

含氮环烷烃选择性构建功能化芳烃研究进展

张云皓, 王一诺, 王思然, 徐大振*

南开大学化学学院, 农药国家工程研究中心, 天津 300071

摘要: 含氮杂环类化合物广泛存在于自然界, 具有多种生物活性。近几年, 使用含氮环烷烃作为原料合成含氮芳烃成为目前的一个研究热点, 该方法无需导向基团, 可选择性地一步实现C—C、C—N、C—S和C—Se键的构建和芳构化。本文整理了近年来有关该方法构建功能化喹啉和吲哚的文献报道, 进行了系统的梳理和综述, 并对该领域未来的发展作出展望。

关键词: 吲哚; 喹啉; 去氢化; 芳构化

中图分类号: G64; O6

Progress in Selective Construction of Functional Aromatics from Nitrogenous Cycloalkanes

Yunhao Zhang, Yinuo Wang, Siran Wang, Dazhen Xu *

Department of Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China.

Abstract: Nitrogen-containing aromatic compounds are ubiquitous in nature. They often exhibit a wide range of biological activities. Therefore, chemists have been studying on the preparation of them for a long time as well as developing various methods for their derivatization. Recently, the direct oxidation of nonaromatic cyclic substrates to prepare selectively substituted aromatics has been one of research focuses. In which, the functionalized aromatics could be obtained *via* C—C, C—N, C—S and C—Se bonds formation without the directing groups in one step. This paper reviews the recent progress in the construction of functional quinoline and indole by this method, and proposes future development prospects in this field.

Key Words: Indole; Quinoline; Dehydrogenation; Aromatization

含氮杂环类化合物广泛存在于自然界中, 是生物进行生命活动不可或缺的部分, 其中, 喹啉和吲哚分别是自然界中第一大类和第二大类的含氮杂环。如图1所示, 奎宁(Quinine, I)又称金鸡纳碱, 是金鸡纳树及其同属植物树皮内的天然生物碱, 早在十七世纪时, 人们就使用金鸡纳树皮治疗疟疾^[1,2]; 磷酸氯喹(Chloroquine Phosphate, II)具有抗疟疾、抗炎症等活性, 在《新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第六版)》中被列为治疗新冠肺炎的药物^[3]; 色氨酸(Tryptophan, III)是人体必需氨基酸, 也是生物体内合成蛋白质的原料之一^[4]; 血清素(Serotonin, IV)是人体内的一种神经递质, 具有调节情绪的功能^[5]。

收稿: 2024-01-30; 录用: 2024-04-25; 网络发表: 2024-05-07

*通讯作者, Email: xudazhen@nankai.edu.cn

基金资助: 国家级大学生创新创业训练计划(202210055082, 202310055078)

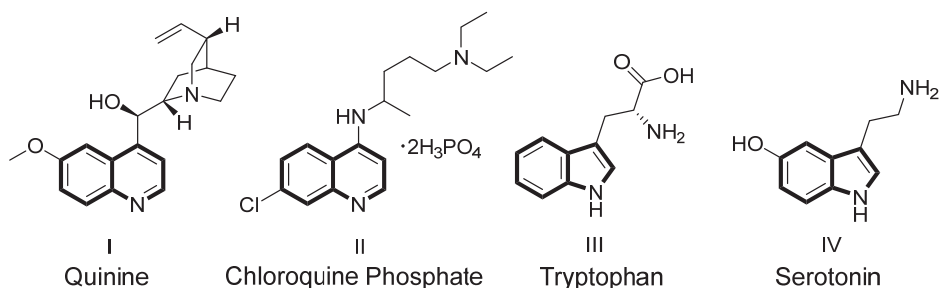


图1 代表性具有生物活性的含氮杂环化合物

鉴于含氮杂环化合物广泛的生物活性，化学家们投入了大量的时间和精力研究喹啉和吲哚这两类杂环的合成。传统合成方法的关注重点是以芳香胺为原料，通过关环的方法构建含氮芳杂环^[6,7]。在最近几年，合成化学家们发展了通过对含氮烷烃芳构化和功能化的方法制备含有不同取代基的含氮芳杂环。本文对相关文献进行总结分类，根据在功能化过程中成键类别的不同，分别介绍了构建C—C、C—N、C—S以及C—Se键制备喹啉和吲哚这两类杂环的芳构化合成方法(图2)，并从反应条件、底物范围、反应机理和应用前景等方面进行了点评，最后对未来芳构化构建芳杂环的发展趋势进行了展望。

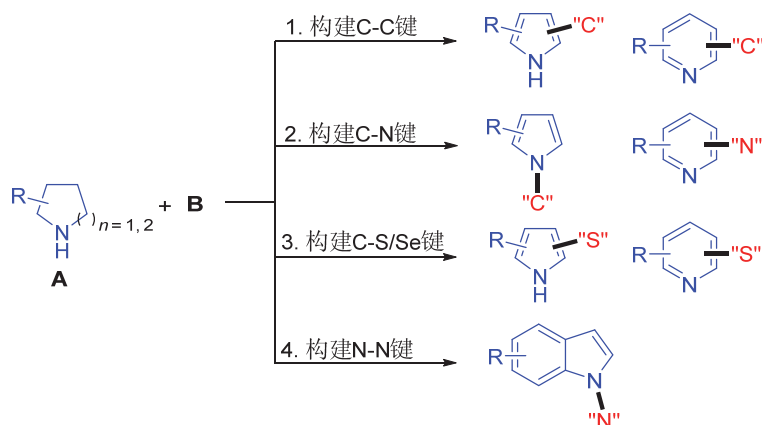


图2 含氮烷烃选择性构建功能化芳烃

1 构建C—C键实现芳构化

C—C键的构建在化学转化中是最常见的反应之一，通过含氮环烷烃A与另一底物B反应构建新的C—C键并实现芳构化，是制备氮杂芳环的有效方法(图2)。根据底物B的种类，可将该芳构化过程分为三类，即含氮环烷烃与含氧官能团(醛、醇)底物、亲核试剂和芳基化试剂反应。

1.1 含氮环烷烃与醛、醇反应

2016年，华南理工大学的张珉课题组^[8,9]报道了一种金属Ru催化的四氢喹啉与芳香醛进行脱氢偶联反应，得到功能化的喹啉衍生物的方法(图3)，以27%–88%的收率得到目标产物。随后，作者对反应的机理做了探索，证明反应是通过单脱氢引发芳基化的模式进行的。该方法使用氧气作为绿色氧化剂，为饱和N杂环转化为功能化的芳香N杂环提供了重要路线。

2017年，陕西师范大学的王超课题组^[10]报道了一种金属Ir催化的二氢吲哚与醇反应选择性构建3-取代吲哚的方法(图4)，能以良好至优秀的收率得到目标产物。在2020年，德国亚琛工业大学的Rueping课题组^[11]还报道了类似的Mn催化过程。二者除了可以得到3-取代吲哚，还可通过控制碱加入的时机，选择性地得到N-取代吲哚，这部分内容将在2.1.2节介绍。值得注意的是，在机理研究中，

两课题组均指出了反应的实质并非醇直接参与反应，而是先被氧化为醛，然后实现C—C键的构建及芳构化。

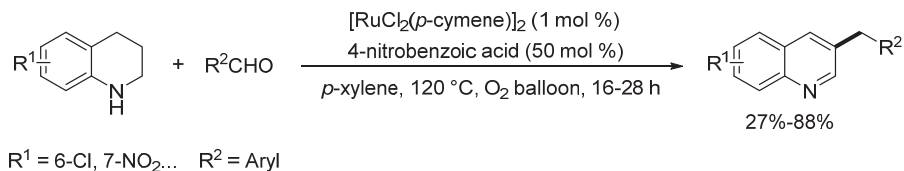


图3 钌催化四氢喹啉与芳香醛合成功能化喹啉

mol%为摩尔分数

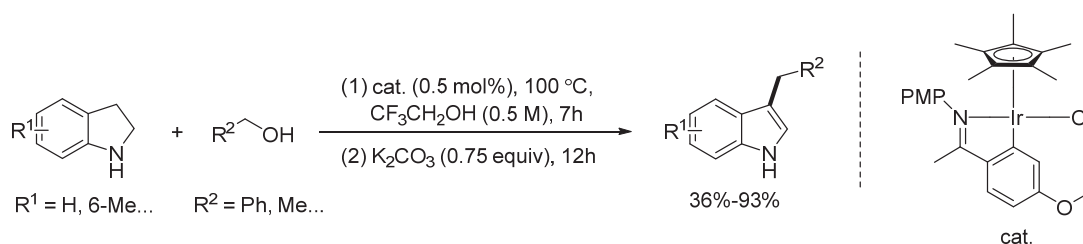


图4 铱催化二氢吲哚与醇合成3-取代吲哚

1.2 含氮环烷烃与芳烃反应

2019年，清华大学的罗三中课题组^[12]报道了光催化的四氢喹啉脱氢偶联合成功能化 β -取代喹啉的反应，其中金属Ru作为光敏剂，金属Co作为氢转移催化剂(图5)，该反应使用的是无受体脱氢偶联(Acceptorless Dehydrogenative Coupling, ADC)策略，避免了氧化剂的使用，唯一副产物为氢气。通过控制反应时间，可以得到 β -烷基喹啉和 β -芳基喹啉，二者的收率均能达到中等至优秀。通过机理实验，作者提出该反应C—C键构建的实质是中间体烯胺亲核性 β 位对亚胺离子亲电性 α 位的加成，且 β -芳基喹啉是 β -烷基喹啉进一步脱氢得到的。由于反应具有明确的位置选择性，该方法可能为这种具有C2—C3连接双杂环的天然生物碱提供一种的合成途径。

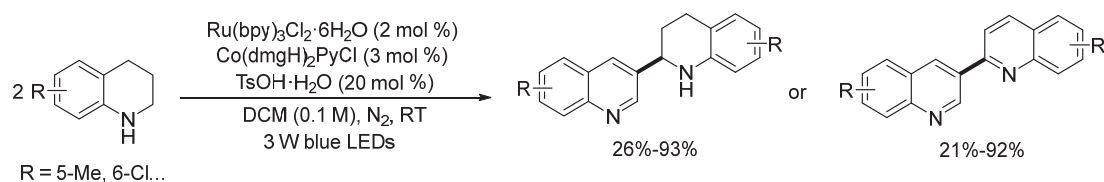


图5 光催化四氢喹啉偶联

2019年，张珉课题组^[13]报道了一种Ir催化的苯并环胺与吲哚偶联合成双N杂芳环的方法，以31%–76%的收率得到目标产物，作者同样使用的是ADC策略，脱去的氢以氢气的形式释放(图6)。不同于以上几个例子中在喹啉的3位进行功能化，该反应选择性地地在喹啉的2位进行了功能化，为不同位置取代的喹啉合成提供了新思路。

1.3 含氮环烷烃与芳基化试剂反应

2017年，美国加州大学伯克利分校的Somorjai课题组^[14]报道了一种由树状聚合物SBA-15与纳米Pd共同催化的吲哚芳构化反应(图7)。在该反应中，作者使用了芳基化试剂 Ph_2IBF_4 实现了对C2功能化吲哚的构建，并且以接近定量的产率得到目标化合物，但是由于芳基化试剂的限制，该方法在底物拓展上存在一定的局限性。

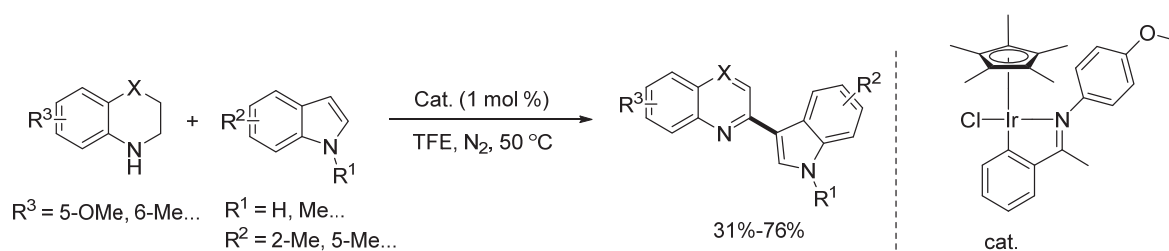


图6 铱催化苯并环胺与吡啶合成双N杂芳环

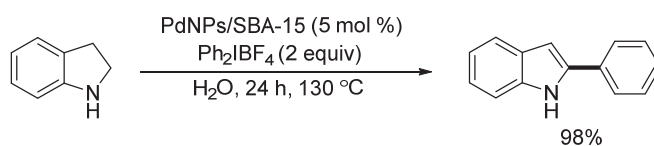


图7 钯纳米粒子催化二氢吡啶与芳基化合成功能化吡啶

2 构建C—N键实现芳构化

含氮环烷烃芳构化构建C—N键主要有两种途径：一是以杂环烷烃上的N为反应位点，通过N(芳)基化反应构建C—N键；另一种是引入新的胺源，在N杂环烷烃的碳基链上构建新的C—N键。以上两种途径均是在构建C—N键的同时实现芳构化的反应过程。

2.1 含氮环烷烃的N烷基化反应

2.1.1 含氮环烷烃与卤代烃反应

2012年，印度理工学院的Nageswari课题组^[15]报道了可循环的纳米Cu催化的二氢吡啶与卤代烃反应合成N-取代吡啶的方法，以良好的收率得到目标产物(图8)。然而，由于卤代烃价格昂贵且常伴有较多副产物生成，因此化学家们更倾向于研究开发使用价格低廉底物通过绿色的反应过程构建此类结构。

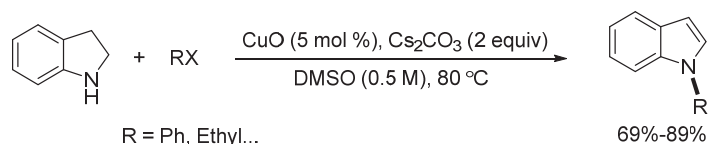


图8 纳米铜催化二氢吡啶与卤代烃合成N-取代吡啶

2.1.2 含氮环烷烃与含氧官能团(醛、酮、醇、酚)反应

2010年，浙江大学潘远江课题组^[16]与美国罗格斯大学的Seidel课题组^[17]分别报道了苯甲酸催化的二氢吡啶与醛反应合成N-取代吡啶的方法，均能以良好至优秀的收率得到目标产物(图9)。两种方法均在酸性条件下进行，经过关键的亚胺中间体进行，然而遗憾的是，作者并没有对二氢吡啶的底物进行过多拓展，醛类底物的范围也仅限于芳香醛，且芳香醛对位连有给电子基团时，会对该反应有较大影响，不能得到目标产物。

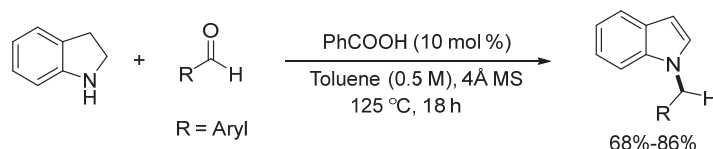


图9 苯甲酸催化二氢吡啶与醛合成N-取代吡啶

随后,王超课题组^[10]与Rueping课题组^[11]分别报道了Ir催化和Mn催化的二氢吲哚与醇反应合成*N*-取代吲哚的方法(图10)。该方法具有选择性,既可以合成3-取代吲哚(见1.2节),也可以合成*N*-取代吲哚。这种方法需在碱性条件下进行,虽然使用醇作为底物,但反应的实质是醇先被氧化成醛,然后再参与之后的反应,因此同样经过了亚胺中间体。相较于直接使用醛进行反应,使用醇作为起始原料减少了经济成本,且易于保存,具有更高的实际应用价值。

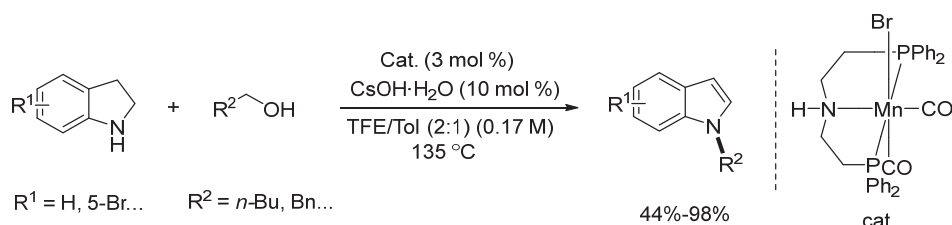


图10 锰催化二氢吲哚与醇合成*N*-取代吲哚

2019年,加拿大麦吉尔大学李朝军课题组^[18]报道了Pd催化的二氢吲哚与酮的还原性交叉偶联合成*N*-取代吲哚的方法(图11),该方法具有出色的底物耐受性,能以42%–97%的产率得到相应的吲哚产物。在机理实验中,作者通过控制反应条件并分离中间体,证明了在Pd催化剂下,吲哚与二氢吲哚存在互变转化,反应的实质是吲哚先发生去芳构化反应,得到二氢吲哚。进一步的进行机理实验表明,反应的本质是氨基对羰基的加成、缩合,其具体过程为:二氢吲哚与酮先形成亚胺中间体**1**,随后在Pd催化剂作用下还原为中间体**2**,再脱氢芳构化得到*N*-取代吲哚。巧妙的是,通过这种去芳构化-再芳构化策略,可以提高吲哚N原子的亲核能力,避免C3取代产物的产生^[19,20]。

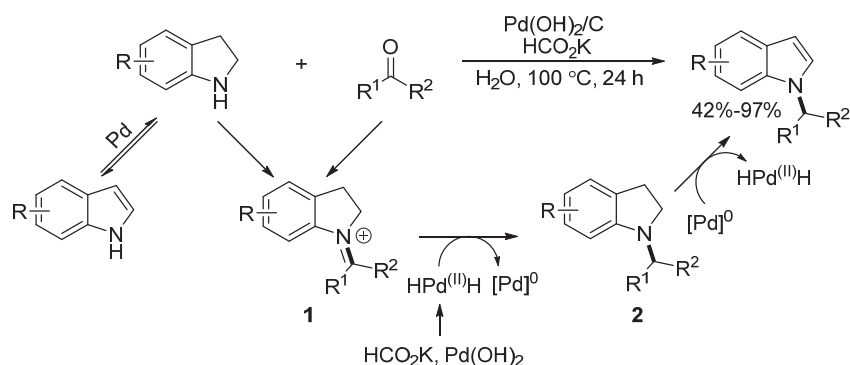


图11 钯催化二氢吲哚与酮合成*N*-取代吲哚及其机理

2020年,五邑大学陈修文课题组^[21]报道了Pd催化的二氢吲哚与萘酚反应合成*N*-取代吲哚的方法,以中等至良好的收率得到目标产物(图12)。在该报道中,作者首先尝试的是四氢喹啉作为氢给体,与萘酚进行转移氢化交叉偶联反应,但没有成功,之后作者使用更易于脱氢的二氢吲哚替换四氢喹啉,成功得到了*N*-芳基取代吲哚产物。

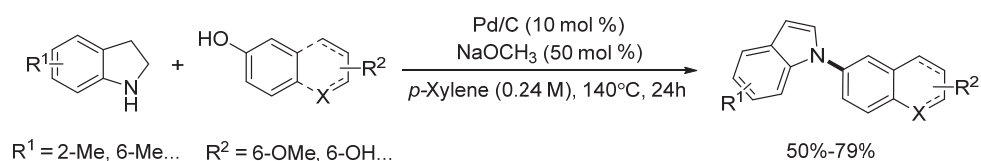


图12 钯催化二氢吲哚与萘酚合成*N*-取代吲哚

随后, 作者对反应进行了机理实验, 提出了以下机理(图13)。首先, 过量的二氢吲哚3在Pd催化下脱氢, 得到HPd^(II)H物种, 随后该物种将萘酚1还原得到中间体2, 此时Pd催化剂再生。中间体2与二氢吲哚3在NaOMe作用下迅速得到中间体5, 中间体5在Pd作用下脱氢芳构化得到目标产物6。值得注意的是, 该方法使用二氢吲哚作为新型氢给体, 避免使用具有潜在危险的氢气, 为未来转移加氢提供了新方法。

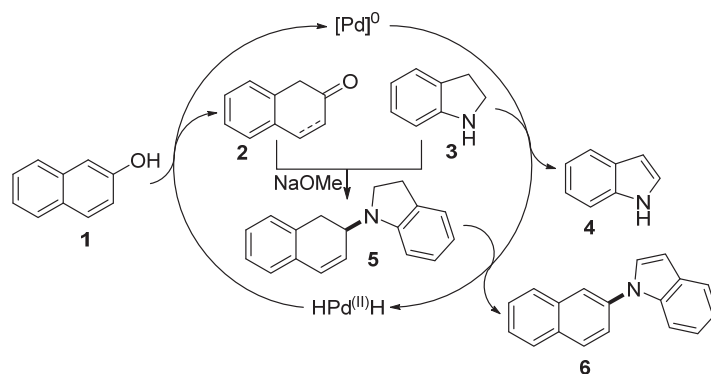


图13 钯催化二氢吲哚与萘酚合成*N*-取代吲哚的机理

2017年, 李朝军课题组^[22]报道了Pd催化的二氢吲哚与苯酚反应通过芳香性转移合成*N*-取代吲哚的方法, 以33%–94%的收率得到目标产物, 该方法也适用于吡咯烷合成*N*-取代吡咯(图14)。由于底物苯酚连有的取代基不同, 所得产物具有一定的顺反选择性。作者通过机理实验提出该方法的可能机理为, 苯酚先被还原为环己酮, 随后与二氢吲哚结合得到亚胺中间体, 再进行脱氢得到*N*-取代吲哚, 从而完成芳香性从苯酚到吲哚的转移。该方法适用性广泛, 多种生物活性酚化合物可完成该转化。

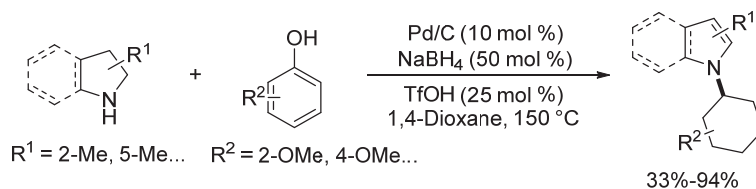


图14 钯催化二氢吲哚与苯酚合成*N*-取代吲哚

2.2 含氮环烷烃与胺反应

2018年, 张珉课题组^[23]报道了一种Cu催化的四氢喹啉与胺合成2-胺基喹啉的方法, 额外加入的TEMPO (2,2,6,6-四甲基哌啶氧化物)有效地降低了四氢喹啉的氧化电位, 使反应成为动力学控制的过程, 该方法可以以41%–90%的收率得到目标产物(图15)。值得注意的是, 该反应胺源的范围广泛, 不仅可以耐受芳基胺、烷基胺, 而且对于酰胺、磺酰胺也适用于此方法。

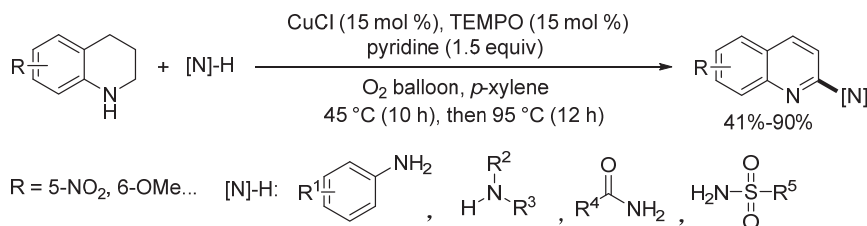


图15 铜催化四氢喹啉与胺合成2-胺基喹啉

同年，他们课题组^[24]还报道了一种Cu催化、BHT (2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚)辅助合成2-胺基喹啉的方法，即以苯甲酰氧胺为胺源，脱去苯甲酰氧基后与四氢喹啉形成C—N键(图16)。遗憾的是，这种合成策略不仅需要预制胺类底物，而且胺的范围限制在烷基胺，在应用性上具有明显的限制，同时在反应机理上也缺少研究。

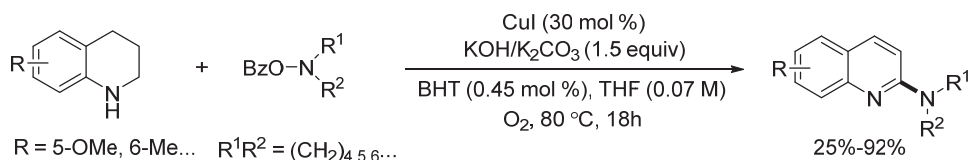


图16 铜催化四氢喹啉与苯甲酰氧胺合成2-胺基喹啉

3 构建C—S/Se键实现芳构化

2018年，Rueping课题组^[25]首先报道了光催化的N-取代吡咯烷与苯磺酰氯合成3-苯磺酰基吡咯的方法(图17)。该方法的优点在于芳构化过程无需额外添加过渡金属和氧化剂，反应物苯磺酰氯可同时作为温和的电子受体，在室温下完成催化循环，实现吡咯烷的芳构化。

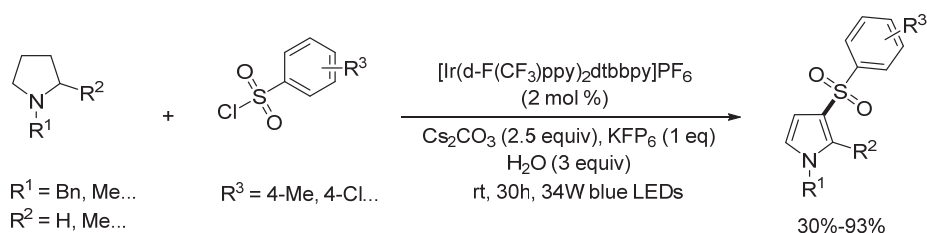


图17 光催化N-取代吡咯烷与苯磺酰氯合成3-苯磺酰基吡咯

2020年，赣南师范大学刘良先课题组^[26]报道了GO(氧化石墨烯)促进、光诱导的二氢吡啶与芳基硫酚合成3-芳基硫基吡啶的方法，利用该方法也可合成3-芳基硒基吡啶和3-硫氰基吡啶(图18)。这种GO促进、光诱导策略条件绿色温和、催化剂广泛易得，有效避免了强氧化剂的使用以及化学计量副产物的产生^[27]。

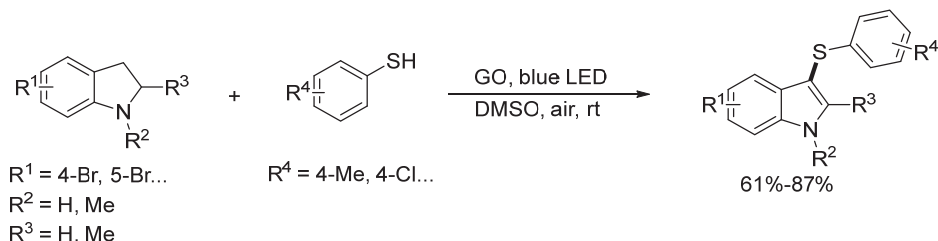


图18 光催化二氢吡啶与芳基硫酚合成3-芳基硫基吡啶

2019年，武汉大学雷爱文课题组^[28]报道了I₂催化的四氢异喹啉与硫醇、硫酚合成4-硫基异喹啉的方法，以较良好的收率得到目标产物，该方法同样可用于4-芳基硒基异喹啉的合成(图19)。作者使用简单方法保证了反应位点在异喹啉的4位，相对于传统合成方法，无需导向基团是该方法的突出优点之一。

2018年，张珉课题组^[29]报道了纳米Co氧化物催化的四氢喹啉、二氢吡啶与硫醇、硫酚或二苯硒醚反应合成6-S/Se取代喹啉以及5-S/Se取代吡啶的方法(图20)。他们设计并合成了多球腔碳包埋纳米

钴氧化物(CoO_x/MSC), 这种催化剂可用于多相催化合成, 能够选择性地在此特定位置构建C-S或者C-Se键。



图19 碘催化四氢异喹啉与硫醇、硫酚合成4-硫基喹啉

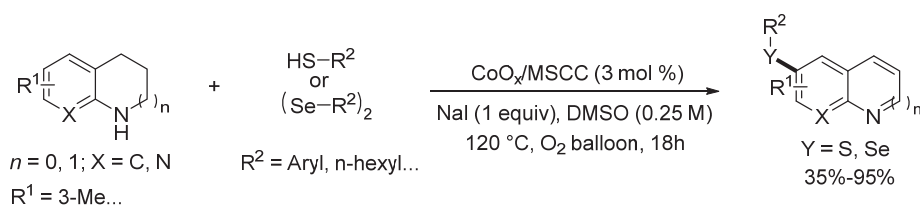


图20 钴催化四氢喹啉/二氢吲哚合成6-S/Se取代喹啉以及5-S/Se取代吲哚

随后作者对反应的机理进行了研究, 提出了以下反应过程(图21): 首先纳米钴氧化物捕捉分子氧, 同时硫醇**1**发生单电子氧化和质子转移, 得到**5**和自由基**2**。随后**5**再与另一分子**1**反应, 重生催化剂并得到自由基**2**。**2**与二硫化物**3**存在互相转化, **3**在氧气作用下得到碘化物**4**。对于产物的形成, 作者提出两种可能途径。在途径a中, **6**通过共振极化得到离子**7**, 随后**4**进行亲电硫化得到**8**; 在途径b中, **6**在**2**的作用下得到自由基**9**, 随后经过**4**和纳米钴氧化物参与的单电子氧化得到**10**。最后, **10**经过脱氢芳构化得到产物**11**。

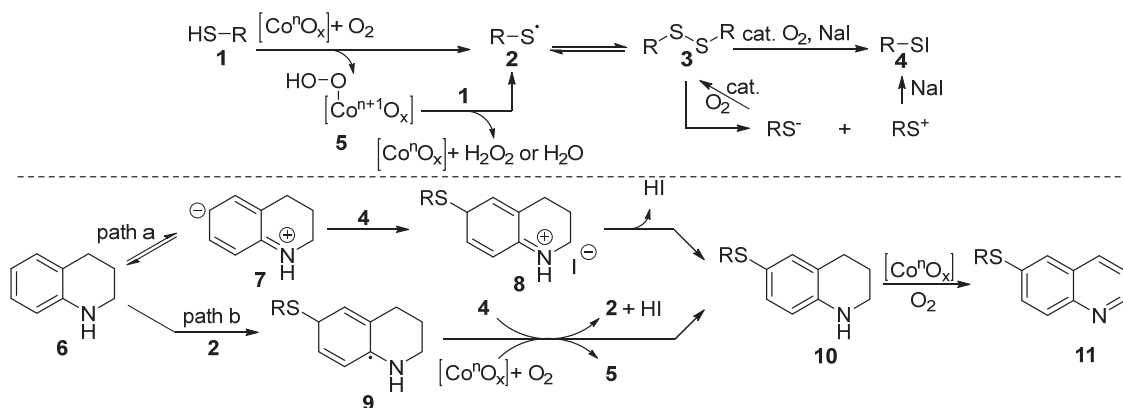


图21 钴催化四氢喹啉合成6-S取代喹啉的机理

2023年, 我们课题组^[30]报道了一种在碱性条件下二氢吲哚与芳基硫酚合成3-硫芳基吲哚的方法(图22)。我们发现在没有过渡金属和卤素催化剂的条件下, 仅使用廉价的碳酸钾以及理想的空气作为氧化剂, 便可实现这一转化过程, 而且该反应具有广泛的官能团耐受性, 各种卤素、硝基和酯基均适用于此反应。此外, 该反应具有较高的原子经济性、反应过程绿色环保, 唯一理论副产物是对环境友好的水。进一步研究发现, 该方法不但能实现含氮环烃的芳构化, 还能实现由环己酮功能化制备各种硫芳基苯酚的反应过程, 并可实现克级放大合成, 具有潜在的实际应用价值。

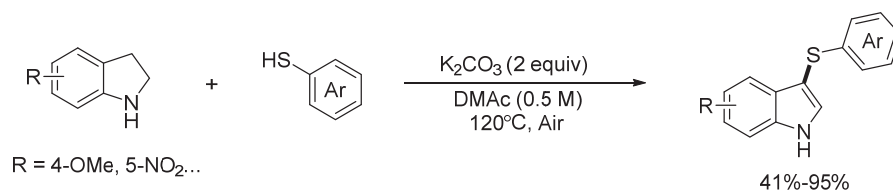
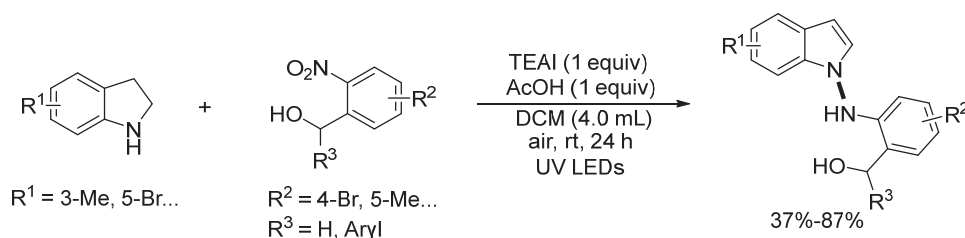


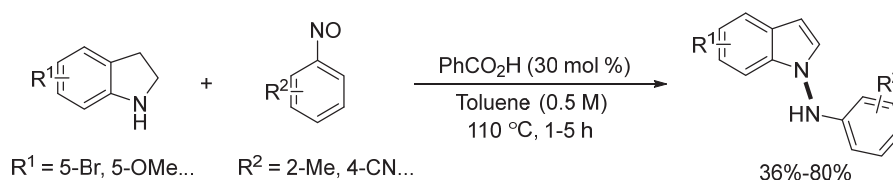
图22 无催化剂二氢吲哚与芳基硫酚合成3-芳基硫基吲哚

4 构建N—N键实现芳构化

2021年, 湖南大学邱仁华课题组^[31]报道了光催化二氢吲哚与邻硝基苄醇合成*N*-芳基-1-氨基吲哚的方法, 以中等至良好的收率得到*N*-取代吲哚(图23)。随后作者探索了此结构对金属离子的响应, 结果证明该结构在混合阳离子溶液中, 对Fe³⁺离子有明显的荧光响应, 具有高选择性和高灵敏度。

图23 光催化二氢吲哚与邻硝基苄醇合成*N*-芳基-1-氨基吲哚

2014年, 美国堪萨斯大学的Tunge课题组^[32]报道了苯甲酸催化的二氢吲哚与亚硝基苯合成*N*-芳基-1-氨基吲哚的方法, 以36%–80%的收率得到目标产物(图24)。由于亚硝基苯并非常用商业化试剂, 作者尝试一锅法以苯胺为原料先合成亚硝基苯, 再完成后续的反应, 也成功地得到了目标产物。遗憾的是, 作者没有对反应机理进行深入研究。

图24 苯甲酸催化二氢吲哚与亚硝基苯合成*N*-芳基-1-氨基吲哚

5 结语

本文综述了由含氮环烷烃选择性构建功能化芳烃的研究进展, 分别总结论述了基于构建C—C、C—N、C—S以及C—Se键制备功能化芳烃的合成方法。与传统构建氮杂芳环的方法相比, 他们避免了导向基团的引入和脱去, 并且选择性地生成我们需要的化学键, 为具有广泛生物活性和药用价值的喹啉和吲哚的合成提供了经济、绿色的方法。本文综述的合成方法目前仍处于起步阶段, 存在如下主要问题: (1) 反应主要基于Pd、Ru、Ir等贵过渡金属催化, 廉价金属主要是基于Cu催化, 而非金属催化剂的用量普遍较大; (2) 绝大多数反应都需要在相对较高的温度下进行(80–130 °C), 并且需要至少当量的强碱, 这些都会导致官能团的耐受性降低, 进而影响这些方法的使用范围; (3) 含氮环烷烃底物范围受限, 目前研究对象主要集中在苯并氮杂环烷烃上, 而对独立的单环氮杂环烷烃研究较少。因此, 未来该领域的研究重点是: 发展其他更加廉价、环境友好的催化体系, 降低反应温度和拓展底物范围。光催化和电化学合成是近年来发展起来的热门研究方法。在该综述中, 光催化也初

步展露头角，室温条件下用空气做氧化剂赋予了光催化突出的优点。未来随着相关研究工作的不断发展和深入，预计光、电催化会在由含氮环烷烃选择性构建功能化芳烃的研究中迎来更大的发展。

参 考 文 献

- [1] Stork, G.; Niu, D.; Fujimoto, A.; Koft, E. R.; Balkovec, J. M.; Tata, J. R.; Dake, G. R. *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, 123, 3239.
- [2] Kaufman, T. S.; Rúveda, E. A. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, 44, 854.
- [3] Gao, J.; Tian, Z.; Yang, X. *BioScience Trends.* **2020**, 14, 72.
- [4] Comai, S.; Bertazzo, A.; Brughera, M.; Crotti, S. *Adv. Clin. Chem.* **2020**, 95, 165.
- [5] Mohammad-Zadeh, L. F.; Moses, L.; Gwaltney-Brant, S. M. *J. vet. Pharmacol. Therap.* **2008**, 31, 187.
- [6] Cho, C. S.; Lim, H. K.; Shim, S. C.; Kim, T. J.; Choi, H.-J. *Chem. Commun.* **1998**, 995.
- [7] Zhang, X.; Xu, X. *Chem. Asian J.* **2014**, 9, 3089.
- [8] Tan, Z.; Jiang, H.; Zhang, M. *Org. Lett.* **2016**, 18, 3174.
- [9] Tan, Z.; Jiang, H.; Zhang, M. *Chem. Commun.* **2016**, 52, 9359.
- [10] Jiang, X.; Tang, W.; Xue, D.; Xiao, J.; Wang, C. *ACS Catal.* **2017**, 7, 1831.
- [11] Borghs, J. C.; Zubar, V.; Azofra, L. M.; Sklyaruk, J.; Rueping, M. *Org. Lett.* **2020**, 22, 4222.
- [12] Jia, Z.; Yang, Q.; Zhang, L.; Luo, S. *ACS Catal.* **2019**, 9, 3589.
- [13] Chen, X.; Li, Y.; Chen, L.; Zhu, Z.; Li, B.; Huang, Y.; Zhang, M. *J. Org. Chem.* **2019**, 84, 3559.
- [14] Deraedt, C.; Ye, R.; Ralston, W. T.; Toste, F. D.; Somorjai, G. A. *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, 139, 18084.
- [15] Reddy, K. H. V.; Satish, G.; Ramesh, K.; Karnakar, K.; Nageswar, Y. V. D. *Tetrahedron Lett.* **2012**, 53, 3061.
- [16] Mao, H.; Xu, R.; Wan, J.; Jiang, Z.; Sun, C.; Pan, Y. *Chem. Eur. J.* **2010**, 16, 13352.
- [17] Deb, I.; Das, D.; Seidel, D. *Org. Lett.* **2011**, 13, 812.
- [18] Wang, Z.; Zeng, H.; Li, C.-J. *Org. Lett.* **2019**, 21, 2302.
- [19] Aydin, O.; Kilic, H.; Bayindir, S.; Erdogan, E.; Saracoglu, N. *J. Heterocyclic Chem.* **2015**, 52, 1540.
- [20] Bayindir, S.; Erdogan, E.; Kilic, H.; Aydin, O.; Saracoglu, N. *J. Heterocyclic Chem.* **2015**, 52, 1589.
- [21] Chen, X.; Yang, Z.; Chen, X.; Liang, W.; Zhu, Z.; Xie, F.; Li, Y. *J. Org. Chem.* **2020**, 85, 508.
- [22] Qiu, Z.; Li, J.-S.; Li, C.-J. *Chem. Sci.* **2017**, 8, 6954.
- [23] Liang, Y.; Jiang, H.; Tan, Z.; Zhang, M. *Chem. Commun.* **2018**, 54, 10096.
- [24] Zhao, H.; Chen, X.; Jiang, H.; Zhang, M. *Org. Chem. Front.* **2018**, 5, 539.
- [25] Muralirajan, K.; Kancherla, R.; Rueping, M. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, 57, 14787.
- [26] Liu, C.; Peng, X.; Hu, D.; Shi, F.; Huang, P.; Luo, J.; Liu, Q.; Liu, L. *New J. Chem.* **2020**, 44, 17245.
- [27] Jiang, X.; Zhao, Z.; Shen, Z.; Chen, K.; Fang, L.; Yu, C. *Eur. J. Org. Chem.* **2020**, 3889.
- [28] Wang, H.; Li, Y.; Lu, Q.; Yu, M.; Bai, X.; Wang, S.; Cong, H.; Zhang, H.; Lei, A. *ACS Catal.* **2019**, 9, 1888.
- [29] Tan, Z.; Liang, Y.; Yang, J.; Cao, L.; Jiang, H.; Zhang, M. *Org. Lett.* **2018**, 20, 6554.
- [30] Liu, H.-L.; Zhang, R.-J.; Han, D.-Y.; Feng, Y.; Luo, T.-H.; Xu, D.-Z. *J. Org. Chem.* **2023**, 88, 10058.
- [31] Ou, Y.; Yang, T.; Tang, N.; Yin, S.-F.; Kambe, N.; Qiu, R. *Org. Lett.* **2021**, 23, 6417.
- [32] Ramakumar, K.; Tunge, J. A. *Chem. Commun.* **2014**, 50, 13056.