

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	基于增强光谱技术的超灵敏传感及应用
主要完成人	方吉祥，尤红军，张玲玲
主要完成单位	西安交通大学

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input checked="" type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
<p>提名意见：</p> <p>本项目聚焦化学测量学中的谱学新原理与新技术，面向国家在食品安全、环境污染、生物医学等方面的重大需求，取得了多项原创性成果。项目创新性地提出并阐明了高密度尖刺结构增强热点耦合效应、提升电磁场增强的新机制；发现了金属介观转变新现象，阐释了其非传统晶化新机制；提出“软包裹”调控策略，解决了三维受限空间内贵金属纳米晶产物易向外扩散的技术难题；提出了利用轻质漂浮颗粒物来消除咖啡环效应的学术思想和基于环糊精吸附剂的“吸附-解吸附”策略，实现分子的高效选择性富集。</p> <p>相关成果在 <u><i>Chemical Society Reviews</i></u>、<u><i>Nature Communications</i></u> (3)、<u><i>Advanced Materials</i></u>、<u><i>Advanced Functional Materials</i></u> 等国际权威期刊发表 SCI 论文 108 篇，5 篇代表性论文被 SCI 引用 684 次，他引 616 次。研究成果受到了包括 9 位中外科学院院士和海内外知名学者的积极引用，以及 <i>Nature Reviews Materials</i>、<i>Chemical Society Reviews</i>、<i>Nature Synthesis</i>、<i>Nature Protocols</i>、<i>Chemical Reviews</i> 等顶级期刊的正面评述。项目研究过程中获得 5 项国家青年基金和面上项目，申请发明专利 11 项，已授权 9 项。申报材料符合陕西省自然科学奖提名要求。</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。“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。</p>			

二、提名意见（适用于专家提名）

姓 名			
专家类型	<input type="checkbox"/> 国家最高科学技术奖获得者 <input type="checkbox"/> 中国科学院院士 <input type="checkbox"/> 中国工程院院士 <input type="checkbox"/> 国家科学技术奖获奖项目第一完成人（需注明获奖等次） <input type="checkbox"/> 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） <input type="checkbox"/> Xxxx 年省科学技术奖第一完成人（需注明获奖等次）	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
责任专家	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否		
提名意见：			
<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。“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。</p>			

三、项目简介

纳米尺度下光与物质相互作用的新现象、新规律、新机制的研究是纳米光学与纳米光电子学研究的热点问题。表面增强拉曼散射（SERS）光谱是借助表面等离激元的物理增强机制来提升拉曼散射强度的一种分子振动谱学技术，在物理、化学、生物医学及单分子检测等诸多领域具有重要的应用前景。然而，大多数分子的拉曼散射截面很低，光谱信号很弱。目前已发展的 SERS 增强方法检测灵敏度低，该技术在单分子 SERS 检测的优势尚未得到充分发挥。因此，发展电磁场局域化增强新原理、新技术、新方法是解决当前单分子 SERS 技术瓶颈的核心科学问题。

本项目以表面等离激元纳米光学在基于增强光谱技术的超灵敏传感应用为导向，以介观尺度纳米粒子聚集体结构及表面拓扑形貌调控为主线，经过 10 余年的努力，在新型等离激元纳米结构电磁场增强机理、纳米铸造制备贵金属介孔结构的新方法、纳米晶体生长新理论、富集型 SERS 传感新策略等方面，开展了创新性和系统性的研究工作，取得了如下研究成果：

发现点 1：构建了一类基于避雷针效应的新型多刺结构 SERS 传感芯片。项目完成人基于纳米光学避雷针(lightning rod)效应，构建了新型多刺结构 SERS 芯片。实现了多种海胆状金、银介观超结构的制备，获得了优异的 SERS 特性，并将其应用于食品安全检测、环境污染物监测及肿瘤治疗、电化学催化等领域。发表代表性论文 *Advanced Materials*, 2014, 26, 2431，其中关于空心金-银合金海胆状结构的工作，具有迄今文献所报道最大的单位面积上尖刺数量。该结构表现出超高的 SERS 检测灵敏度 (10^9)。代表性论文被 Wiley 出版社 Materials Views 等学术媒体作为研究亮点报道。韩国首尔大学 Jwa-Min Nam 院士，贵金属纳米材料领域权威专家，在 *Chemical Science*, 2021, 12, 6355 中引用项目完成人团队的两篇论文来说明“尖刺结构增强热点效应”。

发现点 2：解决了纳米铸造中产物向介孔模板外扩散这一长期技术难题。如何获得单元尺寸及间距可调的纳米周期结构是当前纳米加工中的巨大挑战。项目完成人首次将“软包裹”纳米铸造技术引入到贵金属纳米粒子超结构及有序介孔结构的制备，成功解决了贵金属纳米铸造过程中产物向介孔模板外扩散这一长期技术难题，在国际上较早的将介孔材料纳米铸造技术引入到表面等离激元领域，获得了超灵敏 SERS 检测能力，代表性工作发表在 *Nature Communications*, 2018, 9, 521，并被 Nature Research Communities 作为亮点报道“The tomorrow of mesoporous materials in plasmonics”：<https://communities.springernature.com/posts/>。项目完成人从大孔薄壁介孔分子筛获得灵感，提出了介孔纳米铸造来制备具有超小纳米间隙（2 纳米）贵金属阵列结构，相关成果发表在 *Advanced Functional Materials*, 2017, 27, 1603233, *Advanced Optical Materials*, 2015, 3, 404 上。代表性论文被中国科学院院士赵东元教授、江雷教授、美国科学院院士 Chad A. Mirkin 教授在 *Chemical Society Reviews*, 2025, 54, 6927–6972、*Advanced Materials*, 2024, 36, 2311460、*Nature Reviews Materials*, 2022, 7, 428 中引用团队研究成果，并将其作为多孔金属合金纳米颗粒的典型案例。

发现点 3：揭示了金属介观晶体的非传统晶化新机制。在纳米晶体生长的非传统

晶化途径研究方面，项目主要完成人在金属介观晶体的原创性研究是国际上介观晶体领域较早的典型工作之一。深入研究了金属介观转变过程，揭示了以纳米粒子为媒介的自组装过程驱动力等物理问题，系统总结了基于 LaMer 曲线的纳米晶形核及熟化过程的新机制，为等离激元介观结构调控及其在增强光谱中的应用奠定了扎实的理论基础。代表性工作发表在 *Chemical Society Reviews*, 2011, 40, 5347、*Nano Letters*, 2010, 10, 5006–5013、*ACS Nano*, 2011, 5, 9442–9449、*Small*, 2018, 14, 1702565 等权威期刊上。中科院院士邹志刚教授、俞书宏教授、韩国工程院院士 Taeghwan Hyeon 教授等在 *Nature Synthesis*, 2022, 1, 138–146、*Chemical Reviews*, 2018, 118, 3209–3250、*Nature Reviews Materials*, 2016, 1, 16034 中引用本团队研究成果，将其作为介观晶体通过颗粒聚集方式生长的典型报道。

发现点 4：构筑了典型的富集型 SERS 基底并显著提升检测灵敏度。为了实现待测分子的空间局域化效应及分子的空间定位，项目完成人提出通过滑移衬底表面待测分子与增强纳米颗粒共浓缩富集策略。在液滴干燥过程中利用轻质漂浮颗粒来消除咖啡环效应，并利用双颗粒策略实现分子的高度浓缩富集及空间定位。此外，完成人团队设计了一种由环糊精网状结构及磁性 Fe_3O_4 颗粒组成的复合材料，通过快速“吸附-解吸附”过程，可以实现待测分子在 1~2 分钟内，~1000 倍的浓缩富集。代表性工作发表在 *Nature Communications*, 2020, 11, 2603、*Nature Communications*, 2021, 11, 2603、*Analytical Chemistry*, 2019, 91, 4687、*ACS Sensors*, 2020, 5, 781–788。中科院院士田中群教授、徐红星教授在 *Chemical Society Reviews*, 2025, 54, 1453–1551、*Nano Letters*, 2024, 24, 11116–11123 中引用相关成果，作为典型的单粒子纳米传感器方法和 SERS 检出概率的统计学分析案例。

本项目相关成果在 *Chemical Society Reviews*、*Nature Communications* (3)、*Advanced Materials*、*Advanced Functional Materials*、*ACS Nano*、*Nano Letters* (2) 等期刊发表 SCI 论文百余篇，其中影响因子大于 10 的论文二十余篇，5 篇代表性论文被 SCI 引用 684 次（他引 616 次），申请发明专利 11 项，获授权 9 项。做国内外会议大会报告和邀请报告 50 余次，主要完成人任中国物理学会光散射专业委员会副秘书长、《光散射学报》等国际国内学术期刊编委及副主编。

项目执行期间，项目成员获得国家自然科学基金和面上基金资助。项目负责人入选教育部新世纪优秀人才计划、陕西省青年科技新星，获得陕西省高等学校科学技术一等奖。完成人团队科技成果获得无锡中德伯尔生物技术有限公司，陕西煤业化工技术研究院有限责任公司及上海如海仪器设备有限公司的专利转让及技术转化。团队所研制的小型化远程拉曼光谱样机，其性能指标已经达到 0~30 米， $1\mu\text{g}\sim 1\text{mg}/\text{cm}^2$ 检出能力。实现了关键零部件国产化，填补了国内远程拉曼光谱仪器研发的空白，代表了国内领先，世界先进水平。

四、客观评价

本项目相关成果在 *Chemical Society Reviews*、*Nature Communications* (3)、*Advanced Materials*、*Advanced Functional Materials*、*ACS Nano*、*Small*、*Nano Letters* 等国际权威期刊发表 SCI 论文百余篇，5 篇代表论文 SCI 引用 684 次，他引 616 次。研究成果得到了包括多位美国科学院院士 Chad A. Mirkin 教授、韩国科学院院士 Jwa-Min Nam 教授、韩国工程院院士 Taeghwan Hyeon 教授，中国科学院院士江雷教授、田中群教授、徐红星教授、邹志刚教授、俞书宏教授、赵东元教授（9 位中外院士）和众多国际著名学者在 *Nature Reviews Materials*、*Chemical Society Reviews*、*Nature Synthesis*、*Nature Protocols*、*Chemical Reviews* 等权威高水平期刊的引用和高度评价。以下为代表性的国际知名学者及学术组织对本项目的第三方评价摘录：

发现点 1：构建了一类基于避雷针效应的新型多刺结构 SERS 传感芯片

①代表性论文 1 发表在 *Advanced Materials*, 2014, 26, 2431 上，被 Wiley 出版社 Materials Views 等学术媒体作为研究亮点报道。②韩国首尔大学 Jwa-Min Nam 院士，贵金属纳米材料领域权威专家，在 *Chemical Science*, 2021, 12, 6355 中引用项目完成人团队的两篇论文来说明“尖刺结构增强热点效应”。③南京大学工学院院长聂书明教授在 *Chemical Reviews*, 2015, 115, 10489–10529 中，将项目完成人所在团队的多刺金银合金纳米颗粒作为等离子共振调控至红外波段的典型案例。④新加坡国立大学 Utkur Mirsaidov 教授在 *Advanced Functional Materials*, 2021, 31, 2008639 一文中，评价完成人团队的金银多刺的单颗粒 SERS 工作为“大量尖刺和银的存在在 SERS 应用中表现出良好的性能”。⑤多个权威期刊，如 *NPG Asia Materials*, 2018, 10, e462 一文同时引用团队 6 篇关于 SERS 工作的成果。*Chemical Communications*, 2012, 48, 7003 一文利用两个段落篇幅引用了团队 4 篇 SERS 相关文章。表明完成人团队设计地基于避雷针效应地新型 SERS 传感器得到了 SERS 领域专家的广泛关注和高度评价。

发现点 2：解决了纳米铸造中产物向介孔模板外扩散这一长期技术难题

①代表性论文 3 发表在权威期刊 *Nature Communications*, 2018, 9, 521 上，并被 *Nature Research Communities* 作为亮点报道“The tomorrow of mesoporous materials in plasmonics”：<https://communities.springernature.com/posts/>。②中国科学院院士复旦大学赵东元教授，介孔材料领域国际顶尖学者，在权威期刊 *Chemical Society Reviews*, 2025, 54, 6927–6972 和 *Advanced Materials*, 2024, 36, 2311460 中引用团队论文及表征图片，并赞评其“实现了固液液界面介孔纳米结构合成的重大突破（achieved a breakthrough）”。③中国科学院院士，化学所江雷教授发表在 *Advanced Materials*, 2019, 31, 1804508 综述文章中引用该发现点的典型图片作为其文章的一附全图（该文章的图 20），并用一整段文字说明在三维 nanochannels 内材料的限制生长制备“独特”纳米结构（unique structure）吸引了广泛的兴趣（extensive interest）。④美国科学院、医学院、工程院和美国艺术与科学院四院院士 Chad A. Mirkin 教授在 *Nature Reviews Materials*, 2022, 7, 428 中引用团队研究成果，并将其作为多孔金属合金纳米颗粒的典型形貌。⑤纳米材料领域权威专家昆士兰大学 Yusuke Yamauchi 教授，在高水平期刊 *Nature*

Protocols, 2023, 18, 3126–3154 和 *Advanced Materials*, 2020, 32, 2004654 多次引用团队论文，并引用论文图片作为介孔材料形核生长的典型案例。

发现点 3：揭示了金属介观晶体的非传统晶化新机制

①代表性论文 2 发表在国际权威综述期刊 *Chemical Society Reviews*, 2011, 40, 5347 上，是国际上介观晶体领域较早的典型工作之一，相关工作被 Royal Society of Chemistry 出版社等学术媒体作为研究亮点报道。②中科院院士邹志刚教授在材料合成领域顶级期刊 *Nature Synthesis*, 2022, 1, 138–146 中引用本项目的研究成果，并将其作为介观晶体形核生长的典型案例。③中科院院士俞书宏教授在化学领域权威综述 *Chemical Reviews*, 2018, 118, 3209–3250 中引用本团队研究成果，作为复杂层级结构的各向异性晶体生长过程的定义性解释。④韩国工程院院士 Taeghwan Hyeon 教授在材料领域顶级综述期刊 *Nature Reviews Materials*, 2016, 1, 16034 中三次引用本团队研究成果，将其作为介观晶体通过颗粒聚集方式生长的典型报道。⑤德国康斯坦茨大学物理化学系主任 Helmut Cölfen 教授在 *Chemical Society Reviews*, 2016, 45, 5821–5833 中引用本团队研究成果，表明了项目完成人团队在介观晶体领域的原创性工作得到了国内外学术同行的高度认可。

发现点 4：构筑了典型的富集型 SERS 基底并显著提升检测灵敏度

①代表性论文 4 和 5 近期发表在 *Nature Communications*, 2020, 11, 2603 和 *Nature Communications*, 2021, 12, 6849 上，被网易等多家官方媒体作为 SERS 进展的亮点工作进行报道。②中科院院士田中群教授在 *Chemical Society Reviews*, 2025, 54, 1453–1551 中引用本团队的研究成果，并高度评价“Fang 等引入了基于浮力等离子体-微粒到单粒子纳米传感器方法”。③中科院院士徐红星教授在 *Nano Letters*, 2024, 24, 11116–11123 中引用相关成果，作为 SERS 检出概率的统计学分析案例。④西班牙维戈大学 Miguel A. Correa-Duarte 教授，纳米材料领域知名学者，在 *Advanced Optical Materials*, 2025, 34, e01376 中引用本团队工作，解释“多孔聚合物基质提供了高表面积，增加了靶分子的吸附位点，进而提高了 SERS 检测灵敏度”。⑤浙江大学杨世宽教授、清华大学朱永法教授在 *Nature Communications*, 2022, 13, 7807、*Advanced Functional Materials*, 2024, 34, 2406533 中引用团队研究成果，表明本团队在富集型 SERS 领域的研究获得了国内外同行的广泛认可。

除上述期刊论文的引用与评价外，项目实施阶段主要完成人科技成果获得无锡中德伯尔生物技术有限公司，陕西煤业化工技术研究院有限责任公司及上海如海仪器设备有限公司的专利转让及技术转化。本团队所研制的小型化远程拉曼光谱样机，其性能指标已经达到 0~30 米，1 μ g~1mg/cm² 检出能力。实现了关键零部件国产化，填补了国内远程拉曼光谱仪器研发的空白，解决了背包式小型化远程拉曼光谱仪的卡脖子技术难题，该指标代表了国内领先，世界先进水平。

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	Highly Sensitive, Uniform, and Reproducible Surface-Enhanced Raman Spectroscopy from Hollow Au-Ag Alloy Nanourchins	<i>Advanced Materials</i>	Zhen Liu, Zhongbo Yang, Bo Peng, Cuong Cao, Chao Zhang, Hongjun You, Qihua Xiong, Zhiyuan Li, Jixiang Fang	2014 年 26 卷 2431 页	2014 年 1 月 21 日	Jixiang Fang, Qihua Xiong, Zhiyuan Li	Zhen Liu	刘真, 杨中波, 张超, 尤红军, 李志远, 方吉祥	235	SCI	是
2	Mesocrystals: syntheses in metals and applications	<i>Chemical Society Reviews</i>	Jixiang Fang, Bingjun Ding, Herbert Gleiter	2011 年 40 卷 5347 页	2011 年 7 月 19 日	Jixiang Fang	Jixiang Fang	方吉祥, 丁秉钧	175	SCI	是
3	A general soft-enveloping strategy in the templating synthesis of mesoporous metal nanostructures	<i>Nature Communications</i>	Jixiang Fang, Lingling Zhang, Jiang Li, Lu Lu, Chuansheng Ma, Shaodong Cheng, Zhiyuan Li, Qihua Xiong, Hongjun You	2018 年 9 卷 521 页	2018 年 2 月 6 日	Jixiang Fang, Hongjun You	Jixiang Fang	方吉祥, 张玲玲, 李江, 路璐, 马传生, 成绍鹁, 李志远, 尤红军	90	SCI	是

4	Buoyant particulate strategy for few-to-single particle-based plasmonic enhanced nanosensors	<i>Nature Communications</i>	Dongjie Zhang, Leqin Peng, Xinglong Shang, Wenxiu Zheng, Hongjun You, Teng Xu, Bo Ma, Bin Ren, Jixiang Fang	2020 年 11 卷 2603 页	2020 年 5 月 25 日	Jixiang Fang, Bin Ren	Dongjie Zhang, Leqin Peng	张东杰, 彭乐钦, 尚兴隆, 郑文秀, 尤红军, 徐腾, 马波, 任斌, 方吉祥	52	SCI	是
5	Ultra-rapid and highly efficient enrichment of organic pollutants via magnetic mesoporous nanosponge for ultrasensitive nanosensors	<i>Nature Communications</i>	Lingling Zhang, Yu Guo, Rui Hao, Yafei Shi, Hongjun You, Hu Nan, Yanzhu Dai, Danjun Liu, Dangyuan Lei, Jixiang Fang	2021 年 12 卷 6849 页	2021 年 11 月 25 日	Jixiang Fang	Lingling Zhang, Yu Guo	张玲玲, 郭雨, 郝锐, 史亚飞, 尤红军, 南虎, 代艳竹, 刘丹骏, 雷党愿, 方吉祥	64	SCI	是
合 计									616	SCI	是
补充说明（视情填写）： 5 篇代表性论文均为中科院 Top 期刊。代表性论文 4 和 5 为近 5 年发表的高水平研究成果。											

六、主要完成人情况表

姓 名	方吉祥	排 名	1
行政职务	无		
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： 本项目总负责人。其主要贡献包括：①基于纳米光学避雷针效应，成功构建了一类新型多刺结构 SERS 传感芯片；②深入揭示了金属介观转变过程中以纳米粒子为媒介的自组装驱动力与生长机制；③创新性地将介孔材料纳米铸造技术引入等离激元纳米间隙结构，实现了贵金属纳米粒子超结构及有序介孔材料的可控制备；④构筑了基于漂浮颗粒、滑移衬底和环糊精吸附剂等多种富集型 SERS 基底，有效将目标分子驱动至等离激元热点区域，显著提升了检测灵敏度。是发现点 1-4（代表性论文 1-5）的核心贡献者。			

姓 名	尤红军	排 名	2
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： 项目主要完成人。主要贡献包括：①设计了多种具有高活性与稳定性的多级结构金、银纳米颗粒，展现出优异的 SERS 性能与应用效果；②开展了基于纳米模板铸造技术的均匀纳米超结构 SERS 衬底研究；③设计了双颗粒驱动液滴浓缩富集策略用于 SERS 高灵敏检测的新方法。该完成人是发现点 1、3、4（代表性论文 1、3、4、5）的重要合作者与贡献者。			

姓 名	张玲玲	排 名	3
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
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>项目次要完成人。具体贡献包括：①利用纳米模板铸造技术，有效解决了介孔纳米颗粒在合成过程中向模板外扩散的问题；②探索了磁性颗粒-环糊精复合结构在“吸附-解析附”富集型 SERS 基底中的应用机制。该完成人是发现点 3、4（代表性论文 3，5）的重要贡献者。</p>	

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>为本项目完成人方吉祥、尤红军和张玲玲的工作单位和本项目研究工作的完成单位。支撑了本项目的以下研究工作：1) 基于避雷针效应研究了新型多刺结构表面增强拉曼散射（SERS）芯片，并构筑了多种海胆状和尖刺状的金、银介观超结构，获得了优异的 SERS 特性及其在食品安全检测、肿瘤治疗等方面的应用性能；2) 深入探究了金属介观转变过程，揭示了纳米粒子自组装的驱动力等物理机制，系统发展了基于 LaMer 曲线的纳米晶成核与熟化新理论，为等离激元介观结构调控及其光谱增强应用提供了重要理论支撑；3) 将介孔材料纳米铸造技术引入到贵金属纳米粒子超结构及有序介孔结构的制备，成功解决了贵金属纳米铸造过程中，产物向介孔模板外扩散这一长期技术难题；4) 深入研究了分子与纳米颗粒的相互作用机制，揭示了分子浓缩富集过程驱动力等物理问题及 SERS 检测新策略。</p> <p>完成单位为以上研究工作提供了研究场所，实验设备和办公设施，以及相应的管理服务工作。</p>	

完成人合作关系说明

(1) 本项目第一完成人方吉祥教授与第二完成人尤红军教授师出同门，自 2006 年起即在同一课题组共同致力于介观晶体、等离激元纳米结构及表面增强拉曼散射 (SERS) 等方向的系统研究。两人合作创立“纳米光学与生物传感实验室”，在长期科研合作中共同发表了包括代表性论文 1、3、4、5 在内的一系列研究成果。

(2) 第三完成人张玲玲为方吉祥教授指导的博士生，后留校工作。张玲玲于 2016 年加入纳米光学与生物传感实验室进行硕博连读阶段的研究工作，主要参与介孔贵金属纳米材料的可控合成与性能优化、富集型 SERS 传感器的设计开发及应用研究，合作贡献体现在代表性论文 3 和 5 中。

项目组成员合作关系紧密、成果显著。除上述代表性论文外，三位完成人还共同发表学术论文百余篇，其中影响因子大于 10 的论文达 20 余篇，体现出持续而富有成效的科研协作与学术影响力。

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	论文合作	方吉祥/1 尤红军/2	2006 年 9 月 至今	论文合著	代表论文 1、3、4、 5
2	论文合作	方吉祥/1 张玲玲/3	2016 年 9 月 至今	论文合著	代表论文 3、5
3					
4					
5					
.....					
(不限 条目)					