

陕西省自然科学奖公示信息

(2026年度)

一、项目基本情况

项目名称	空气-水合成绿氨理论创新与工程化
主要完成人	杨贵东、黄起中、李贺、谢涛、欧鸿辉、严孝清
主要完成单位	西安交通大学、国能榆林化工有限公司

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	陕西省知识产权局	提名等级	☒ 一等奖 ☐ 二等奖及以上
提名意见：氨作为国家战略资源，其绿色制备技术意义重大。该项目在国家自然科学基金和国家重点研发计划的资助下，围绕太阳能驱动的空气-水合成绿氨关键科学问题开展系统研究，取得以下重要科学发现：1) 通过构建超纳晶界主-助共生催化新体系及水供质子催化界面能质输运反应强化催化剂模型，解决氮氧化物吸附难、水分子高效分解面临的能量吸收效率低、载流子迁移速率慢的科学难题；2) 提出非对称电催化反应器结构构筑新策略，发明 100 cm² “阴极返混强化-阳极强制对流”的一体化高效传质电催化原型反应器，强化阴极反应传质，破解阳极气泡滞留导致传质缓慢且不均匀等难题。3) 通过建立物料传递-电荷迁移-反应速率通达匹配的系统集成构建理论，攻克光电催化合成氨全流程示范系统集成创新的工程难题。最终形成了以空气-水为原料的合成绿氨变革性工艺，实现全球首例百吨级太阳能驱动的空气-水合成绿氨成套示范技术从 0 到 1 重大突破。 项目成果兼具理论创新与工程实践价值，5 篇代表作发表在 Nat.Comm.、AIChE J.、ACS Catal.、Appl. Catal.B: Environ.等国际权威期刊上，他引 714 余次，授权专利 13 件，核心理论被国际同行评价为“促进太阳能驱动绿氨合成领域突出贡献”。相关技术已在国能榆林化工有限公司成功示范。项目第一完成人获国家自然科学基金青年科学基金项目(A 类)、作为首席科学家主持千万级国家重点研发计划项目；获侯德榜化工创新奖/青年奖；获陕西省教学成果特等奖。培养国家级青年人才 4 人，陕西省优博/化工学会优博/教育部创业明星/交大研究生标兵等 7 人次。担任氟氮化工新材料全国重点实验室副主任、西安交大-牛津大学催化国际联合实验室主任，发起了丝绸之路能源催化与技术青年学者研讨会等会议，显著提升我国化工学科国际影响力。 该项目在合成氨领域实现从理论原创到工程示范的全链条突破，符合陕西省自然科学一等奖的评选标准，特此郑重推荐。			

二、提名意见（适用于专家提名）

姓 名			
专家类型	□国家最高科学技术奖获得者 □中国科学院院士 □中国工程院院士 □国家科学技术奖获奖项目第一完成人（需注明获奖等次） □省最高科学技术奖获奖人（或 xxxx 年省科学技术最高成就奖、xxxx 年基础研究重大贡献奖获奖人） □Xxxx 年省科学技术奖第一完成人（需注明获奖等次）	提名等级	□一等奖 □二等奖及以上
责任专家	□是 □否		
提名意见：			
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。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。			

三、项目简介

绿氨合成是我国能源化工的战略方向，也是全球科技竞争的前沿高地。太阳能驱动的合成绿氨技术为实现"双碳"目标提供了创新方案，将推动化工产业高端低碳转型。然而，鉴于 $\text{N}\equiv\text{N}$ 三键的高键能及反应体系的光-电-流多场耦合特性，相关研究还存在理论体系缺乏、催化活性低、反应器/系统能效差等挑战。

氨是重要的大宗基础化学品，但占全球合成氨主流的哈伯法因高能耗、高碳排放面临严峻挑战。常温常压电催化合成氨极富绿色低碳特征，但必须突破现有活化 $\text{N}\equiv\text{N}$ 键的理论制约、创新工艺，破解催化剂面临的活性-选择性两难困境。本项目在国家自然科学基金和国家重点研发计划的资助下，围绕太阳能驱动的空气-水合成绿氨体系开展了系统研究，主要发现如下：1) 通过构建超纳晶界主-助共生催化新体系及水供质子催化界面能质输运反应强化催化剂模型，解决氮氧化物吸附难、水分子高效分解面临的能量吸收效率低、载流子迁移速率慢的科学难题；2) 提出非对称电催化反应器结构构筑新策略，发明 100 cm^2 “阴极返混强化-阳极强制对流”的一体化高效传质电催化原型反应器，强化阴极反应传质，破解阳极气泡滞留导致传质缓慢且不均匀等难题。3) 通过建立物料传递-电荷迁移-反应速率通达匹配的系统集成构建理论，攻克合成绿氨全流程示范系统集成创新的工程难题。最终形成了以空气-水为原料的合成绿氨变革性工艺，实现全球首例百吨级太阳能驱动的空气-水合成绿氨成套示范技术从 0 到 1 重大突破。开辟了具有战略意义空气-水制氨新方向，为我国能源和化工产业结构低碳化转型和“十五五规划”战略目标实现提供了有力支撑。

5 篇代表性论文被 Nat. Commun., Angew., Chem. 等著名刊物 SCI 他引 714 次。三个发现点的创新研究被来自 50 余个国家/地区专家学者进行了广泛引用和高度评价。项目成果引用者包括中国科学院院士、美国艺术与科学院院士、英国皇家化学会院士、欧洲科学院院士及多个著名国际期刊的主编或副主编。项目执行期间，第一完成人获国家自然科学基金青年科学基金项目(A 类)、入选教育部青年长江学者等荣誉称号。此外，第一完成人作为首席科学家获批千万级国家重点研发计划项目，受邀任《Frontiers in Environmental Chemistry》副主编及《催化学报》、《化工进展》等多种期刊编委；并受邀在国际国内大会做邀请报告、担任大会主席 60 余次。本项目培养了多位优秀的化工人才，省部级人才 3 名，培养 5 名博士生获西安交通大学优秀博士研究生标兵称号。

四、客观评价

5 篇代表性论文被 Nat. Commun.、Angew., Chem.、Energ. Environ. Sci.、等著名刊物 SCI 他引 714 次, 2 篇入选 ESI 热点论文。三个主要发现点的创新研究被来自 50 余个国家/地区、960 余个机构的 7000 余位学者进行了广泛引用和高度评价, 产生了重要学术影响。项目成果引用者包括中国科学院院士、美国艺术与科学院院士、美国哲学院院士、英国皇家化学会院士、美国能源部首席科学家及《Journal of Materials Chemistry A》、《Applied Catalysis B》、《Chemical Engineering Journal》等多个著名国际期刊的主编或副主编。以下为代表性国内外知名学者对本项目的第三方评价摘录:

1、发现点一的国际权威评价: “超高的”、“理想有效的”、“具有可持续发展前景”

1) 欧洲科学院院士、英国皇家化学会会士王传义教授正面评价本发现点, 认为所设计的催化剂在提升光催化性能方面具有显著潜力。相比哈伯法, 所提出的绿氨研究路线具有更加显著的可持续发展前景 (**offer greater environmental sustainability**) (代表性引文 1)。

2) 新加坡国家工程院院士、新加坡国家科学院院士、亚太材料科学院院士、新加坡国立大学终身教授 John WANG 正面评价了铁基尖晶石催化剂对强化 (**enhance, promote**) NRR 反应活性的研究价值和潜力, 认为本发现点提出的催化材料构筑模型具有明确的方向性和创新性 (代表性引文 1)。

3) 国家杰出青年科学基金获得者, 中国石油大学朱文帅教授认为本发现点为太阳能驱动光催化合成氨领域发展做出了贡献 (代表性引文 1)。

4) 澳大利亚科学院院士、澳大利亚技术与工程学院院士、新南威尔士州皇家学会院士、IChemE 院士和澳大利亚工程师荣誉院士 Rose Amal 教授等人认为本发现点清晰的证实 (**clearly confirm**) 了 2D/2D 结构可提供高速的 (**high speed**) 电子迁移通道, 获得超高的 (**superior**) 催化反应活性 (代表性引文 2)。

5) 欧洲科学院院士、Chemical Engineering Journal 主编、Journal of Environmental Engineering 主编及 Applied Catalysis B: Environmental 等多家国际知名学术期刊编委 Dionysios D. Dionysiou 教授指出, 本发现点构建的纳米异质结为高效电荷分离提供了理想有效的 (**efficient**) 通道, 对提升光催化分解水效率具有重要意义 (代表性引文 2)。

6) 中国科学院院士郭烈锦教授在评价该发现点时指出, 本项目构建的 **Z 型异质结复合光催化剂 (Z-scheme heterojunctions)** 体系为解决电荷分离和传递动力学受限难兼顾的问题提供了理论依据与创新思路参考 (代表性引文 2)。

2、发现点二的国际权威评价: “实现多传质因素协同考量”、“流动池多物理场耦合模型整合了扩散、迁移、对流及酸碱平衡”、“合理和准确”。

1) 意大利共和国“ENI 奖”和“罗伯托·皮奥内利奖”获得者、意大利都灵理工大学 Federico Bella 教授正面评价本发现点, 认为反应器的质量传输与界面 pH 对产物分布

起关键调控作用 (play a key role in the distribution of the products), 并认为低流速及较低局部 pH(即便仍为碱性)条件下**更有利于提高 NH_3 选择性**(with NH_3 selectivity being higher at low flow rates and lower local pH), 这一认识对理解电催化反应器中的传质与微环境效应具有重要指导意义 (代表性引文 4)。

2) 科罗拉多州立大学 Reza Nazemi 教授对本发现点给予高度肯定, 充分认可本研究在流动池反应器电催化模型构建方面的原创性贡献, 明确指出流速作为流动池优化的核心调控参数, 其变化可显著改变反应物停留时间, 并进而**对反应效率与选择性产生决定性影响** (significantly affect the residence time and, consequently, its efficiency and selectivity)。该认识深刻揭示了传质过程与反应动力学之间的内在耦合机制, 突破了传统模型忽视流体动力学影响的局限, 为高效电催化硝酸根还原过程的精准调控提供了新的理论依据与操作策略 (代表性引文 4)。

3) 斯坦福大学化学工程系 William A. Tarpeh 教授对本发现点给予高度肯定, 认为本研究所建立的**完整电池模型率先实现了对扩散、迁移与对流等多传质因素的综合考量**, 系统揭示了上述传质过程对 ENR 反应效率与选择性的协同调控机制, 为深入理解电催化反应器内流体动力学行为及传质强化策略提供了关键理论依据 (showed the effect of diffusion, migration, and convection on ENR in a full cell model)。该模型突破了以往仅关注单一传质因素的局限, 显著提升了复杂电化学体系的多物理场耦合认知水平, 对高效硝酸根电还原过程的工程化设计具有重要指导意义 (代表性引文 4)。

3、发现点三的国际权威评价：“对高效氮物种加氢转化至关重要”、“具有面向能源存储的重要应用潜力”、“为直接利用空气实现可持续氨合成提供了新路径”

1) 中国科学院院士韩布兴教授正面评价本发现点, 认为界面活性氢物种的精准调控是实现硝酸根高选择性、高效率电催化制氨的关键, 所揭示的水活化—活性氢生成机制**对高效氮物种加氢转化至关重要** (is paramount for achieving high selectivity and efficiency) (代表性引文 5)。

2) 中国科学院院士包信和教授正面评价本发现点, 将该成果作为“ $\text{N}_2 \rightarrow \text{NO}_x \rightarrow \text{NH}_3$ ”合成氨工艺路线的重要研究基础, 认为通过空气-水电催化还原耦合构建的绿氨新路径**具有面向能源存储的重要应用潜力** (a $\text{N}_2 \rightarrow \text{NO}_x \rightarrow \text{NH}_3$ pathway for energy storage) (代表性引文 5)。

3) 澳大利亚科学院院士 Rose Amal 教授正面评价本发现点, 认为等离子体空气活化耦合电化学转化的技术路径为**直接利用空气实现可持续氨合成提供了新路径** (sustainable ammonium synthesis from air) (代表性引文 5)。

4) 瑞典工程院院士、欧洲科学院院士 Markus Antonietti 教授评价本发现点, 认为本发现点阐明了电子转移数量与化学反应性之间的内在关联, 是**优化硝酸盐还原反应的关键** (代表性引文 5)。

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 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间	通 讯 作 者	第 一 作 者	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	Boosting Photocatalytic Nitrogen Fixation via Constructing Low Oxidation-State Active Sites in the Nanoconfined Spinel Iron Cobalt Oxide	ACS Catalysis	李贺, 夏梦阳, 种奔, 肖航, 张斌, 林波, 杨伯伦, 杨贵东	2022 年 12 卷 1036 1 页	2022 年 8 月 9 日	杨贵东	李贺	李贺, 夏梦阳, 种奔, 肖航, 张斌, 林波, 杨伯伦, 杨贵东	89	89	是
2	Preparation of 2D/2D g-C ₃ N ₄ nanosheet@ZnIn ₂ S ₄ nanoleaf heterojunctions with well-designed highspeed charge transfer nanochannels towards high efficiency photocatalytic hydrogen evolution	Applied Catalysis B: Environment	林波, 李贺, 安华, 郝文斌, 魏进家, 代艳竹, 马传生, 杨贵东	2018 年 220 卷 542 页	2017 年 8 月 24 日	杨贵东	林波	林波, 李贺, 安华, 郝文斌, 魏进家, 代艳竹, 马传生, 杨贵东	44 8	44 8	是

3	五重孪晶铜 纳米线@聚吡 咯制备及其 电催化硝酸 盐还原制氨	化工学报	严孝清, 赵瑛,张 宇哲,欧 鸿辉,黄 起中,胡 华贵,杨 贵东	2024 年 75 卷 1519 页	2024 年 3 月 28 日	杨 贵 东	严 孝 清	严孝 清, 赵 瑛, 张宇 哲, 欧鸿 辉, 黄起 中, 胡华 贵, 杨贵 东	/	/	是
4	Mass transfer and electrochemic al behavior of nitrate reduction to ammonia in electrocatalyti c flow cell reactor	AIChE J	吕杨,陈 家和, 白盘威, 谢涛,刘 敬军,杨 贵东	2023 年 70 卷 e182 62 页	2023 年 10 月 4 日	杨 贵 东	吕 杨	吕 杨, 陈家 和, 白盘 威, 谢 涛, 刘敬 军, 杨贵 东	22	22	是
5	Efficient ammonia synthesis from the air using tandem non-thermal plasma and electrocatalysi s at ambient conditions	Nature Communi cations	刘威,夏 梦阳,赵 超,种 奔,陈家 和,李 贺,欧鸿 辉,杨贵 东	2024 年 15 卷 3524 页	2024 年 4 月 25 日	杨 贵 东	刘 威	刘 威, 夏梦 阳, 赵 超, 种 奔, 陈家 和, 李 贺, 欧鸿 辉,	15 5	15 5	是

合 计	71 4	714	
补充说明（视情填写）：			

六、主要完成人情况表

姓 名	杨贵东	排 名	第一
行政职务	院长		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：对发现点 1、2、3 做出了突出贡献，提出太阳能驱动的空气-水绿色合成氨总体研究思路与技术路线，主持建立水供质子界面能质输运、氮分子吸附活化及纳米尺度“三传一反”等理论体系；组织开展催化材料、反应器及系统集成研究，牵头形成空气-水合成绿氨成套技术并推动百吨级示范系统建设，对项目主要科学发现和技术创新作出核心贡献，是代表性论文 1，2，3，4，5 的通讯作者。			

姓 名	黄起中	排 名	第二
行政职务	副总经理		
技术职称	高级工程师		
工作单位	国能榆林化工有限公司		
完成单位	国能榆林化工有限公司		
对本项目主要学术贡献：负责空气-水合成绿氨示范装置的工程建设、组织实施、运行管理及企业侧资源协调，参与工艺放大、设备集成和工程运行方案优化，推动实验室技术向规模化连续运行和工程示范转化，为百吨级合成氨示范系统建设及稳定运行作出重要贡献。			

姓 名	李贺	排 名	第三
行政职务	无		
技术职称	助理教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：开展催化材料结构设计、活性位调控及构效关系研究，参与大面积自支撑电极构筑和电催化合成氨性能评价，揭示关键活性中心对氮物种活化和反应动力学的调控机制，为高性能催化电极开发提供重要支撑。			

姓 名	谢涛	排 名	第四
行政职务	系主任		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：围绕空气-水合成绿氨过程中的传质、传荷和反应耦合问题，开展流动反应器结构设计、流场调控及“三传一反”过程研究，参与一体化反应器开发与放大，为提高反应物传质效率、降低传递阻力及实现系统高效运行作出重要贡献。			

姓 名	欧鸿辉	排 名	第五
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：参与空气-水合成绿氨关键材料开发、界面反应调控及催化性能评价，开展电极结构、反应条件与催化效率之间构效关系研究，并参与反应体系和工艺参数优化，为提升合成氨活性、选择性及长期稳定性作出重要贡献。			

姓 名	严孝清	排 名	第六
行政职务	副所长		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：开展纳米结构电极制备、界面调控及电催化性能研究，参与关键反应中间体和催化机制分析，为铜基高效合成氨催化剂设计及工程电极技术发展作出重要贡献。			

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
对本项目主要学术贡献：西安交通大学依托化学工程、能源化工及催化科学等学科优势和科研平台，围绕太阳能驱动空气-水合成绿氨开展了系统研究，在水供质子界面能质输运、氮物种吸附活化、催化材料结构调控、反应器传递过程强化及系统集成等方面形成了系列原创理论与技术成果；创制了高性能催化材料和大面积自支撑电极，形成了光电催化反应器及成套工艺关键技术，推动了相关成果由基础研究向工程放大和示范应用延伸，为百吨级太阳能驱动的空气-水合成绿氨示范系统建设提供了重要的理论基础、技术支撑和科研平台保障。	

单位名称	国能榆林化工有限公司
对本项目主要学术贡献：国能榆林化工有限公司依托大型能源化工装置、工程技术体系及产业化条件，在空气-水合成绿氨技术的工程放大、装置建设、系统集成与运行验证等方面发挥了重要作用，推动实验室研究成果向规模化连续运行转化；围绕工艺流程衔接、关键设备匹配、运行参数优化及长周期稳定性开展工程验证与技术完善，为百吨级太阳能驱动的空气-水合成绿氨示范系统的建成、稳定运行及后续产业化推广提供了重要的工程条件和应用支撑。	

完成人合作关系说明

项目完成人黄起中高级工程师是项目工程化实施与示范应用的重要合作成员。2020 年起，黄起中负责合成氨相关装置的建设、组织实施与运行管理，并与杨贵东教授团队围绕空气-水合成氨技术的工程放大、装置集成及示范运行开展深入合作，为项目技术由实验室研究向工程化、规模化示范转化提供了重要支撑。

项目完成人李贺博士于 2016-2022 年在杨贵东教授课题组攻读博士研究生学位，2022 年 9 月入选西安交通大学青年优秀人才计划并加入杨贵东教授团队，担任课题组核心骨干，是项目合作研究团队的核心成员。

项目完成人谢涛教授为杨贵东教授团队核心骨干，长期参与项目相关研究工作，是项目合作研究团队的重要核心成员。

项目完成人欧鸿辉副教授 2022 年 10 月入选西安交通大学青年拔尖人才计划并加入杨贵东教授团队，担任课题组核心骨干，是项目合作研究团队的核心成员。

项目完成人严孝清副教授于 2015-2021 年在杨贵东教授课题组攻读博士研究生学位，2021 年 3 月入选西安交通大学青年优秀人才计划并加入杨贵东教授团队，担任课题组核心骨干，是项目合作研究团队的核心成员。

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	黄起中/2	2021 年 09 月 -2024 年 08 月	论文题目：五重孪晶铜纳米线@聚吡咯制备及其电催化硝酸盐还原制氨	代表论文 3
2	论文合著	李贺/3	2016 年 09 月 -2024 年 08 月	论文题目：Boosting photocatalytic nitrogen fixation via constructing low oxidation-state active sites in the nanoconfined spinel iron cobalt oxide. Preparation of 2D/2D g-C ₃ N ₄ nanosheet@ZnIn ₂ S ₄ nanoleaf heterojunctions with well-designed high speed charge transfer nanochannels towards high efficiency photocatalytic hydrogen evolution. Efficient ammonia synthesis from the air using tandem non-thermal plasma and electrocatalysis at ambient conditions.	代表论文 1、2、5
3	论文合著	谢涛/4	2012 年 09 月 -2024 年 08 月	论文题目：Mass transfer and electrochemical behavior of nitrate reduction to ammonia in electrocatalytic flow cell reactor	代表论文 4
4	论文合著	欧鸿辉/5	2023 年 09 月 -2024 年 08 月	论文题目：Efficient ammonia synthesis from the air using tandem non-thermal plasma and electrocatalysis at ambient conditions. Mass transfer and electrochemical behavior of nitrate reduction to ammonia in electrocatalytic flow cell reactor	代表论文 3、5
5	论文合著	严孝清/6	2015 年 09 月 -2024 年 08 月	论文题目：五重孪晶铜纳米线@聚吡咯制备及其电催化硝酸盐还原制氨	代表论文 3