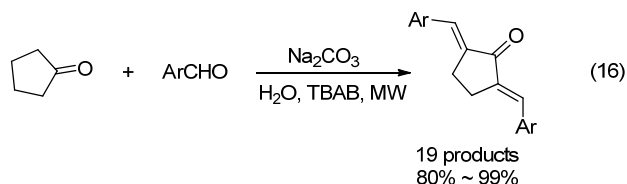


Srinivas 等^[20]以溴化金为催化剂, 在水中以醛基取代的吲哚、末端炔烃以及仲胺为底物, 顺利合成了吲哚取代的炔丙基胺(Eq. 15), 收率达 55%~98%. 这是含有吲哚基炔丙基胺的水相合成的首次报道.

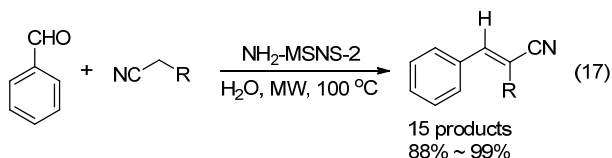


4.2 Knoevenagel 缩合反应

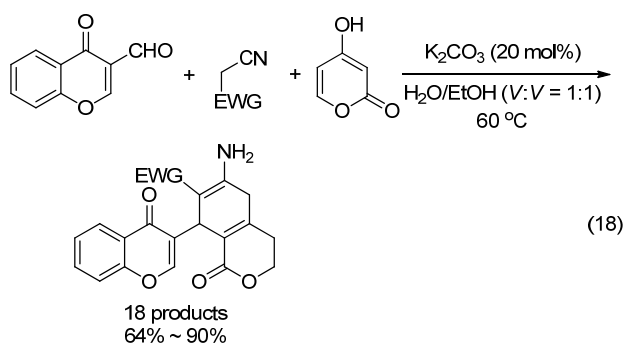
周建峰等^[21]在碳酸钠水溶液中以四丁基溴化铵(TBAB)为相转移催化剂,以环戊酮或环己酮与芳醛为原料,在微波辐射下合成了 α,α' -双亚苄基环烷酮(Eq. 16), 收率高达 99%, 反应时间最短只需 0.5 min.



朱凤霞等^[22]以氨基修饰的介孔二氧化硅纳米粒($\text{NH}_2\text{-MSNS-2}$)作为催化剂,研究了微波辐射下水相中的 Knoevenagel 反应(Eq. 17), 反应时间只有 5 min, 收率达 88%~99%. 与均相碱性催化剂丙胺相比,该催化剂更易于回收,重复使用 8 次后,催化剂仍具有良好活性.



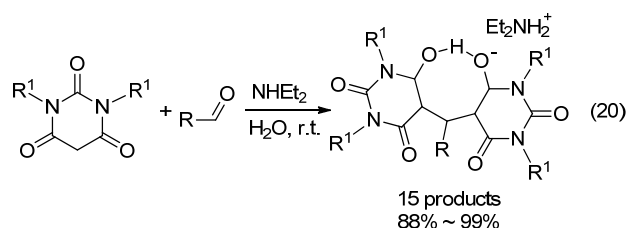
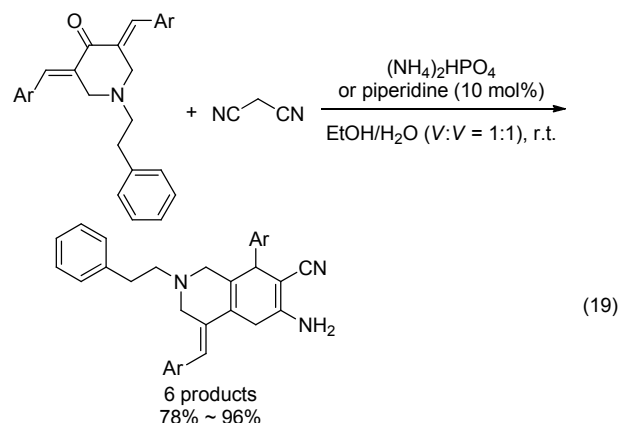
Bijanzadeh 等^[23]以碳酸钾为催化剂,在乙醇与水的混合溶剂中进行多组分反应,合成了多种官能团的杂环化合物,包括嘧啶、吡喃、吡喃酮、香豆素(Eq. 18). 取得了较好的收率,产物因此无需柱层析,后处理过程十分简单.



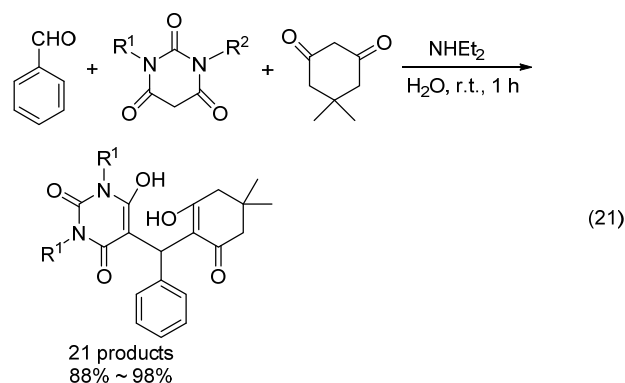
Balalaie 等^[24]在水与乙醇的混合液中合成了吡啶并吡喃酮类化合物(Eq. 19),在 10 mol%磷酸氢二铵或哌啶存在的条件下,收率达 78%~96%,原子利用率很高. 反应时间缩短至 4 h,且反应在室温进行,条件温和.

4.3 羟醛缩合反应

Al-Majid 等^[25]在水中合成了二嘧啶类化合物(Eq. 20). 该反应以二乙胺为碱,在室温下进行,条件温和,无需任何催化剂,反应时间显著缩短,收率为 88%~99%.

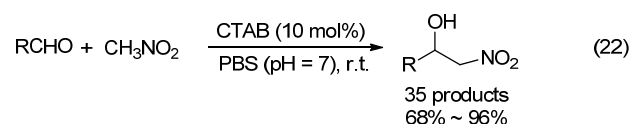


Barakat 等^[26]在水中以二乙胺为碱,合成了二甲酮巴比妥类衍生物(Eq. 21),取得了 88%~98%的收率,反应时间缩短为 1 h.

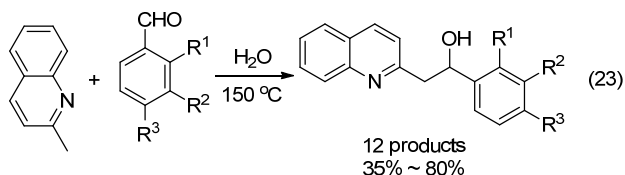


4.4 其它缩合反应

Bora 等^[27]在水中通过硝基甲烷与醛的反应来合成 β -羟基硝基化合物(Eq. 22). 当脂肪酸作底物时,需要使用十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)作为该反应的催化剂. 该反应立体选择性强,无副产物产生,收率 68%~96%.



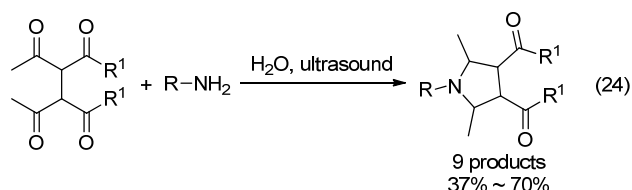
本课题组^[28]在高温水中无催化剂的条件下,以 2-甲基喹啉或 2-甲基吡啶与不同芳醛为原料,合成了烷基氮杂芳烃类衍生物(Eq. 23),后处理简单,收率较高.



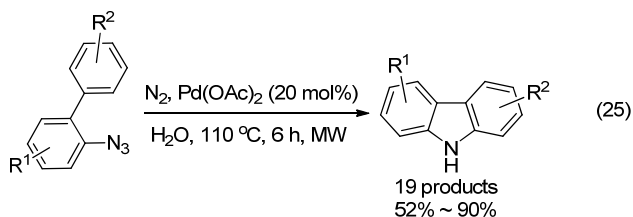
4.5 杂环化合物的合成

4.5.1 吡咯类化合物的合成

Queli 等^[29]在水中无催化剂条件下, 实现了吡咯类化合物的超声合成(Eq. 24). 与传统方法相比, 该反应收率提高到 70%, 反应时间缩短至 1 h, 更符合绿色化学要求.

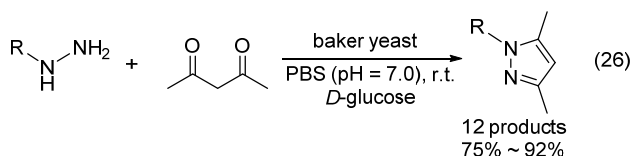


杨理政^[30]在水中以醋酸铅为催化剂, 在微波辅助条件下 110 °C 实现了芳香叠氮化合物分子内碳氢胺化(Eq. 25), 收率可达 90%, 与在有机溶剂中反应相比, 收率更高.



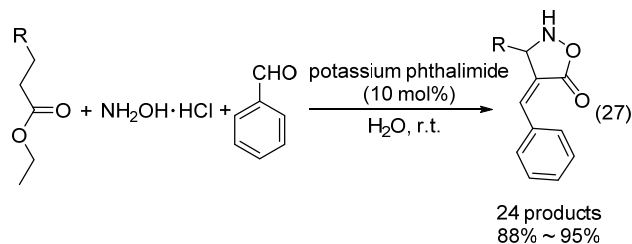
4.5.2 吡唑类化合物的合成

Mane 等^[31]在水中以生物催化剂(一种名为 *Saccharomyces cerevisiae* 的酵母)催化吡唑类化合物的合成(Eq. 26), 取得了 72%~90%的收率. 而使用催化剂, 如聚乙烯固载磺酸、硅片固载的硫酸、 Al_2O_3 及大孔树脂等, 不仅选择性低, 易产生酸性废物, 且价格昂贵. 而使用生物催化剂, 催化效率更高, 也更加环保.

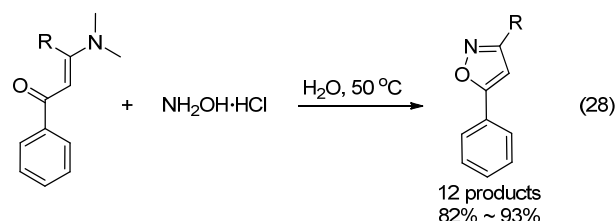


4.5.3 异噁唑类化合物的合成

Kiyani 等^[32]在水中以邻苯二甲酰亚胺钾盐为催化剂, 取代丙酸乙酯、盐酸羟胺及苯甲醛为原料, 合成了异噁唑(Eq. 27), 最高收率达 95%. 该反应中催化剂可回收并重复使用, 收率无明显下降.

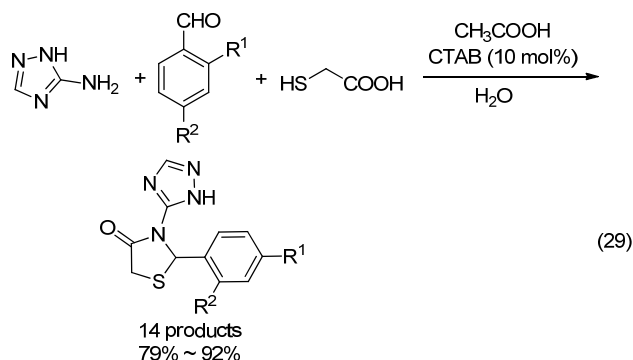


窦国兰等^[33]在水中合成了 5-苯基异噁唑类衍生物(Eq. 28). 未使用任何催化剂, 后处理简单, 收率达 82%~93%.



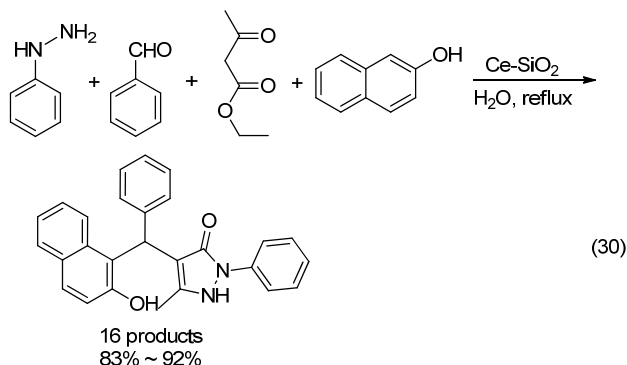
4.5.4 噻唑烷酮类化合物的合成

Singh 等^[34]首次在十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)的胶束溶液中, 以醋酸为有机催化剂, 通过 1,2,4-三唑-5-氨基、芳基甲醛及巯基乙酸的反应合成了三唑噻唑烷酮类化合物(Eq. 29), 取得了 79%~92%的收率.



4.5.5 吡唑酮类化合物的合成

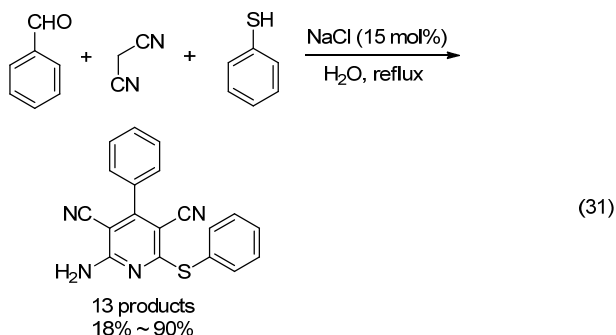
Akondi 等^[35]在水中以 Ce/SiO_2 复合物为催化剂, 合成了吡唑酮类化合物(Eq. 30), 收率为 83%~92%. 催化



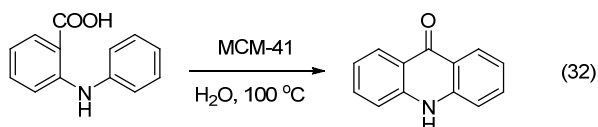
剂重复使用 5 次后, 活性无明显减弱, 与传统的对甲苯磺酸/碘化铜催化剂相比, Ce/SiO₂ 复合物催化剂活性更高, 反应时间更短, 反应条件更加温和。

4.5.6 吡啶类生物的合成

Gujar 等^[36]在水中以 NaCl 为催化剂, 合成了吡啶类衍生物(Eq. 31)。该反应体系体现出了盐效应对水相有机反应的促进作用, 收率最高可达 90%。与三乙胺、哌啶、氧化铝及镁-锌金属纳米粒子相比, NaCl 更加常见, 便宜、反应条件相对温和。

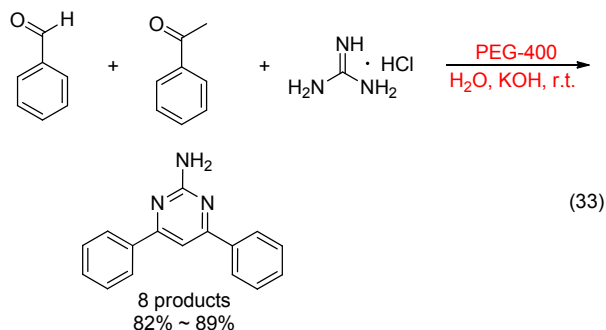


本课题组^[37]在水中以 MCM-41(一种新型的介孔材料)为催化剂, 在微波辅助条件下实现了 *N*-苯基邻氨基苯甲酸的分子内环合反应(Eq. 32), 反应时间缩短至 1 h, 收率最高达 80%。



4.5.7 嘧啶类化合物合成

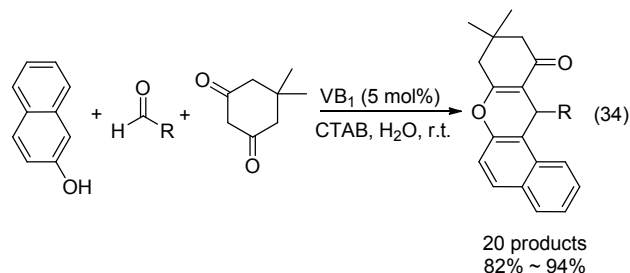
Jawale 等^[38]在 PEG-400(聚乙二醇-400)的水溶液中合成了氨基嘧啶类化合物(Eq. 33)。PEG 水溶液作为一种无毒无害的促进剂, 可以多次使用, 收率 82%~89%。



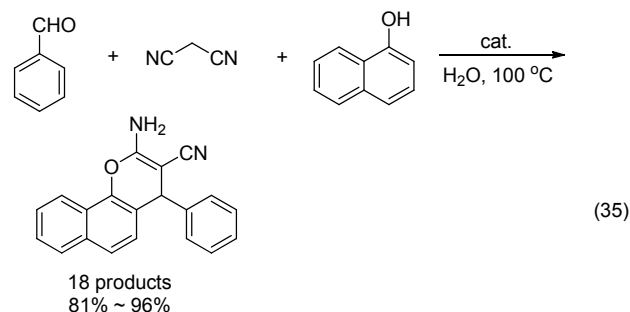
4.5.8 萘并吡喃类化合物的合成

Fatma 等^[39]首次在十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)与水的胶束溶液中加入 VB₁ 作为催化剂, 实现了萘酚、醛及 5,5-二甲基-1,3-环己二酮的反应, 合成了萘并氧杂

环酮类化合物(Eq. 34), 收率为 82%~94%。VB₁ 催化剂价格便宜, 且产物的后处理极为简单。

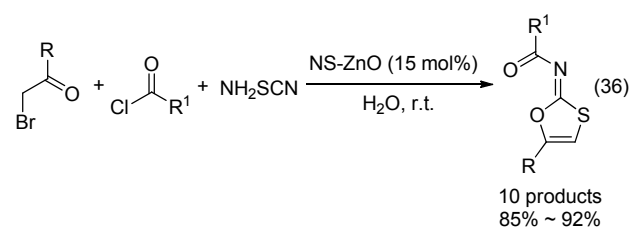


王英磊等^[40]以一种含有哌啶环的离子液体[PEG800-DPIL(Cl)]为催化剂, 以水为反应介质合成了苯并吡喃类化合物(Eq. 35), 收率为 81%~94%。此离子液体可以多次使用且催化活性无明显丧失。



4.5.9 硫氧杂环化合物的合成

Moradi 等^[41]在水中以氧化锌纳米粒(NS-ZnO)为催化剂合成了含硫氧的五元杂环化合物(Eq. 36)。催化剂的使用将收率提高到了 92%, 并且催化剂可以重复使用。

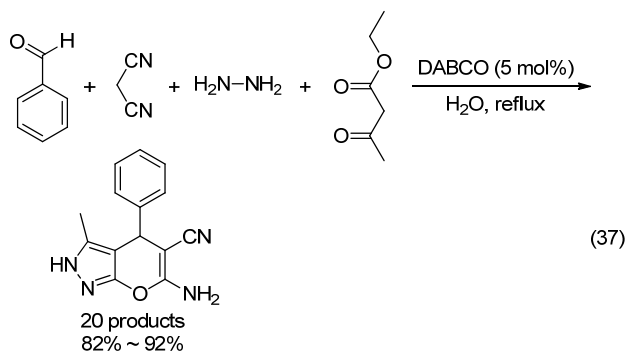


4.5.10 吡唑并吡喃酮类化合物的合成

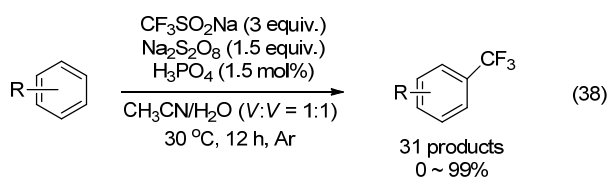
Waghmare 等^[42]以水为溶剂, 通过多组分反应合成了吡喃酮并吡唑类化合物(Eq. 37)。以 1,4-二氮杂二环[2.2.2]辛烷(DBACO)为催化剂, 可将反应时间缩短至 15 min。由于反应在水中进行, 使得后处理过程更为简便。

5 自由基反应

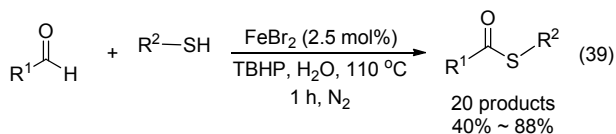
龚行等^[43]在水与乙腈的混合溶液中, 以三氟甲基亚磺酸钠为三氟甲基供体, 过硫酸钠为引发剂, 探索芳烃的三氟甲基化反应(三氟甲基自由基参与反应)



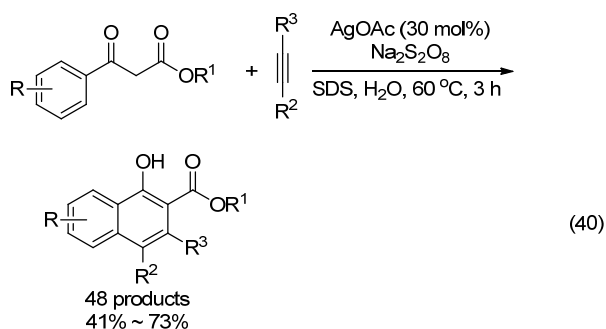
(Eq. 38). 收率最高达 99%, 此反应无需催化剂, 反应条件温和, 可以达到克级别, 反应收率无明显下降。



黄玉婷等^[44]在水中以溴化亚铁为催化剂, 以叔丁基过氧化氢为氧化剂, 以硫醇类化合物与醛类化合物为底物, 探索硫酯类化合物的合成(叔丁基过氧根自由基参与反应)(Eq. 39). 取得高达 88%收率, 对多数官能团都具有适应性。

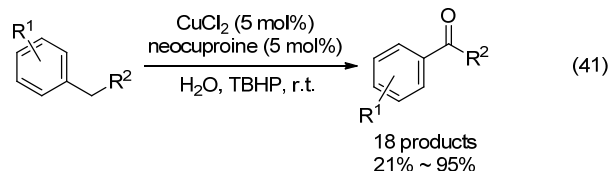


Naresh 等^[45]在水中以醋酸银为催化剂, 过硫酸钠为氧化剂, 十二烷基磺酸钠为表面活性剂, 以二酮酯与炔类化合物为底物, 探索多取代的 α -萘芬、联萘酚、蒽酚类化合物的合成(二酮酯自由基参与反应)(Eq. 40). 最高收率为 73%, 为酚类天然活性产物的合成开辟另外的途径。



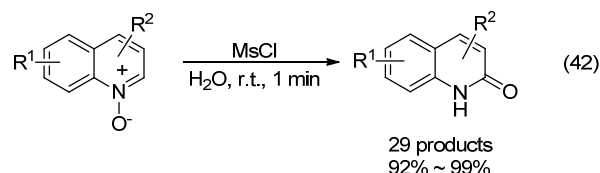
Hossain 等^[46]在水中以氯化亚铜为催化剂, 新亚铜

试剂(neocuproine)为助剂, 叔丁基过氧化氢为氧化剂, 室温条件下探索芳烃氧化为酮的反应(叔丁基过氧根自由基参与反应)(Eq. 41). 收率高达 95%, 产物易分离, 催化剂可以循环多次使用。

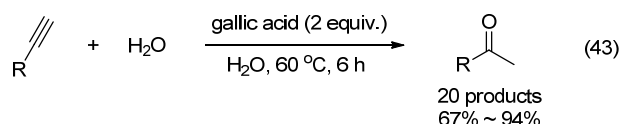


6 亲核反应

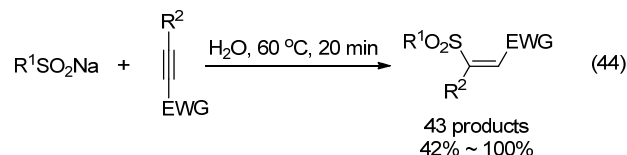
何卫民等^[47]在水中以甲磺酰氯为活化剂, 室温条件下以喹啉氮氧化物为底物, 探索 2-羰基喹啉的合成(Eq. 42). 不使用碱和催化剂, 反应时间最多 8 min, 无需柱层析分离纯化, 重结晶即可。



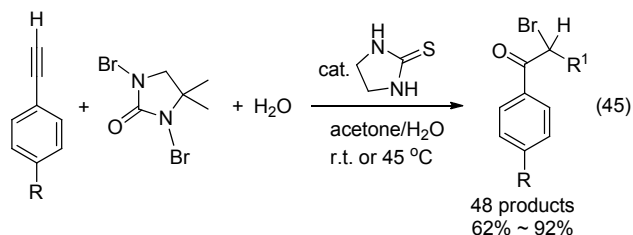
王成章等^[48]在水中以没食子酸为催化剂, 探索炔类化合物的水合作用, 合成甲酮类化合物(Eq. 43). 收率高达 94%, 此催化体系可以循环使用 5 次, 没有明显活性减少。



何卫民等^[49]在水中探索羰基炔类化合物的磺酰化反应(Eq. 44). 无任何催化剂、有毒溶剂的使用, 水既作为溶剂, 也作为促进剂来加速此反应进行, 反应时间只有 20 min.

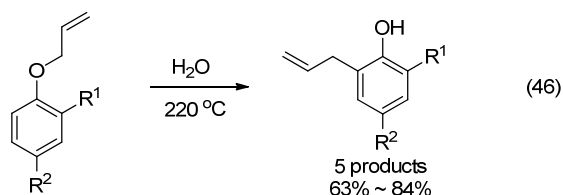


何卫民等^[50]在丙酮与水的混合溶剂中, 以 2-硫代咪唑烷酮为催化剂, 探索 α -单溴取代和 α,α' -二溴取代的酮类化合物, 通过温度与水的比例来控制单取代产物还是多取代产物的合成(Eq. 45). 没有使用任何添加剂, 金属催化剂, 氧化剂, 是一条绿色的反应路线。



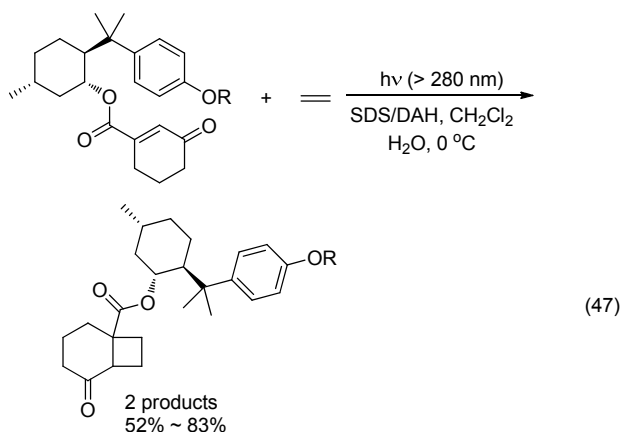
7 Claisen 重排反应

本课题组何毅等^[51]在近临界水中实现了烯丙基苯基醚的 Claisen 重排反应(Eq. 46). 该反应不需要催化剂, 反应完成后只需要过滤和重结晶, 即可获得目标产物.

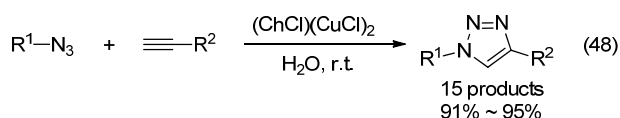


8 周环反应

Nishiyama 等^[52]以水为溶剂, 十二烷基磺酸钠(SDS)或十二烷基氯化铵(DAH)为表面活性剂, 二氯甲烷为助溶剂, 促进反应进行. 在光催化下, 成功地过环加成反应合成了目标产物(Eq. 47), 其中一种异构体收率达 99%, 立体选择性很好.



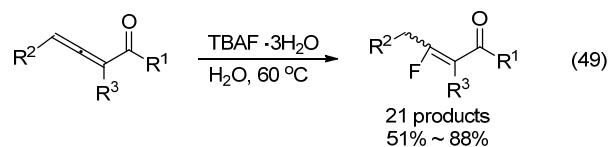
赵先亮等^[53]在水中, 以(CHCl)(CuCl)₂(氯化胆碱-氯化铜离子液体)为催化剂, 室温条件下以炔类化合物与叠氮类化合物环加成反应合成了 1,2,3-三唑类化合物(Eq. 48). 与单纯的 ChCl/CuCl 催化体系相比, 收率更高, 对底物的适用性更强.



9 其它反应

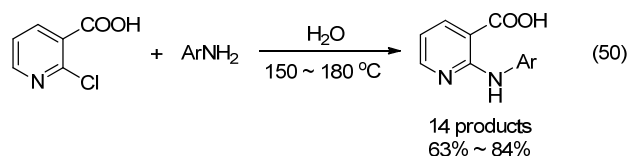
9.1 氟化反应

何艳等^[54]在水中实现了 1,2-二烯酮的氟化反应(Eq. 49). 以三水四丁基氟化铵(TBAF)为氟化试剂, 可选择性生成 β -氟化物, 收率高达 86%.



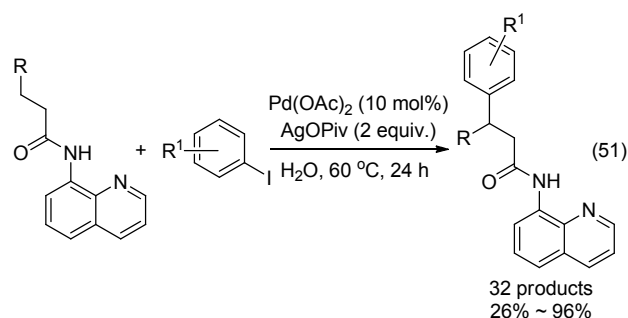
9.2 N-芳基化反应

本课题组李正华等^[55]在高温水中以 2-氯烟酸与苯胺合成了 2-苯胺基烟酸类化合物(Eq. 50). 反应以碳酸钠为碱, 未加入任何催化剂, 收率最高达 98%.



9.3 羰基 β 位 C-芳基化

罗飞华等^[56]在水中, 以醋酸银为催化剂, 特戊酸银为添加剂, 首次实现了以 8-氨基喹啉类化合物为底物的非活化羰基 β 位的 C(sp³)-H 芳基化反应(Eq. 51). 收率最高可达 96%, 该体系催化体系简单, 条件温和, 对大多数底物具有良好的适应性.



10 结语

近年来, 有关水相有机反应的研究不断见诸报道, 顺应了绿色化学的主题. 然而, 相对于有机溶剂中的反应, 已报道的水相有机反应少了很多, 应用于工业化生产的更少. 因此有必要进一步开展水相有机反应的基础研究, 揭示水相有机反应规律, 开发更多的水相有机反应催化剂, 为水相有机反应的工业化打下基础.

References

- [1] Liu, H.-Q.; Le, C.-G. *Chemistry* **2012**, 75, 702 (in Chinese).

- (刘慧强, 乐长高, 化学通报, **2012**, 75, 702.)
- [2] Wang, Y.-L.; Yang, Y.; Hu, H.-P.; Wang, J.-H. *Chemistry* **2013**, 76, 994 (in Chinese).
(王玉炉, 杨莹, 胡浩鹏, 王瑾晔, 化学通报, **2013**, 76, 994.)
- [3] Yang, J.; Fu, T.; Long, Y.; Zhou, X.-G. *Chin. J. Org. Chem.* **2017**, 37, 1111 (in Chinese).
(杨军, 付婷, 龙洋, 周向葛, 有机化学, **2017**, 37, 1111.)
- [4] Rath, A. K.; Gawande, M. B.; Zboril, R.; Varma, R. S. *Coord. Chem. Rev.* **2015**, 291, 68.
- [5] Islam, S. M.; Molla, R. A.; Roy, A. S.; Ghosh, K.; Salam, N.; Iqbal, M. A.; Tuhina, K. *J. Organomet. Chem.* **2014**, 761, 169.
- [6] Arora, B.; Pandey, P. S.; Gupta, M. N. *Tetrahedron Lett.* **2014**, 55, 3920.
- [7] Boruah, J. J.; Ahmed, K.; Das, S.; Gogoi, S. R.; Saikia, G.; Sharma, M.; Islam, N. S. *J. Mol. Catal. A: Chem.* **2016**, 425, 21.
- [8] Wei, Y.; Ding, H. Q.; Lin, S. X.; Lian, F. S. *Org. Lett.* **2011**, 13, 1674.
- [9] Maryami, M.; Nasrollahzadeh, M.; Mehdipour, E.; Sajadi, S. M. *Int. J. Hydrogen Energy* **2016**, 41, 21236.
- [10] Wei, Y. W.; Wu, X. F.; Wang, C.; Xiao, J. L. *Catal. Today* **2015**, 247, 104.
- [11] Taira, T.; Yanagimoto, T.; Sakai, K.; Sakai, H.; Endo, A.; Imura, T. *Tetrahedron* **2016**, 72, 4117.
- [12] Jagtap, S.; Deshpande, R. *Tetrahedron Lett.* **2013**, 54, 2733.
- [13] Karami, K.; Haghighat, N. N. *Turk. J. Chem.* **2015**, 39, 1199.
- [14] Sarmah, G.; Bora, U. *Tetrahedron Lett.* **2015**, 56, 2906.
- [15] Yang, F.; Chi, C.; Dong, S.; Wang, C.; Jia, X. L.; Ren, L.; Zhang, Y. H.; Zhang, L. Q.; Li, Y. F. *Catal. Today* **2015**, 256, 186.
- [16] Bumagin, N. A.; Veselov, I. S.; Belov, D. S. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2014**, 50, 19.
- [17] Shen, L. Q.; Huang, S. Y.; Nie, Y. M.; Lei, F. H. *Molecules* **2013**, 18, 1602.
- [18] Yang, Q. C.; Wang, Y. F.; Yang, L.; Zhang, M. J. *Tetrahedron* **2013**, 69, 6230.
- [19] Ghosh, J.; Biswas, P.; Sarkar, T.; Drew, M. G. B.; Bandyopadhyay, C. *Tetrahedron Lett.* **2014**, 55, 2924.
- [20] Srinivas, V.; Koketsu, M. *Tetrahedron* **2013**, 69, 8025.
- [21] Zhou, J.-F.; Zhu, H.-Q.; Xia, M.; Lu, H.-F.; Zhu, H.-F.; Tu, S.-J. *Chin. J. Org. Chem.* **2005**, 25, 583 (in Chinese).
(周建峰, 朱惠琴, 夏敏, 陆惠峰, 朱玉兰, 屠树江, 有机化学, **2005**, 25, 583.)
- [22] Zhu, F. X.; Sun, X. J.; Lou, F. W.; An, L. T.; Zhao, P. S. *Catal. Lett.* **2015**, 145, 1072.
- [23] Bijanzadeh, H. R.; Mehrparvar, S.; Balalaie, S. *J. Iran Chem. Soc.* **2015**, 12, 1859.
- [24] Balalaie, S.; Mehraza, R. M.; Haghighatnia, Y. *Green Chem. Lett. Rev.* **2013**, 6, 101.
- [25] Al-Majid, A. M.; Barakat, A.; Al-Najjal, H. J.; Mabkhot, Y. N.; Ghabbour, H. Z.; Fun, H. K. *Int. J. Mol. Sci.* **2013**, 14, 23762.
- [26] Barakat, A.; Al-Majid, A. M.; Al-Ghamdi, A. M.; Mabkhot, Y. N.; Siddiqui, M. R. N. H.; Ghabbour, H. A.; Fun, H. K. *Chem. Cent. J.* **2014**, 8, 1.
- [27] Bora, P. P.; Bez, G. *Eur. J. Org. Chem.* **2013**, 2922.
- [28] Xiao, S.-Y.; Bi, J.-F.; Mu, X.-J.; Zhou, Z.; Xu, G. *Chin. J. Org. Chem.* **2017**, 37, 2159 (in Chinese).
(肖尚友, 毕旌富, 穆小静, 周翌, 徐广, 有机化学, **2017**, 37, 2159.)
- [29] Queli, A. R. A. *Green Chem. Lett. Rev.* **2012**, 6, 129.
- [30] Yang, Z.-L. *M.S. Thesis*, Nanjing University, Nanjing, **2016** (in Chinese).
(杨理政, 硕士论文, 南京大学, 南京, **2016**.)
- [31] Mane, A.; Salokhe, P.; More, P.; Salunkhe, R. *J. Mol. Catal. B: Enzyme* **2015**, 121, 75.
- [32] Kiyani, H.; Ghorbani, F. *J. Saudi Chem. Soc.* **2017**, 21, 112.
- [33] Dou, G. L.; Xu, P.; Li, Q.; Xi, Y. K.; Huang, Z. B.; Shi, D. Q. *Molecules* **2013**, 18, 13645.
- [34] Singh, M.; Saquib, M.; Singh, S. B.; Singh, S.; Ankit, P.; Fatma S.; Singh, J. *Tetrahedron Lett.* **2014**, 55, 6175.
- [35] Akondi, A. M.; Kantam, M. L.; Trivedi, R.; Bharatam, J.; Vemulapalli, S. P. B.; Bhargava, S. K.; Buddana, S. K.; Prakasham, R. S. *J. Mol. Catal. A: Chem.* **2016**, 411, 325.
- [36] Gujar, J. B.; Chaudhari, M. A.; Kawade, D. S.; Shingare, M. S. *Tetrahedron Lett.* **2014**, 55, 6939.
- [37] Xiao, S. Y.; Xu, G.; Chen, G.; Mu, X. J.; Chen, Z. T.; Zhu, J.; He, Y. *Rev. Chem. Intermed.* **2015**, 41, 10125.
- [38] Jawale, D. V.; Pratap, U. R.; Bhosale, M. R.; Mane, R. A. *J. Heterocycl. Chem.* **2016**, 53, 1626.
- [39] Fatma, S.; Singh, P. K.; Anki, T. P.; Shireen; Singh, M.; Singh, J. *Tetrahedron Lett.* **2013**, 54, 6732.
- [40] Wang, Y. L.; Luo, J.; Xing, T. T.; Liu, Z. L. *Monatsh. Chem.* **2013**, 144, 1871.
- [41] Moradi, A. V. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2015**, 51, 834.
- [42] Waghmare, A. S.; Pandit, S. S. *J. Saudi Chem. Soc.* **2017**, 21, 286.
- [43] Wang, D.; Deng, G. J.; Chen, S.; Gong, H. *Green Chem.* **2016**, 18, 5967.
- [44] Huang, Y. T.; Lu, S. Y.; Yi, C. L.; Lee, C. F. *J. Org. Chem.* **2014**, 79, 4561.
- [45] Naresh, G.; Kant, R.; Narender, T. *Org. Lett.* **2015**, 17, 3446.
- [46] Hossain, M. M.; Shyu, S. G. *Tetrahedron* **2016**, 72, 4252.
- [47] Xie, L. Y.; Duan, Y.; Lu, L. H.; Li, Y. J.; Peng, S.; Wu, C.; Liu, K. J.; Wang, Z.; He, W. M. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2017**, 5, 10407.
- [48] Deng, T.; Wang, C. Z. *Catal. Sci. Technol.* **2016**, 6, 7029.
- [49] Li, W.; Yin, G.; Huang, L.; Xiao, Y.; Fu, Z.; Xin, X.; Liu, F.; Li, Z.; He, W. *Green Chem.* **2016**, 18, 4879.
- [50] Wu, C.; Xin, X.; Fu, Z. M.; Xie, L. Y.; Liu, K. J.; Wang, Z.; Li, W.; Yuan, Z. H.; He, W. M. *Green Chem.* **2017**, 19, 1983.
- [51] Xiao, S. Y.; He, Y.; Xu, G.; Liu, Q. *Rev. Chem. Intermed.* **2013**, 41, 3299.
- [52] Nishiyama, Y.; Shibata, M.; Ishii, T.; Morimoto, T.; Tanimoto, H.; Tsutsumi, K.; Kakiuchi, K. *Molecules* **2013**, 18, 1626.
- [53] Zhao, X.-L.; Zhu, J.; Yang, K.-F. *Petrochem. Technol.* **2017**, 46, 767 (in Chinese).
(赵先亮, 祝巨, 杨科芳, 石油化工, **2017**, 46, 767.)
- [54] He, Y.; Shen, N. N.; Fan, X. S.; Zhang, X. Y. *Tetrahedron* **2013**, 69, 8818.
- [55] Li, Z. H.; Xiao, S. Y.; Liang, R. H.; Xia, Z. N. *Rev. Chem. Intermed.* **2012**, 38, 1691.
- [56] Luo, F.-H.; Long, Y.; Li, Z.-K.; Zhou, X.-G. *Chin. J. Org. Chem.* **2016**, 36, 805 (in Chinese).
(罗飞华, 龙洋, 李正凯, 周向葛, 有机化学, **2016**, 36, 805.)

(Zhao, C.)