

## 2026 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

### 一、项目名称

光促进丰产金属-联吡啶络合物催化构建 C-O/C-N 键偶联反应

### 二、提名者及提名意见

专家一：李兴伟，陕西师范大学，教授，化学

提名意见：

过渡金属催化芳基卤化物与亲核试剂的交叉偶联反应，是构建碳-杂原子键的核心技术，在药物与精细化学品合成中应用广泛。目前该领域主流依赖钯等贵金属催化剂，存在资源稀缺、成本高昂等问题，无法满足规模化绿色合成的发展需求。因此，开发丰产金属催化的高效碳-杂键构建新体系，已成为合成化学领域亟待突破的前沿难题与核心战略需求。针对上述瓶颈，本研究聚焦光化学催化偶联方向，创新开发了无外加光敏剂的光促丰产金属(II)-联吡啶络合物催化新体系，实现了芳基卤化物与多类亲核试剂的高效交叉偶联。机理研究证实，光激发可驱动镍、铁联吡啶等丰产金属络合物发生均裂，生成低价活性物种  $M(I)$ ，通过  $M(I)/M(III)$  氧化还原循环高效驱动碳-杂原子键构建。相关成果发表于国际高水平期刊，获学界广泛认可，跻身国际前沿水平。本研究完善了光促丰产金属催化理论体系，填补领域研究空白，为绿色可持续有机合成提供了原创催化剂体系，理论价值与应用前景突出，符合自然科学奖提名标准，特此建议提名。

我同意提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。

专家二：左磊，西安电子科技大学，教授，信息与通信工程

提名意见：

过渡金属催化芳基卤化物与亲核试剂的交叉偶联反应，是构建碳-杂原子键的核心技术，在药物与精细化学品合成中应用广泛。目前该领域主流依赖钯等贵金属催化剂，存在资源稀缺、成本高昂等问题。该项目围绕国家绿色化学与高端功能材料发展需求，针对贵金属资源稀缺、传统偶联反应能耗较高等瓶颈，发展了具有自主特色的光促进铁、镍催化偶联反应新体系，发展无外加光敏剂的光促丰产金属(II)-联吡啶络合物催化新体系。项目的核心贡献在于提出并验证了光诱导低价态丰产金属活性物种生成的新策略，阐明了光激发促进金属价态调控的关键作用。这一机制有效规避了传统  $M(II)$ -胺中间体还原消除困难的问题，使铁、镍等廉价丰产金属能够高效参与芳胺、芳基醚及相关含氧、含氮化合物的合成。相关成果已在国际高水平学术期刊发表，并获得国内外同行的正面引用与评价，表明该研究处于本领域国际前沿。该项目不仅丰富了光促进丰产金属催化的基础理论，也为绿色、高效和可持续的有机合成方法学发展作出了重要贡献，符合自然科学奖提名标准。

本人同意提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。

### 三、项目简介

#### 研究内容：

高活性、普适性丰产金属催化偶联反应催化剂体系的发现是突破贵金属资源依赖、推动有机合成与功能材料创新的关键路径。本研究构建了无外加光敏剂的光催化体系，通过镍、铁-联吡啶络合物催化，实现芳基卤化物与多类亲核试剂的高效偶联。该体系以可溶性有机胺为碱，在紫光激发下温和进行，成功合成芳胺、芳基醚及二芳胺类化合物，展现广泛的底物适用性与优异的官能团兼容性，为药物分子及材料单体提供绿色合成方案。机理研究表明，光激发下联吡啶配体发生金属-配体键断裂，生成低价态  $M(I)$  活性物种，经  $M(I)/M(III)$  循环实现碳-杂键构建。该过程无需复杂配体或严苛条件，凸显光能与丰产金属的协同催化效能。本研究系统揭示光化学与过渡金属协同机制，拓展交叉偶联反应的应用边界，彰显了光促进丰产金属催化在合成领域的变革潜力。

#### 学科发现：

完成人开发了无外加光敏剂的光促进丰产金属（铁、镍）催化剂体系，实现了芳基卤化物与多类亲核试剂（水、醇、手性胺、硝基芳烃等）的高效偶联反应。核心发现包括：1. 光化学与过渡金属协同机制创新：通过光激发调控金属价态，实现联吡啶配体的金属-配体键断裂，生成低价态  $M(I)$  活性物种，经  $M(I)/M(III)$  循环完成碳-杂键（C-N、C-O）构建。2. 绿色催化体系创新：首次实现光激发镍/铁催化合成芳胺，解决传统  $M(II)$ -胺中间体还原消除难题；开发镍催化 C-O 偶联新路径（芳基醚、酚合成），无需严苛条件或复杂配体；实现可见光促进镍催化硝基芳烃与芳基卤化物的直接 C-N 偶联合成二芳胺，避免硝基芳烃氢化为芳胺再参与偶联反应的传统步骤。3. 底物兼容性与普适性：体系对水、醇、手性胺、脂肪胺、芳基硝化物等亲核试剂及含空间位阻底物展现高活性与耐受性。

#### 科学价值及应用意义

1. 理论突破：阐明光与丰产金属的协同催化机理，拓展了 Buchwald-Hartwig 胺化反应等经典交叉偶联反应的理论边界。2. 方法学创新：无需贵金属或复杂光敏剂，通过光调控实现温和条件下高效催化，为 C-N、C-O 偶联反应的发展提供新范式。3. 技术革新：解决现有光促进镍催化体系底物范围有限、官能团兼容性差等瓶颈，推动丰产金属催化向实际应用转化。为药物分子（如含芳胺、芳基醚结构单元的药物）及功能材料（如含二芳胺的光敏剂）提供高效、低成本、绿色的合成路线，降低对贵金属的依赖。为光催化、均相催化及有机合成领域交叉研究提供新工具，促进材料、药物分子等下游领域创新。

本研究为高活性、普适性丰产金属催化 C-N、C-O 偶联反应催化剂体系开发和应用奠定理论基础，也为药物、农药、材料复杂分子合成提供了新的催化剂体系。

#### 取得的成果与评价：

该项目共完成 3 项国家自然科学基金面上项目和 3 项陕西省科技厅项目，发表合成化学方面的原创性论文 50 余篇，其中影响因子在 10 以上的学术论文共 18 篇，包括 *J. Am. Chem. Soc.* (2 篇，影响因子：16.6)，*Angew. Chem. Int. Ed.* (8 篇，影响因子：

17.6)、*Nat. commun.* (3 篇, 影响因子: 18.1)、*ACS Catal.* (5 篇, 影响因子 13.6)。在国际和国内学术会议做邀请报告 40 余次, 5 篇代表性研究论文先后被 SCI 收录期刊他引 400 次, 单篇最高他引 117 次。相关研究成果受到国内外学术界广泛关注和认可, 引用文献包括 *Nature*、*Science*、*Chem. Rev.*、*Chem. Soc. Rev.*、*J. Am. Chem. Soc.*、*Angew. Chem. Int. Ed.*、*Nat. Synth.*、*Synfacts* 等著名期刊。引用者包括许多合成化学领域的众多知名专家, 如中国科学院院士、上海有机所马大为研究员, 美国国家科学院院士、Scripps 研究所 Baran 教授、加拿大麦吉尔大学李朝军院士、加拿大达尔豪斯大学 Mark Stradiotto 院士、美国得克萨斯大学达拉斯分校 Vladimir Gevorgyan 教授、阿卜杜拉国王科技大学 Magnus Rueping 教授, 德国亚琛工业大学 Daniele Leonori 教授、武汉大学雷爱文教授、华中师范大学肖文精教授等。项目第一完成人入选陕西省委组织部三秦英才特殊支持计划科技创新领军人才、获得自然科学二等奖、宝钢优秀教师奖、Thieme Chemistry Journals Award 等奖励和荣誉。现任中国化学有机化学、应用化学学科、绿色化学专业委员会委员, 陕西省化学会副理事长, 科技处处长, 曾任陕西师范大学化学化工学院院长、应用与胶体化学教育部重点实验室主任等。

#### 应用情况:

化学原料药是医药产业的核心基础, 我国虽为全球最大生产与出口国, 但面临绿色生产水平滞后等挑战。国家发改委、工信部《关于推动原料药产业高质量发展实施方案》(2021) 明确将光化学合成、贵金属替代等列为关键技术, 旨在破解产业瓶颈。传统偶联反应依赖贵金属催化, 资源稀缺、成本高。高活性、普适性丰产金属(铁、镍等)催化体系突破性解决了这一难题: 通过光化学调控策略实现高效碳-杂键偶联, 无需贵金属光敏剂, 兼具经济性与环保性。聚焦产业需求, 申请人将光驱动丰产金属-联吡啶催化体系, 成功应用于塞来西布(抗炎镇痛类重磅药物)、苯甲酸利扎曲坦(偏头痛治疗药物)、来曲唑(抗肿瘤药物)等为代表的多款原料药, 以及以芳胺、咪唑等为核心的光电材料光化学合成新工艺, 累计形成成熟合成工艺十余条。相较于传统合成方法, 这些新工艺简化了合成步骤, 降低了生产成本, 具备产业应用优势。

## 四、客观评价

本项目代表性成果公开发表后, 受到国内外学术界广泛关注和认可。先后被 *Nature*、*Nat. Rev. Chem.*、*Chem. Rev.*、*Chem. Soc. Rev.*、*J. Am. Chem. Soc.*、*Angew. Chem. Int. Ed.*、*Nature Synth.*、*Organic Chemistry Portal*、*Synfacts* (4 次)、《有机化学》(2 次)等正面评述及大篇幅配图引用。申请人曾受邀在国际和国内学术会议上作报告 50 余次, 五篇代表性研究论文先后被 SCI 收录期刊他引 410 次, 单篇最高他引 117 次。如加拿大皇家科学院院士、皇家工程院院士、加拿大麦吉尔大学 James McGill 杰出讲席教授李朝军(国际著名有机化学家), 加拿大皇家科学院院士, 加拿大达尔豪斯大学 Mark Stradiotto 教授, 美国得克萨斯大学达拉斯分校, 德国亚琛工业大学 Daniele Leonori 教授(光催化领域著名学者)、中国科学院化学研究所“分子科学前沿”杰出讲座教授、阿卜杜拉国王科技大学(KAUST) Magnus Rueping 教授(光催化领域著名学者), 以及国内中国

科学院上海有机所马大为院士、武汉大学雷爱文教授（有机合成领域国家杰青）、肖文精教授（光催化领域专家国家级教学名师）等也进行了多次正面评述与引用。

### 与当前国内外同类学科技术研究现状与水平比较

本课题组围绕丰产金属催化的偶联反应这一目标，经过多年的探索研究，率先提出无外加光催化剂通过光调控丰产金属的价态，产生活性低价物种策略，通过[M(I)→M(III)]催化循环过程，有效实现光激发联吡啶-丰产金属(II)联吡啶络合物催化简单易得的卤代芳烃与不同类型的氮，氧亲核试剂的 C-N/C-O 偶联反应。这不仅提升了碳-杂键 (C-X) 的构建效率与选择性，而且深化了对过渡金属偶联反应中"配体-价态-反应路径"三者关联机制的认知，填补了贵金属催化体系对成本、放大潜力方面的不足，推动了“低成本、高效、广谱性”的高值化学品合成新范式。形成了涵盖方法开发、机理研究、产物应用全方位的合成方法学研究。

### 部分客观评价选录如下：

德国亚琛工业大学 Daniele Leonori 教授引用评价道：“我们通过评估在光环化加成反应（使用紫色发光二极管照射，波长 $\lambda=390$  纳米中的初始消失速率 ( $k_{\text{obs}}$ ) 来开始研究，反应涉及一系列电子性质多样的间位和/或对位（二）取代硝基芳烃，从而得到稳定的含双金刚烷结构的 24E” (*Nature* **2022**, 610, 81)（代表作 3）。奥地利科学技术研究院 Bartholomäus Pieber 教授评价了该系列性工作“薛及其同事的研究表明，在紫色 LED 照射下，(dMebpy)Ni(OAc)<sub>2</sub> 可产生活性镍(I)物种，用于催化 C(sp<sup>2</sup>)-N 交叉偶联反应” (代表作 1, 2)。该项研究被 *Synfacts* 期刊进行亮点报道，得到德国柏林工业大学 Martin Oestreich 正面评价：“镍盐的回收与再利用得到了验证，催化能力未发生损失。涉及自由基捕获和电子顺磁共振光谱的机理研究证实了所展示的反应机制”（代表作 1）。2025 年荣获美国化学会 ACS Catalysis Lectureship Award 首位华人获奖者，西湖大学尚睿教授评价了相关研究成果：“薛及其同事报道了一种利用光诱导镍催化实现(杂)芳基亲电试剂与伯醇、仲醇的有效 C-O/N 偶联反应，作者提出，活性 Ni(I)配合物是通过光诱导 Ni(II)-芳基配合物中镍-碳键的均裂生成的”（代表作 4, 5）。南开大学“百名青年学科带头人”，国家高层次人才仇友爱教授对相关研究工作评价：“随着有机化学领域的不断发展和创新，新的合成技术，如光化学碳氮偶联反应，正成为一种基础且不可或缺的过程，为伯芳胺的合成提供了更多选择”（代表作 1）。

### 应用情况

该项目发展了一系列无需外加光催化剂、仅通过光激发丰产金属催化芳基卤化物与亲核试剂发生碳-杂原子键偶联反应的新模式。申请人利用光调控丰产金属价态以产生活性低价物种的策略，通过[M(I)→M(III)]催化循环过程，成功实现了由光激发丰产金属(II)联吡啶络合物催化的、以简单易得芳基卤化物与不同亲核试剂之间的碳-氮/氧偶联反应。申请人关于镍催化碳-氧偶联反应的工作被美国国家科学院院士、美国艺术与科学学院院士、Scripps 研究所化学系的 Baran 教授所借鉴，并扩展至电催化体系。他采用电调控镍价态以产生镍(I)物种的策略，通过[Ni(I)→Ni(III)]催化循环过程，成功实现了电催化溴代芳烃与醇的碳-氧偶联反应。该方法同样以可溶性 DBU 为碱，可在 100 mmol 规模下实现电催化流动合成 (*Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, 60, 20700)。同样，

2025 年，申请人关于光激发镍催化芳基卤化物与 *N*-亲核试剂的碳-氮偶联工作被南开大学“百名青年学科带头人”、国家高层次人才仇友爱教授所借鉴，并扩展至电催化体系。通过阴极电还原将镍(II)转化为镍(I)活性物种，经由[Ni(I)→Ni(III)]催化循环过程，成功实现了芳基卤化物与 NH<sub>3</sub>的碳-氮偶联反应，合成芳基伯胺。该方法采用弱亲核试剂 NH<sub>3</sub>作为氨源，具有高原子经济性 (*Angew. Chem. Int. Ed.* **2025**, 64, e202504459)。

申请人实现的光激发镍催化硝基芳烃与芳基卤化物直接胺化合成二芳胺的工作，为德国亚琛工业大学 Daniele Leonori 教授课题组开展“激发态硝基芳烃化学”研究奠定了基础。基于申请人提出的硝基芳烃在紫光激发下生成三线态、进而被有机碱还原为亚硝基芳烃的机制，Leonori 教授将三线态硝基芳烃应用于与烯烃的[3+2]-环加成反应，生成稳定的 1,3,2-二噁唑烷中间体，并在温和水解条件下得到相应的羰基产物 (*Nature* **2022**, 610, 81)。2023 年，他们通过原位还原策略，将“激发态硝基芳烃化学”进一步拓展至烯烃的双羟基化反应 (*Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, 62, e202214508)。2025 年，他们利用光激发的硝基芳烃实现了芳烃的选择性氧化裂解 (*Science* **2025**, 387, 1167)，该转化的关键在于硝基芳烃优先被激发到三线态 $\pi,\pi$ 态，而非  $n,\pi$ 态。

受相关工作启发与影响，陕西师范大学王超课题组将该策略应用于药物中间体手性色烷的合成中 (*J. Am. Chem. Soc.* 2025, 147, 31, 27790; *J. Org. Chem.* **2022**, 87, 3804)；此外，该反应被进一步用于合成 elbasvir (艾尔巴韦，一种治疗丙型肝炎病毒的潜在候选药物)的关键中间体 (*Coord. Chem. Rev.* **2022**, 470, 214698)；而我们课题组也将该方法与策略应用于胆固醇的后期修饰中 (*Angew. Chem., Int. Ed.* **2020**, 59, 12714)以及在天然产物、医药、农药和有机光电材料中常见的咪唑化合物的合成中，该项技术已申请并授权中国发明专利 (专利号：ZL202310924480.X)。

该项目共完成 3 项国家自然科学基金面上项目资助并顺利结题，曾获陕西省“三秦英才特殊支持计划科技创新领军人才(2023)”、*Thieme Chemistry Journals Award*、*Advanced Research Network Lectureship Award*、宝钢优秀教师奖，获得自然科学二等奖等荣誉。目前培养了 10 名博士毕业生与 30 余名硕士毕业生。共有十四位学生毕业后分别在中国人民解放军空军军医大学、陕西师范大学、长安大学、西北大学、贵州大学、遵义医科大学、贵州中医药大学、陕西理工大学、陕西科技大学、西安工程大学、渭南师范学院等高校取得教职；指导的青年教师中有 4 人获得国家自然科学基金委青年科学基金。

## 五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

| 序号  | 论文专著名称                                                                                                                            | 刊名                                      | 作者                                                                                                                      | 年卷页码<br>(xx 年 xx 卷 xx 页) | 发表时间<br>(年月日) | 通讯作者<br>(含共同)            | 第一作者<br>(含共同) | 国内作者<br>(中文)                           | 他引总次数 | 检索数据库 | 知识产权是否归国内所有 |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|----------------------------------------|-------|-------|-------------|
| 1   | Werner Salt as Nickel and Ammonia Source for Photochemical Synthesis of Primary Aryl Amines                                       | ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION | Geyang Song, Jiameng Song, Qi Li, Ding-Zhan Nong, Jianyang Dong, Gang Li, Juan Fan, Chao Wang, Jianliang Xiao, Dong Xue | 2024 年 63 卷 e202314355 页 | 2023-12-28    | Dong Xue                 | Geyang Song   | 宋戈洋, 宋佳萌, 李琪, 农定展, 董建洋, 李刚, 樊娟, 王超, 薛东 | 22    | WOS   | 是           |
| 2   | Chiral Arylated Amines via C- N Coupling of Chiral Amines with Aryl Bromides Promoted by Light                                    | ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION | Geyang Song, Liu Yang, Jing-Sheng Li, Wei-Jun Tang, Wei Zhang, Rui Cao, Chao Wang, Jianliang Xiao, Dong Xue             | 2021 年 60 卷 21536 页      | 2021-08-20    | Jianliang Xiao, Dong Xue | Geyang Song,  | 宋戈洋, 杨柳, 李京晟, 汤卫军, 张伟, 曹睿, 王超, 薛东      | 55    | WOS   | 是           |
| 3   | Light-Promoted C-N Coupling of Aryl Halides with Nitroarenes                                                                      | ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION | Gang Li, Liu Yang, Jian-Jun Liu, Wei Zhang, Rui Cao, Chao Wang, Zunting Zhang, Jianliang Xiao, and Dong Xue             | 2021 年 60 卷 5230 页       | 2021-01-18    | Dong Xue                 | Gang Li       | 李刚, 杨柳, 刘建军, 张伟, 曹睿, 王超, 张尊听, 薛东       | 112   | WOS   | 是           |
| 4   | Light-Promoted Nickel Catalysis: Etherification of Aryl Electrophiles with Alcohols Catalyzed by a Ni <sup>II</sup> -Aryl Complex | ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION | Liu Yang, Huan-Huan Lu, Chu-Hui Lai, Gang Li, Wei Zhang, Rui Cao, Fengyi Liu, Chao Wang, Jianliang Xiao, Dong Xue       | 2020 年 59 卷 12714 页      | 2020-05-26    | Dong Xue                 | Liu Yang      | 杨柳, 卢欢欢, 赖楚卉, 李刚, 张伟, 曹睿, 刘峰毅, 王超, 薛东  | 117   | WOS   | 是           |
| 5   | Synthesis of Phenols: Organophotoredox/Nickel Dual Catalytic Hydroxylation of Aryl Halides with Water                             | ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION | Liu Yang, Zhiyan Huang, Gang Li, Wei Zhang, Rui Cao, Chao Wang, Jianliang Xiao, Dong Xue                                | 2018 年 57 卷 1968 页       | 2018-01-24    | Dong Xue                 | Liu Yang      | 杨柳, 黄治炎, 李刚, 张伟, 曹睿, 王超, 薛东            | 94    | WOS   | 是           |
| 合 计 |                                                                                                                                   |                                         |                                                                                                                         |                          |               |                          |               |                                        | 400   |       |             |

## 六、主要完成人情况（不超过 6 人）

| 姓名  | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位   | 完成单位   | 对本项目贡献                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----|----|------|------|--------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 薛东  | 1  | 处长   | 教授   | 陕西师范大学 | 陕西师范大学 | 项目组负责人，负责选题，实施方案的设计与制定、主持科研基金项目的汇报、阶段性成果的大会报告。对《发现、发明及创新点》中的所有项做出了创造性贡献，对应附件中代表论文 1-5。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 宋戈洋 | 2  | 无    | 副研究员 | 陕西师范大学 | 陕西师范大学 | 发展了光促进镍催化芳基 C-N 偶联反应系列性研究。通过光调控策略改变镍的价态促进镍催化偶联反应研究，实现了光促进镍催化芳基卤化物与不同 <i>N</i> -亲核试剂的 C-N 偶联反应。反应具有宽泛的底物范围、优秀的官能团兼容性、区域选择性。相关成果发表在 <i>Angew. Chem. Int. Ed.</i> <b>2024</b> , <i>63</i> , e202314355; <i>Angew. Chem. Int. Ed.</i> <b>2021</b> , <i>60</i> , 21536; <i>ACS Catal.</i> <b>2024</b> , <i>14</i> , 4968, <i>ACS Catal.</i> <b>2022</b> , <i>12</i> , 15590. 对《发现、发明及创新点》中第 1, 2 项做出了创造性贡献，对应附件中代表论文 1, 2。 |

|    |   |   |    |                   |        |                                                                                                                                                                                                                                              |
|----|---|---|----|-------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 李刚 | 3 | 无 | 讲师 | 陕西师范大学            | 陕西师范大学 | 实现了可见光促进镍催化芳基卤化物与硝基芳烃的直接 C-N 偶联反应。该催化体系使用对空气稳定的 Ni(II)-芳基络合物为催化剂, 廉价易得三级胺 DIPEA 为碱, 不需要外加光敏剂。机理研究表明: 亚硝基芳烃类化合物和 Ni(I)物种可能是该反应中的两个关键中间体。相关成果发表在 <i>Angew. Chem. Int. Ed.</i> <b>2021</b> , 60, 5230。对《发现、发明及创新点》中的第 2 项做出了创造性贡献, 对应附件中代表论文 3。 |
| 杨柳 | 4 | 无 | 讲师 | 中国人民解放军<br>空军军医大学 | 陕西师范大学 | 通过激发态光敏剂来调节催化剂镍的价态实现 C-O 键的偶联是一个新的策略。采用廉价易得的有机染料氟硼二吡咯烷 (BODIPY) 作为光敏剂, 以二价金属镍为催化剂, 在可见光的照射下, 实现了以水作为羟基源的卤代芳烃羟基化反应。此外, 使用对空气稳定的 Ni(II)-芳基络合物为催化剂通过光直接激发镍催化剂, 产生一价镍中间体, 三级胺为碱, 不需要外加光敏剂, 的条件下实现了 C-O 键偶联反应。该结                                  |

|     |   |   |       |        |        |                                                                                                                                                                                                                              |
|-----|---|---|-------|--------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |   |   |       |        |        | 果为烷基芳基醚的高效合成提供了新的合成方法，也为发展光/镍协同催化的新型偶联反应提供了研究思路。该项成果信息： <i>Angew. Chem. Int. Ed.</i> <b>2018</b> , 57, 1968; <i>Angew. Chem. Int. Ed.</i> <b>2020</b> , 59, 12714。对《发现、发明及创新点》中第 1,2 项做出了创造性贡献，对应附件中代表论文 4, 5。               |
| 董建洋 | 5 | 无 | 副研究员  | 陕西师范大学 | 陕西师范大学 | 参与镍催化 Werner 盐（兼具氮源与镍源）的光化学伯芳胺合成 ( <i>Angew. Chem. Int. Ed.</i> <b>2024</b> , 63, e202314355)。参与多项光化学过渡金属催化 C-N 偶联反应的机理研究，经高分辨质谱、紫外-可见光谱、电子顺磁共振波谱等方式协助反应中间体和活性物种（Ni(I) 物种）的表征及机制研究。对《发现、发明及创新点》中第 2, 3 项做出了重要贡献，对应附件中代表论文 1。 |
| 樊 娟 | 6 | 无 | 高级实验师 | 陕西师范大学 | 陕西师范大学 | 参与实现了光诱导丰产金属催化的芳基卤化物与多种氮亲核试剂的适应性 C-N 偶联，主要参与光化学过渡金属催化 C-N 偶联反应的机理研究，经高分辨质谱、紫外-可见光谱等方式协助                                                                                                                                      |

|  |  |  |  |  |  |                                                     |
|--|--|--|--|--|--|-----------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |  | 反应中间体的表征。对《发现、发明及创新点》中第 1, 2 项做出了重要贡献, 对应附件中代表论文 1。 |
|--|--|--|--|--|--|-----------------------------------------------------|

## 七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

| 完成单位   | 排名 | 对本项目主要贡献（限 600 字）                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 陕西师范大学 | 1  | 作为本项目的依托单位，陕西师范大学为本项目的顺利完成并取得优异成果做出了重要贡献，主要表现在以下几方面：1) 组织并完成了项目策划和实施工作；2) 为项目的顺利实施提供了人力资源与优质的工作环境与场所；3) 提供了本项目所需的设备、能源、图书资料和数据库等资源。陕西师范大学图书馆、学院资料室有丰富的中外文献资料，开通了国内外主要网络期刊资料数据库，可以非常方便的直接下载国内外前沿性研究成果资料，为项目的开展研究提供了丰富的信息资源与良好的网络环境。陕西师范大学化学化工学院拥有设备先进的有机合成实验室和大型仪器测试分析平台，为本项目的顺利开展提供了充足的实验设备条件。 |
|        |    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|        |    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

## 八、完成人合作关系说明

**成果名称：**光促进丰产金属-联吡啶络合物催化构建 C-O/C-N 键偶联反应。

**完成人列表：**薛东（1）、宋戈洋（2）、李刚（3）、杨柳（4）、董建洋（5）、樊娟（6）。

本项目完成人团队自 2017 年起围绕“光促进丰产金属催化交叉偶联反应”这一核心科学问题建立了长期、稳定的实质性合作关系。团队依托应用与表面胶体教育部重点实验室，针对传统过渡金属催化中存在的条件苛刻、底物受限等瓶颈，开展了长达 5 年以上的系统性研究，在芳基胺、芳基醚及酚类化合物的光化学绿色合成领域取得了系列原创性成果。完成人之间通过共同设计实验、指导学生等方式开展了深度合作，核心合作成果均以共同署名发表高水平学术论文的形式体现。具体合作证明如下：

2017 年至 2024 年间，完成人共同发表代表性高质量论文 5 篇。其中，指导博士研究生杨柳于 2018 年率先合作发展了光氧化还原/镍双催化实现羟基化反应（代表性论文 5）；随后指导博士研究生杨柳持续合作，逐步攻克了无外加光催化剂镍芳基卤化物的醚化反应（代表性论文 4）。2018—2024 年，指导博士研究生宋戈洋进行系统性研究无外加光催化剂丰产金属催化构建 C-N 偶联（代表性论文 1, 2）。同时，与博士后李刚合作首次实现了光促进镍催化芳基卤化物与硝基芳烃的直接 C-N 偶联反应一步合成二芳胺（代表性论文 3）。

薛东（排 1）：项目总体负责人。提出了光促进丰产金属催化交叉偶联的总体研究思路，设计了核心的光促进丰产金属催化循环机制，统筹各阶段反应体系的发展，是 5 篇代表性论文的核心贡献者。

宋戈洋（排 2）：核心骨干。与薛东教授紧密合作，发展了光促进镍催化芳基 C-N 偶联反应系列性研究。通过光调控策略改变镍的价态促进镍催化偶联反应研究，实现了光促进镍催化芳基卤化物与不同 *N*-亲核试剂的 C-N 偶联反应。反应具有宽泛的底物范围、优秀的官能团兼容性、区域选择性。相关成果发表在 *Angew. Chem. Int. Ed.* **2024**, *63*, e202314355; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 21536; *ACS Catal.* **2024**, *14*, 4968, *ACS Catal.* **2022**, *12*, 15590.

李刚（排 3）：核心骨干。实现了可见光促进镍催化芳基卤化物与硝基芳烃的直接 C-N 偶联反应。该催化体系使用对空气稳定的 Ni(II)-芳基络合物为催化剂，廉价易得三级胺 DIPEA 为碱，不需要外加光敏剂。相关成果发表在 *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 5230。

杨柳（排 4）：核心骨干。采用廉价易得的有机染料氟硼二吡咯烷（BODIPY）作为光敏剂，以二价金属镍为催化剂，在可见光的照射下，实现了以水作为羟基源的卤代芳烃羟基化反应。此外，使用对空气稳定的 Ni(II)-芳基络合物为催化剂通过光直接激发镍催化剂，产生一价镍中间体，三级胺为碱，不需要外加光敏剂的条件下实现了 C-O 键偶联反应。该结果为烷基芳基醚的高效合成提供了新的合成方法，为后续团队开发更复杂的 C-N、C-O 偶联反应奠定了重要的方法学基础。该项成果信息：*Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *57*, 1968; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 12714。

董建洋（排 5）、樊娟（排 6）：重要参与者。在项目的后期深化阶段，与薛东、宋戈洋合作，参与实现了光诱导丰产金属催化的芳基卤化物与多种氮亲核试剂的适应性 C-N 偶联，主要参与光化学过渡金属催化 C-N 偶联反应的机理研究，经高分辨质谱、紫外-可见光谱、电子顺磁共振波谱等方式协助反应中间体和活性物种（Ni(I)物种）的表征及机制研究。

本说明所陈述的合作关系、研究历程及各完成人的具体贡献真实、准确。所有完成人均对本成果做出了实质性贡献，不存在挂名、剽窃、侵占他人成果等学术不端行为。如有虚假，全体完成人愿承担相应法律责任及后果。