

陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

| | |
|--------|----------------------------|
| 项目名称 | 能源小分子电催化高效转化基础研究 |
| 主要完成人 | 曹睿, 张伟, 郑浩铨, 雷海涛, 李夏亮, 张学鹏 |
| 主要完成单位 | 陕西师范大学 |

二、提名意见（适用于提各单位）

| | |
|--|--------|
| 提 名 者 | 陕西省教育厅 |
| <p>提名意见（不超过 600 字）：</p> <p>“能源小分子电催化高效转化基础研究”项目研究了电催化水分解和氧气还原电极反应过程中反应机制、物质传递和电荷转移的内在规律与调控因素等基础科学问题。</p> <p>能源小分子电催化转化反应和电极界面形态的双重复杂性，导致学界对这类电极过程缺乏清晰的微观认识。项目团队通过设计分子催化剂的配位结构和空间构型、构筑特定有序的催化剂物理和化学结构、调控分子催化剂与载体之间的化学键联方式等手段，研究了能源小分子电催化转化的动力学特性。项目团队阐明了几种析氢、析氧和氧气还原反应机制，明晰了质子、氢氧根离子等反应底物的传递对催化性能的影响，拓展了分子催化剂的固载策略并实现了催化剂与电极载体之间的快速电荷转移。</p> <p>随着能源与环境问题的日益严重，能源小分子电催化转化研究在国内外受到广泛关注。学术界研究集中在对催化剂活性和稳定性的探索，针对催化过程中的反应机制、物质传递、电荷转移等基础动力学过程的研究仍较欠缺。项目团队的研究，拓展了这一反应的动力学基本理论，相关成果处于国际领先水平，具有鲜明的原创性特点，得到了国内外学者的广泛关注和正面评价。催化剂和电极的设计思路、反应机制研究成果被国内外同行所采纳，推动了能源小分子电催化转化研究的发展。</p> <p>经审核，该项目成果材料齐全、规范。经公示，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合 2025 年度陕西省科学技术奖自然科学奖提名条件。</p> <p>提名该项目为陕西省自然科学奖 一 等奖。</p> | |
| <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。项目组与提各单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。</p> | |

三、项目简介

该项目属于能源科学技术的电化学与催化化学领域。

能源小分子电催化高效转化可以实现清洁能源的转化与存储，相关研究将为可持续能源、绿色化工等领域的理论与应用研究奠定坚实的基础。项目研究的能源小分子转化包含电催化水分解析氢析氧和氧气还原反应。电极反应过程涉及反应机制、物质传递和电荷转移三大方面的基础动力学问题。这类反应和电极界面形态的双重复杂性，导致学界对相关电极反应过程缺乏清晰的微观认识。针对这一领域的基础问题，项目团队通过设计分子催化剂的配位结构和空间构型、构筑特定有序的催化剂物理和化学结构、调控催化剂与载体之间的化学键联方式等手段，研究了能源小分子电催化高效转化电极过程的动力学特性。通过相关研究，项目团队阐明了几种氢氢、氧氧成键和氧氧断键机制，明晰了反应物种的传递对催化性能的影响规律，实现了催化剂与电极载体之间的快速电荷转移。基于相关工作，在项目完成期内团队受邀发表了关于电催化小分子转化的系列高档次综述论文：*Chem. Rev.* **2017**, *117*, 3717; *Chem. Soc. Rev.* **2021**, *50*, 2540; *Chem. Soc. Rev.* **2021**, *50*, 4804; *Coord. Chem. Rev.* **2021**, *442*, 213996; *Chem. Rev.* **2022**, *122*, 5408; *Acc. Chem. Res.* **2022**, *55*, 878; *Chem* **2021**, *7*, 1981。

科学发现一：围绕“反应机制”，阐明并调控了水分解和氧气还原过程中多种氢氢成键、氧氧成键和氧氧断键过程，认识了水分解反应和氧气还原反应的内在机制。项目团队通过电化学原位光谱技术和停流光谱技术研究快速反应过程，以具有明确结构的金属卟啉类配合物催化剂为研究对象，发展了直接合成中间体和原位捕获中间体相结合的机理研究方法，认识了多种金属氧中间体和金属氢中间体及其反应性；创新了调控关键中间体反应性与关键反应步骤的分子设计策略和结构修饰手段，设计合成了一系列性能优异的新型金属卟啉类水分解、氧还原分子催化剂。相关成果以学术论文方式发表在 *J. Am. Chem. Soc.* **2021**, *143*, 14613-14621（代表性论文1）；*Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 7576-7581（代表性论文2）；*Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 12742-12746; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 8941-8946; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 8917-8921; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 5457-5462; *CCS Chem.* **2022**, *4*, 1633-1642; *Chem. Sci.* **2019**, *10*, 2613-2622; *Chem. Sci.* **2019**, *10*, 2308-2314。

科学发现二：围绕“物质传递”，揭示了催化剂分子内部活性位点周围环境质子转移、催化剂与电解液界面底物传递调控对电催化水分解反应性能的影响规律。针对析氢反应中质子传递能够显著影响金属-氢中间体的形成和反应性质这一特性，项目团队围绕优化质子传递，在卟啉分子催化剂中引入水簇氢键网络，在水溶性高分子链上

引入支链基团调控质子传递，实现了优异的催化析氢性能。针对阳极水氧化析氧反应中的氢氧根离子传递，团队开发了多种低维材料的阵列结构来实现高效的物质传递，提出了基于基础电化学方法的电催化物质传递性能评估方案，研究了催化电位前和催化电位下的物质传递特性。在氧气还原领域，通过设计合成不对称咪唑的聚合物，调控了氧气扩散和还原性能。相关成果以学术论文方式发表在 *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202201104 (代表性论文 3); *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1700286 (代表性论文 5); *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 14848-14853; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202114310; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 15844-15848; *Sci. Bull.* **2017**, *62*, 626-632; *Chem. Sci.* **2019**, *10*, 191-197; *Chem. Sci.* **2018**, *9*, 6961-6968。

科学发现三：围绕“电荷转移”，阐明了催化剂与载体之间连接方式对电荷转移效率的影响规律，并通过构建电极电荷转移界面调控了电荷转移。项目团队在获得高效分子催化剂的基础上，发展了多种共价修饰分子催化剂到固相载体上的方法，实现了对分子催化剂与载体之间电荷转移效率的有效调控，并结合理论计算阐明了电荷转移对催化效率的影响规律，发展了高性能的多相化分子催化体系。同时，团队通过电极基底同源生长催化剂的方式构建了一系列一体整合型的电催化水分解新电极体系。通过在这类整体电极中构建催化剂与载体之间原子层面化学形式的接触，保证了高效的电荷转移，并通过原位扫描电化学阐明了催化剂界面电荷转移与催化活性位点之间的关系。相关成果以学术论文方式发表在 *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 12759-12764 (代表性论文 4); *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 8472-8476; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, *58*, 18883-18887; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *57*, 15070-15075; *Energy Environ. Sci.* **2020**, *13*, 174-182; *Adv. Energy Mater.* **2016**, *6*, 1502489。

项目团队基于电催化小分子转化中反应机制、物质传递、电荷转移等基础动力学过程的研究，拓展了这一类反应的动力学相关基本理论，指导设计了新型高性能水分解、氧气还原电催化剂和电极体系。项目实施期间，团队顺利完成了六项国家自然科学基金。项目成果受到国内外学术界关注，被国内外知名学者引用并正面评价。多个研究成果被国家自然科学基金委和科技媒体进行了新闻报道。项目完成人多次受邀在国际国内学术会议上做大会报告、主题报告和邀请报告，受邀担任欧洲化学学会 *Chemistry Europe Award* 评奖委员会委员、*ChemSusChem* 编委会主席、*Chemical Society Reviews* 顾问编委和客座编辑、*Science Bulletin* 编委、*Chinese Chemical Letters* 编委、*Journal of Electrochemistry* 编委、*Chinese Journal of Catalysis* 青年编委、*Chinese Journal of Structural Chemistry* 青年编委等学术职务。

四、客观评价

“能源小分子电催化高效转化基础研究”项目相关成果以陕西师范大学为第一通讯单位发表在 *J. Am. Chem. Soc.*; *Angew. Chem. Int. Ed.*; *Adv. Mater.*; *Energy Environ. Sci.*; *Sci. Bull.*; *Chem. Sci.*; *Adv. Energy Mater.*; *Chinese J. Catal.* 等本领域顶尖学术期刊上。其中, 19 篇论文入选 ESI 高被引论文, 1 篇论文入选 2017 年“中国百篇最具影响国际学术论文”。相关成果获批 2021 年度陕西高等学校科学技术奖一等奖。

项目研究成果受到国内外学术界关注, 被国内外知名学者引用并正面评价, 被 ACS、RSC、Wiley 等机构推荐报导。五篇代表作被他引 832 次。水氧化研究领域国际著名专家, 耶鲁大学 Gary W. Brudvig 教授和巴塞尔大学 Edwin Constable 教授在英国皇家化学会会刊 “*Chemistry World*” 中进行了新闻专题评价, 指出该工作 “*takes significant step towards cheap water oxidation catalysts*”。

在催化析氢反应方面, 英国剑桥大学 Erwin Reisner 教授在其综述中正面评价了团队阐明 metal-hydride 双分子偶联析氢工作的意义 (*Chem. Rev.* **2019**, *119*, 2752-2875)。美国加州理工学院 Jonas C. Peters 教授引用了团队的文章, 作为阐明 Ni^{III}-H 析氢关键中间体的典型案例: “*terminally bound NiIII hydride intermediates have been implicated in both stoichiometric and catalytic proton reduction mediated by Ni-based systems.*” (*J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 7827-7835)。瑞典皇家理工学院 Mårten S. G. Ahlquist 教授引用了团队的文章, 作为双分子偶联析氢的典型案例 (*J. Am. Chem. Soc.* **2021**, *143*, 2484-2490)。孙立成教授在其综述中多次引用并大篇幅正面评述了团队发展高效析氢催化剂的系统性工作 (*Joule* **2020**, *4*, 1408-1444)。加州大学 Davis 分校 Louise A. Berben 教授引用了团队的文章, 作为优化质子转移促进析氢催化的典型案例 (*J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 12299-12305)。加州大学 Berkeley 分校 Christopher J. Chang 教授引用了团队的文章, 作为性能优异析氢催化剂的典型案例 (*ACS Cent. Sci.* **2017**, *3*, 1032-1040)。悉尼大学 Yuan Chen 教授肯定了团队海水制氢相关工作 (*Energy Environ. Sci.* **2020**, *13*, 3185-3206)。

在氧电催化反应方面, 韩国科学院院士 Wonwoo Nam 教授 (*ACS Catal.* **2023**, *13*, 308) 充分肯定了 O-O 成键工作: “*Importantly, a Mn^{IV}-peroxo species was identified as an intermediate by various spectroscopic methods, ... suggesting a water nucleophilic attack pathway in the catalytic water oxidation with the Mn complex.*”。团队提出的机理研究方法和机理研究结果被多名学者采纳, 包括美国科学院院士 Daniel G. Nocera 教授 (*ACS Catal.* **2018**, *8*, 8671), 美国耶鲁大学 Victor S. Batista 教授 (*Chem* **2021**, *7*, 2101), 美国弗吉尼亚大学 Brent Gunnoe 教授 (*ACS Catal.* **2021**, *11*, 7223) 等。例如, Nocera 教授采纳机理研究结果: “*the PCET kinetics of ORR are less well-defined with the notable exception of recent studies on a Fe porphyrin and other metallo pyrrole-based*

macrocycles.”。美国科学院院士普林斯敦大学 John T. Groves 教授在其综述中正面评价了团队阐明电解质碱基在析氧催化中具有双重作用工作的意义 (*Chem. Rev.* **2018**, *118*, 2491-2553)。印度 IACS 研究院 Abhishek Dey 教授高度评价配体空间位阻调控催化选择性: “Cao and co-workers ... demonstrated a new approach for control over product selectivity, i.e., $2e/2H^+$ vs $4e/4H^+$ ORR, by tuning the steric effect of the different atropisomers. ... can strongly impact the higher O_2 binding affinity to the metal center and result in stable Co- O_2 adduct formation, which could enhance selectivity of ORR.” (*Chem. Rev.* **2022**, *122*, 12370)。美国加利福尼亚大学尔湾分校 Michael T. Green 教授借鉴轴向配体调控电子结构设计: “These charge population predictions are consistent with calculations on synthetic ferryl porphyrins that indicate that more donating axial ligands (e.g., hydroxide vs imidazole) produce more negative charge on the ferryl oxygen.” (*J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 19272)。李灿研究员在其综述中正面评价了团队利用配体调控金属中心电子结构, 实现高效析氧催化的工作 (*Adv. Mater.* **2019**, *31*, 1902069)。斯德哥尔摩大学 Björn Åkermark 教授多次引用并大篇幅正面评述了团队发展高效析氧催化剂的系统性工作 (*Chem. Rev.* **2014**, *114*, 11863-12001)。耶鲁大学 Robert H. Crabtree 和 Gary W. Brudvig 教授引用了团队的文章, 作为利用分子内质子转移促进析氧催化的典型案例 (*Chem. Sci.* **2020**, *11*, 1683-1690)。加州大学 Irvine 分校 Jenny Y. Yang 教授多次引用并正面评述了团队理性设计分子结构, 促进分子内质子转移, 实现高效析氧催化的系统性工作 (*Chem. Sci.* **2018**, *9*, 2750-2755)。韩国蔚山科技学院 Kwang Kim 教授采用了团队提出的水氧化镍电极体系解释相关工作 (*Nat. Sustain.* **2020**, *3*, 556)。柏林工业大学 Matthias Driess 教授肯定了团队提出的锰基水氧化活性中心的催化机理 (*Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, *58*, 16569-16574)。

项目完成人曹睿获国家自然科学基金委“杰青”项目资助, 多次受邀在国际吡啉与酞菁学术会议(美国水牛城 2020、德国慕尼黑 2018、中国南京 2016)、国际配位化学会议(日本仙台 2018)和国际电化学会议(美国达拉斯 2019、美国西雅图 2018)等国际重要会议做大会报告、主题报告和邀请报告, 获 2020 年度国际吡啉与酞菁协会“青年科学家奖”、教育部霍英东青年教师基金, 受邀担任 *ChemSusChem* 编委会主席、欧洲化学学会 *Chemistry Europe Award* 评奖委员会委员、*Chemical Society Reviews* 顾问编委和客座编辑、*Chinese Journal of Catalysis* 青年编委和客座编辑、*Science Bulletin*, *Chinese Chemical Letters* 和 *Journal of Electrochemistry* 编委。项目完成人张伟获陕西省(青年)人才计划、国家级青年人才(青年学者)项目资助, 受邀担任 *Chinese Chemical Letters* 和 *Chinese Journal of Structural Chemistry* 青年编委。项目完成人郑浩铨受邀担任 *Frontiers in nanotechnology* 杂志 Review Editor, 获陕西省(青年)人才计划项目和陕西省杰出青年基金项目资助。

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，应公开发表 2 年以上，即 2023 年 8 月 1 日前)

| 序号 | 论文专著名称 | 刊名 | 作者 | 年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页) | 发表时间 (年月日) | 通讯作者 (含共同) | 第一作者 (含共同) | 国内作者 | 他引总次数 | 检索数据库 | 知识产权是否归国内所有 |
|----|--|--|---|----------------------------|----------------|--|-----------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------------|
| 1 | Identifying Intermediates in Electrocatalytic Water Oxidation with a Manganese Corrole Complex | Journal of the American Chemical Society | Xialiang Li, Xue-Peng Zhang, Mian Guo, Bin Lv, Kai Guo, Xiaotong Jin, Wei Zhang, Yong-Min Lee, Shunichi Fukuzumi, Wonwoo Nam, Rui Cao | 2021 年 143 卷 14613-14621 页 | 2021 年 9 月 1 日 | Shunichi Fukuzumi, Wonwoo Nam, Rui Cao | Xialiang Li, Xue-Peng Zhang | 李夏亮, 张学鹏, 吕斌, 郭凯, 靳晓童, 张伟, 曹睿 | 85 | WoS | 是 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|--|---------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------|--|-----|-----|---|
| 2 | Enzyme-Inspired Iron Porphyrins for Improved Electrocatalytic Oxygen Reduction and Evolution Reactions | Angewandte Chemie International Edition | Lisi Xie, Xue-Peng Zhang, Bin Zhao, Ping Li, Jing Qi, Xinai Guo, Bin Wang, Haitao Lei, Wei Zhang, Ulf-Peter Apfel, Rui Cao | 2021 年 60 卷 7576-7581 页 | 2021 年 2 月 26 日 | Rui Cao | Lisi Xie, Xue-Peng Zhang | 谢丽思, 张学鹏, 赵斌, 李萍, 齐静, 郭新爱, 王斌, 雷海涛, 张伟, 曹睿 | 166 | WoS | 是 |
| 3 | Metal-Corrole-Based Porous Organic Polymers for Electrocatalytic Oxygen Reduction and Evolution Reactions | Angewandte Chemie International Edition | Haitao Lei, Qingxin Zhang, Zuozhong Liang, Hongbo Guo, Yabo Wang, Haoyuan Lv, Xialiang Li, Wei Zhang, Ulf-Peter Apfel, Rui Cao | 2022 年 61 卷 e20220110 4 页 | 2022 年 4 月 19 日 | Rui Cao | Haitao Lei, Qingxin Zhang | 雷海涛, 张清鑫, 梁作中, 郭鸿波, 王亚博, 吕浩源, 李夏亮, 张伟, 曹睿 | 79 | WoS | 是 |
| 4 | Highly Curved Nanostructure-Coated Co, N-Doped Carbon Materials for Oxygen Electrocatalysis | Angewandte Chemie International Edition | Zuozhong Liang, Ningning Kong, Chenxi Yang, Wei Zhang, Haoquan Zheng, Haiping Lin, Rui Cao | 2021 年 60 卷 12759-12764 页 | 2021 年 4 月 13 日 | Haoquan Zheng, Haiping Lin, Rui Cao | Zuozhong Liang | 梁作中, 孔宁宁, 杨晨曦, 张伟, 郑浩铨, 林海平, 曹 | 176 | WoS | 是 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------------|---|--------------------|--|-----------------------|----------------|--------------------|--------------|---|-----|-----|---|
| 5 | Hierarchical Co(OH)F Superstructure Built by Low-Dimensional Substructures for Electrocatalytic Water Oxidation | Advanced Materials | Shanhong Wan, Jing Qi, Wei Zhang, Weina Wang, Shaokang Zhang, Kaiqiang Liu, Haoquan Zheng, Junliang Sun, Shuangyin Wang, Rui Cao | 2017 年 29 卷 1700286 页 | 2017 年 6 月 6 日 | Wei Zhang, Rui Cao | Shanhong Wan | 万山红, 齐静, 王渭娜, 张少康, 刘凯强, 郑浩铨, 孙俊良, 王双印, 曹睿 | 326 | WoS | 是 |
| 合 计 | | | | | | | | | 832 | | |
| 补充说明（视情填写）：无 | | | | | | | | | | | |

六、主要完成人情况表

| | | | |
|--|-------------|------|--------|
| 姓 名 | 曹 睿 | 排 名 | 1 |
| 行政职务 | 教育部重点实验室副主任 | 技术职称 | 教授 |
| 工作单位 | 陕西师范大学 | 完成单位 | 陕西师范大学 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>阐明了多种小分子转化反应机制，证明了金属氢物种双分子偶联 H-H 成键和水亲核进攻高价金属氧物种 O-O 成键；发展了多种调控 H-H 和 O-O 成键过程的分子设计策略，并以此为基础设计合成了一系列性能优异的新型金属卟啉类水分解分子催化剂；以分子催化相关研究结果，指导调控固体材料的电子结构，设计合成了性能优异的固体材料催化剂。学术贡献对应科学发现一、二、三。为代表性论文 1-5 的通讯作者。</p> | | | |

| | | | |
|--|--------|------|--------|
| 姓 名 | 张伟 | 排 名 | 2 |
| 行政职务 | 科技处副处长 | 技术职称 | 教授 |
| 工作单位 | 陕西师范大学 | 完成单位 | 陕西师范大学 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>阐明了钴基水氧化催化剂中金属配位构型对氧氧成键的影响；在催化剂与电解质界面阐明了氢氧根离子在水氧化中的物质传递过程；基于整体电极调控了催化剂与电极基底之间的电荷转移并原位观测了电荷转移界面。学术贡献对应科学发现一、二、三。为代表性论文 5 的通讯作者，1-4 的参与作者。</p> | | | |

| | | | |
|--|--------|------|--------|
| 姓 名 | 郑浩铨 | 排 名 | 3 |
| 行政职务 | 无 | 技术职称 | 教授 |
| 工作单位 | 陕西师范大学 | 完成单位 | 陕西师范大学 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>设计构筑了卷曲碳材料催化剂载体，阐明了催化剂载体与催化剂之间的高效电荷转移过程，调控了催化材料晶体结构，实现了高效的氧电催化反应。学术贡献对应科学发现三。为代表性论文 4 的通讯作者，代表性论文 5 的参与作者。</p> | | | |

| | | | |
|------|--------|------|--------|
| 姓 名 | 雷海涛 | 排 名 | 4 |
| 行政职务 | 无 | 技术职称 | 副研究员 |
| 工作单位 | 陕西师范大学 | 完成单位 | 陕西师范大学 |

对本项目主要学术贡献：

参与了电催化析氢和析氧反应金属卟啉、咔咯类催化剂的设计合成与催化性能研究。学术贡献对应科学发现一、二。为代表性论文 3 的第一作者，代表性论文 2 的参与者。

| | | | |
|------|--------|------|--------|
| 姓 名 | 李夏亮 | 排 名 | 5 |
| 行政职务 | 无 | 技术职称 | 副研究员 |
| 工作单位 | 陕西师范大学 | 完成单位 | 陕西师范大学 |

对本项目主要学术贡献：

阐明了锰咔咯的电催化水氧化反应机制；明晰了分子催化剂与电极载体材料连接方式对催化效率的影响规律；发现了多相化分子催化体系的催化效率会随着连接基团和载体自身电荷转移效率的增强而显著提高。学术贡献对应科学发现一、三。为代表性论文 1 的第一作者，代表性论文 3 的参与者。

| | | | |
|------|--------|------|--------|
| 姓 名 | 张学鹏 | 排 名 | 6 |
| 行政职务 | 无 | 技术职称 | 副教授 |
| 工作单位 | 陕西师范大学 | 完成单位 | 陕西师范大学 |

对本项目主要学术贡献：

基于理论计算研究方法，佐证了锰咔咯和铁卟啉体系氧电催化的反应机制。为代表性论文 1 和 2 的第一作者。

七、主要完成单位情况表

| | |
|--|--------|
| 单位名称 | 陕西师范大学 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本项目主要在陕西师范大学完成。学校为教育部“一流学科”建设高校，化学学科在最新的学科排名中进入 B+行列。学校具备良好的科研环境，拥有教育部、国家外国专家局“高等学校学科创新引智基地”（应用表面与胶体化学）；拥有应用表面与胶体化学教育部重点实验室、陕西省生命分析化学重点实验室、陕西省大分子科学重点实验室等多个省部级重点实验室。学院公共仪器平台具有超导傅立叶数字化核磁共振仪、电子顺磁共振光谱仪、原位红外光谱仪、高分辨质谱仪、MADI-TOF 质谱仪、气相色谱质谱联用仪、离子交换色谱仪、冷场发射扫描电子显微镜、X-ray 光电子能谱仪等仪器，陕西师范大学具备该项目所需的文献及数据库资源。为本项目顺利完成提供坚实保障。</p> | |

八、完成人合作关系说明

本项目主要完成人曹睿与张伟、李夏亮、张学鹏合作完成代表性论文 1；曹睿与张伟、雷海涛、张学鹏合作完成代表性论文 2；曹睿与张伟、雷海涛、李夏亮合作完成代表性论文 3；曹睿与张伟、郑浩铨合作完成代表性论文 4；曹睿与张伟、郑浩铨合作完成代表性论文 5。

完成人合作关系情况汇总表

| 序号 | 合作方式 | 合作者/项目排名 | 合作时间 | 合作成果 | 证明材料 |
|----|------|--------------------------------|-----------------|--|---------|
| 1 | 论文合著 | 李夏亮(5) 张学鹏(6) 张伟(2)曹睿(1) | 2017.09-2021.09 | Identifying Intermediates in Electrocatalytic Water Oxidation with a Manganese Corrole Complex, J. Am. Chem. Soc. 2021, 143, 14613–14621. | 代表性论文 1 |
| 2 | 论文合著 | 张学鹏(6) 雷海涛(4) 张伟(2)曹睿(1) | 2018.09-2021.02 | Enzyme-Inspired Iron Porphyrins for Improved Electrocatalytic Oxygen Reduction and Evolution Reactions, Angew. Chem. Int. Ed. 2021, 60, 7576-7581. | 代表性论文 2 |
| 3 | 论文合著 | 雷海涛(4) 李夏亮(5) 张伟(2)曹睿(1) | 2018.09-2022.04 | Metal-Corrole-Based Porous Organic Polymers for Electrocatalytic Oxygen Reduction and Evolution Reactions, Angew. Chem. Int. Ed. 2022, 61, e202201104. | 代表性论文 3 |
| 4 | 论文合著 | 张伟(2)郑浩铨(3)曹睿(1) | 2019.09-2021.04 | Highly Curved Nanostructure-Coated Co, N-Doped Carbon Materials for Oxygen Electrocatalysis, Angew. Chem. Int. Ed. 2021, 60, 12759-12764. | 代表性论文 4 |
| 5 | 论文合著 | 张伟(2)郑浩铨(3)曹睿(1) | 2014.07-2017.06 | Hierarchical Co(OH)F superstructure built by low-dimensional substructures for electrocatalytic water | 代表性论文 5 |

| | | | | | |
|---|------|------------------------------|-----------------|--|------|
| | | | | oxidation, Adv. Mater. 2017, 29, 1700286. | |
| 6 | 共同获奖 | 曹睿(1)张伟(2)郑浩铨(3)雷海涛(4)李夏亮(5) | 2014.07-2020.12 | 《分子电催化小分子活化基础研究》 陕西省高等学校科学技术一等奖 | 奖励证明 |