

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

非晶合金黏弹性力学行为研究

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该项目成果属于非晶合金黏弹性力学行为研究领域。被推荐人获得科技部中法杰出青年科研人员交流项目，陕西省杰出青年科学基金项目，“香江学者计划”，中国材料大会非晶与合金分会杰出青年科学家奖等人才项目，及多项国家自然科学基金和陕西省自然科学基金的持续资助下，完成了重要学术突破。项目开创性地提出综合多种因素，在不同时间和空间激励下深入探究非晶合金黏弹性力学变形机理，突破了以往仅关注单一因素的局限，为全面、系统地理解非晶合金的微观结构与力学性能之间的复杂关系奠定了坚实基础。取得以下原创性成果：

(1) 首次揭示了固定时间域/超低频区域的类液态行为与非晶合金低温黏弹性表现— β 弛豫之间存在本征关联，阐明了高熵非晶合金静态力学与动力学之间的内在联系。

(2) 揭示了组元混合焓对 β 弛豫行为及塑性变形能力的影响规律，同时阐明了微合金化作用下模型合金微观结构的演化机制。

(3) 揭示了结构非均匀性与非晶合金黏弹性力学性能之间的本征关联，为改善非晶合金的延展性提供了理论支撑。

(4) 揭示了非晶合金黏弹性力学中应力弛豫过程从应力驱动机制向热激活机制的转变，深入地理解了动态非均匀性和结构弛豫机制的内禀关联。

(5) 揭示了非晶合金高温力学性能与应力弛豫行为的内在关联，对提升其塑性具有重要贡献。

鉴于被推荐人在非晶合金黏弹性力学行为研究领域所取得的杰出成果，特推荐其申报陕西省自然科学奖项目二等奖。

三、项目简介

该项目聚焦于非晶合金黏弹性力学行为的研究，通过深入探索非晶合金在不同时间尺度动力学激励下的微观结构非均匀性特征及其演化规律，揭示非晶合金微观结构非均匀性与动力学非均匀性之间的内在关联。该项目选取了典型的非晶合金体系作为研究对象，综合运用实验研究、理论分析以及分子动力学模拟等多种研究手段，从原子扩散和宏观力学响应等多个角度出发，系统地研究了非晶合金的微观结构非均匀性及其在不同动力学激励下的响应机制。该项目的研究成果不仅有望为新型非晶合金的设计开发、综合力学性能的改善与提高提供重要的实

验技术、数据积累和理论指导，而且对于满足工程应用中对非晶合金性能的特殊需求具有重要的实践意义。该项目的研究思路是综合多重因素，基于微观、宏观多尺度方法，将非晶合金在外加载荷和温度作用下的微观结构非均匀性与宏观尺度的力学现象进行耦合分析，从而深入揭示非晶合金微观结构非均匀性的本质特征。

通过该项目的研究，成功解决了非晶合金粘弹性力学行为的三个关键科学问题：

(1) 从原子扩散的独特视角出发，深入探索非晶合金在长时间扩散激励下，其黏弹性力学行为相关的结构响应及其演化机制，成功实现了对非晶合金固有微观结构非均匀性的定量描述，为理解黏弹性力学行为提供了微观层面的量化依据。

(2) 从时间尺度这一关键维度入手，借助分子动力学模拟这一有力工具结合实验传统手段，研究结构在不同空间尺度上针对黏弹性力学激励的响应，揭示了结构非均匀性演化与非晶合金微观结构非均匀性之间紧密的关联机制，进一步深化了对黏弹性力学行为中微观结构变化的理解。

(3) 基于实验研究和理论分析，从宏观力学响应这一直观角度出发，揭示了非晶合金在变形过程中，与黏弹性力学行为紧密相关的非均匀性演化规律，为从宏观层面把握非晶合金的黏弹性力学行为提供了重要依据。

该项目的研究成果具有重要的科学价值和广泛的应用前景。通过深入研究非晶合金的黏弹性力学行为，该项目不仅为理解非晶合金的微观结构非均匀性与其他相关性能之间的关联提供了新的思路和方法，而且丰富和完善了现有的非晶合金结构非均匀性理论体系，有助于更深刻地理解非晶合金微观非均匀性对其宏观力学性能及其微观机制的影响。

该项目在国际知名期刊如 *Physical Review Letters*, *International Journal of Plasticity* 以及 *Acta Materialia* 等本领域顶级学术期刊发表相关学术论文 100 余篇，其研究成果得到了国内外同行的高度认可和广泛关注。此外，被推荐人 2022 年获陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖(第一完成人)，2023 年及 2025 年两次获陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖二等奖(第一完成人)，2022 年和 2023 年连续两次获得陕西省科技工作者创新创业大赛三等奖(第一完成人)，并以第一作者出版中文专著一部《黏弹性理论》。该项目研究成果作为重要研究方向和支撑，申请获批了陕西省先进无序金属材料研究创新引智基地和西安非晶固体物理及力学国际科技合作基地。

四、客观评价

所发表学术论文被英国剑桥大学、美国密歇根大学(安娜堡)、美国威斯康辛大学麦迪逊分校、德国哥廷根大学、日本东北大学、美国伊利诺伊大学-香槟分校及法国国家科研中心等 80 余家研究机构在 *Nature*, *Nature Communications*, *Science Advances*, *Physical Review Letters*, *Progress in Materials Science*, *International Journal of Plasticity*, *Acta Materialia* 以及 *Physical Review B* 等 SCI 期刊他引 2000 余次, 单篇最高他引 400 余次, SCI 论文检索 H 因子为 37, 其中 5 篇论文入选 ESI 高被引论文, 1 篇论文入选 ESI 热点论文。被推荐人入选美国斯坦福大学和爱思唯尔(Elsevier)“年度科学影响力排行榜”榜单和“生涯科学影响力排行榜”榜单。

代表性论文 1 的客观评价:

中国科学院院士, 西安交通大学孙军教授在 *Acta Materialia*, 2023, 257: 119196 中, 引用被推荐人关于高熵非晶合金应力松弛工作, 并与其研究结果进行对比分析, 再次证实高熵非晶合金在过冷液相区具有较低的动态非均匀性: “Our findings are consistent with previous experimental studies, which point out that the as-quenched HEMGs exhibit a relatively low level of dynamical heterogeneity, similar to that observed in supercooled liquids [46].” ([46]为被推荐人工作)

中国科学院院士, 中国科学院物理研究所汪卫华研究员在中国科学院和国家自然科学基金委员会共同主办的高水平学术期刊 *Science China Materials*, 2024, 67: 983-990 中, 引用被推荐人报道的 β 弛豫与类液态区域比例以及流动单元分布之间的相关性, 对被推荐人工作给予肯定。如: “Because β relaxation correlates well with structural/dynamical heterogeneities and defects, such as liquid-like regions, flow units, and shear transformation zones [4,20-24], we further examine the elastic and structural heterogeneities on different length scales (micrometer and nanometer scales) as well as stress-induced relaxation by the nanoindentation method, from which the relaxation spectra are recorded.” ([21]为被推荐人的工作)

代表性论文 2 的客观评价:

美国国家工程院院士、美国科学院院士、中国科学院外籍院士, 清华大学高华健教授在 *Applied Mechanics Reviews*, 2020, 72: 050801 中引用了被推荐人在非晶合金微观结构弛豫行为与塑性变形方面的工作, 表明当前实验和模拟关注于单一加载模式下的金属玻璃塑性强化, 进而引出交变应力状态下的变形失效行为: “The deformation and failure mechanism of BMGs subjected to cyclically varying stresses and strains are thus a topic of scientific and technological interest. Despite this practical importance, existing experimental and simulation studies on BMGs have mainly focused on their plasticity enhancement under monotonic loading [96–108].” ([108]为被推荐人工作)。

美国国家工程院院士, 中国工程院外籍院士, 香港城市大学刘锦川教授在 *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 514: 108-115 中引用了被推荐人的工作,

进一步阐明具有高非晶形成能力的非晶合金组分宽分布特点，并指出其对原材料的纯度十分敏感：“It is generally recognized that the amorphous alloys exhibit a large composition range for high amorphous forming ability (AFA) [6], yet are extremely sensitive to the purity of the raw materials [7–10].” ([7]为被推荐人工作)。

代表性论文 3 的客观评价：

高层次人才计划获得者，中国科学院力学研究所蒋敏强研究员在 *Fundamental Research*, 2024, 4(5): 1266-1271 中引用了被推荐人的工作，描述了比热容与温度之间的关系，以及变形对玻璃材料比热容的影响。还指出了微观结构（固有结构）在其中的作用，为材料科学和热物理研究提供了重要的理论依据：“All C_p data decrease with decreasing temperature and approach zero if $T \rightarrow 0$ K. The deformation increases the C_p by shallower inherent structures (ISs) of glasses [32,33].” ([33]为被推荐人工作)。

代表性论文 4 的客观评价：

中国科学院院士，中国科学院物理研究所汪卫华研究员在 *Nature Communications*, 2023, 14: 540 中引用被推荐人在非晶合金力学弛豫方面的基础工作，指出不同能量状态下的非晶合金具有不同的扩展指数 β ，进一步表明超冷态和玻璃态的松弛机制本质上是不同的：“However, various values of stretching exponent β were also found. The stress relaxation of CuZrAl MGs below T_g shows $\beta \sim 0.4-0.5$, while viscosity equilibration or aging for supercooled metallic liquids finds $\beta \sim 0.7-0.9$, indicating fundamentally different relaxation mechanisms in supercooled and glassy states [19,20].” ([20]为被推荐人工作)。

高层次人才计划获得者，浙江大学蒋建中教授在 *Scripta Materialia*, 2020, 186: 268-271 中清晰地指出了被推荐人报道了在应力松弛过程中松弛时间曲线的双阶段转变行为，这一发现对于理解非晶合金的力学行为和微观结构演化具有重要意义：“For the as-cast $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{46}\text{Al}_8$ MG, Qiao et al. [18] reported a transition on the curve of relaxation time at about 450 K under the stress relaxation.” (其中[18]为被推荐人工作)。

代表性论文 5 的客观评价：

美国约翰斯-霍普金斯大学教授，日本东北大学资深荣誉教授陈明伟在 *Physical Review Letters*, 2017, 119: 215501 上肯定了被推荐人关于应力松弛方面的工作，其通过结合差示扫描量热法和调幅原子力显微镜，发现暗区随着过量焓的释放而缩小，并在 β 弛豫期间充当原子局部平移运动的位点：“By combining differential scanning calorimetry and AM AFM, the dark regions have been found to shrink with the release of excess enthalpy [12], which act as fertile sites for the localized translational motions of atoms during β relaxation [45].” (其中[45]为被推荐人工作)。

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）

（按照表格所示栏目填写支撑该项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过 8 篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表 2 年以上即 2023 年 8 月 1 日以前公开发表。所列代表作及论文应以省内单位或个人为主要完成单位，署名第一单位（标号为 1 的单位）应为国内单位。

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”、“第一作者（含共同第一作者）”和“国内作者”，均应基于论文的全部作者进行填写，不得只填写该项目完成人或少填漏填。

其中，“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。）

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	Intrinsic Correlation Between the Fraction of Liquidlike Zones and the B Relaxation in High-Entropy Metallic Glasses	Physical Review Letters	Y.J. Duan L.T. Zhang J.C. Qiao Yun-Jiang Wang Y. Yang T. Wada H. Kato J.M. Pelletier E. Pineda D. Crespo	2022 年 129 卷 17550 1	2022 -10	J.C. Qiao E. Pineda	Y.J. Duan	段亚娟 张浪淳 乔吉超 王云江 杨勇	60	SCI	是

2	Understanding of Micro-Alloying on Plasticity in $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{47-x}\text{Al}_7\text{Dy}_x$ ($0 \leq x \leq 8$) Bulk Metallic Glasses under Compression: Based on Mechanical Relaxations and Theoretical Analysis	International Journal of Plasticity	J.C. Qiao Y. Yao J.M. Pelletier L.M. Keer	2016 年 82 卷 62- 75 页	2016 -07	J.C. Qiao Y. Yao	J.C. Qiao	乔吉超 姚尧	110	SCI	是
3	Revealing the structural heterogeneity of metallic glass: Mechanical and nanoindentation	International Journal of Mechanical Sciences	K. Tao J.C. Qiao Q.F. He K.K. Song Y. Yang	2021 年 201 卷 10646 9	2021 -07	J.C. Qiao Q.F. He	K. Tao	陶凯 乔吉超 赫全锋 宋凯凯 杨勇	95	SCI	是
4	Transition from Stress-Driven to Thermally Activated Stress Relaxation in Metallic Glasses	Physical Review B	J.C. Qiao Yun-Jiang Wang L.Z. Zhao L.H. Dai D. Crespo, J.M. Pelletier, L.M. Keer, Y. Yao	2016 年 94 卷 10420 3	2016 -09	Yun-Jiang Wang Y. Yao	J.C. Qiao	乔吉超 王云江 赵林志 戴兰宏 姚尧	46	SCI	是
5	Characteristics of stress relaxation kinetics of $\text{La}_{60}\text{Ni}_{15}\text{Al}_{25}$ bulk metallic glass	Acta Materialia	J.C. Qiao Yun-Jiang Wang J.M. Pelletier, Leon M. Keer, Morris E. Fine, Y. Yao	2015 年 98 卷 43- 50 页	2015 -10	J.M. Pelletier Y. Yao	J.C. Qiao	乔吉超 王云江 姚尧	58	SCI	是
6											

7											
8											
合 计									369	SCI	是

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

（所列完成人应为在陕个人，或与在陕个人合作的我国其他地域的个人（**第一完成人必须为全职在陕的个人**），且是“代表性论文专著”主要学术思想的提出者，并在“代表性论文专著”中有署名。应按表格要求逐项填写。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。同一人同一年度只能作为一个提名项目的完成人参加陕西省科技奖的评审。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。

工作单位：根据人事关系填写完成人现工作的单位，已退休的填写退休前的工作单位。

完成单位：填写完成人参与该项目主要研究工作时所在单位，应为国内法人单位。如涉及多个单位，应根据贡献大小填写一个单位。完成单位与奖励证书关联，请根据实际情况审慎填写。

对该项目贡献：不超过 300 字。应具体写明完成人对该项目做出的实质性贡献，并注明代表性论文专著编号。

填报时括号部分内容删除。）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对该项目贡献
乔吉超	1	副院长	教授	西北工业大学	西北工业大学	本项目负责人，全面把控研究方向，提出创新性学术思想，为项目奠定理论基础。深入研究非晶合金原子流动性演化规律，突破传统认知局限，揭示了原子流动性在多因素耦合作用下的动态演变过程。明确了物理时效对非晶合金结构弛豫的显著影响，填补了该领域研究空白。采用准点缺陷理论对非晶合金动态弛豫机制进行系统性描述，创新性地剖析了原子尺度缺陷在动态弛豫过程中的关键作用机制。在流变行为研究方面，提出完整的高温应力松弛实验与理论分析方法，准确预测了非晶合金在高温条件下的应力松弛行为。深入探讨了非晶合金在不同应力水平下的蠕变机制，为优化高温力学性能、拓展高温应用范围提供了关键指导。相关贡献对应代表性论文 1-5。

段亚娟	2	/	教授	西北工业大学	西北工业大学	主要完成人之一，对高熵非晶合金的玻璃转变过程进行了深入研究，揭示了非晶合金微观结构非均匀性与弛豫机制及变形载体之间的内在关联。通过动态力学分析仪，结合剪切转换区模型，系统地探究了高熵非晶合金的动态力学弛豫和变形行为，并成功建立了高熵非晶合金动态力学弛豫、蠕变机制与结构非均匀性之间的联系。通过高温蠕变和应力松弛实验，发现高熵非晶合金在高温下具有更低的表观激活能和更高的脆度指数，这表明其在高温环境中展现出更优异的热稳定性。这一发现不仅揭示了非晶合金微观结构与热力学的不均匀演化过程，还为理解高熵非晶合金的复杂力学行为提供了新的理论依据。相关贡献对应代表性论文 1。
姚尧	3	校长	教授	西安工业大学	西北工业大学	主要完成人之一，明晰了非晶合金的动态弛豫机制，深入揭示了非晶合金原子在不同动力学激励条件下的移动性演化规律，并成功建立了动态弛豫机制与微观结构非均匀性之间的内禀性关联。此外，阐明了非晶合金在高温条件下的变形行为、动态弛豫与微观结构非均匀性之间的复杂关联，为理解非晶合金在高温环境下的力学行为提供了重要理论支持。在应力松弛研究方面，该成员发现了非晶合金应力松弛过程的双阶段现象，并通过蠕变等实验手段，深入阐明了非晶合金粘弹性的物理本质，为优化非晶合金的制备工艺和提升其综合性能提供了关键指导。相关贡献对应代表性论文 2，4，5。

王云江	4	/	研究员	中国科学院力学研究所	中国科学院力学研究所	主要完成人之一，运用先进的分子动力学模拟技术，深入探究了非晶合金在应力松弛过程中的复杂行为，揭示了其独特的双阶段弛豫过程。在初始阶段，弛豫过程主要由应力主导，表现为快速的弛豫行为，这一阶段的弛豫速率较高，主要反映了原子在应力作用下的快速响应和结构调整。随着过程的推进，弛豫逐渐过渡到由热主导的慢弛豫阶段，这一阶段的弛豫速率显著降低，更多地体现了原子在热激发下的缓慢重排和结构优化。这一发现不仅为理解非晶合金在应力松弛过程中的微观机制提供了新的视角，也为优化非晶合金的力学性能和制备工艺提供了重要的理论依据。相关贡献对应代表性论文 1，4，5。
杨勇	5	/	教授	香港城市大学	香港城市大学	主要完成人之一，明晰了非晶合金的动态弛豫机制，揭示了非晶合金原子在不同动力学激励条件下的移动性演化规律，并建立了动态弛豫机制与微观结构非均匀性之间的内禀性关联。通过特征激活能量化剪切转变区的热动力学，深入探索了动态力学弛豫行为与蠕变过程中微观机制的异同，为理解非晶合金在不同工况下的力学行为提供了新的理论基础。此外，揭示了在动力学转变区域，高熵非晶合金的强液体属性以及超低频类液区行为与 β 弛豫之间的内禀性关联。他进一步建立了相对缺陷浓度与温度和应变速率的定量描述，为准确预测非晶合金在复杂工况下的力学行为提供了有力的理论支持。相关贡献对应代表性论文 1 和 3。

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对该项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	西北工业大学是本项目的第 1 完成单位，全面负责项目的实施进度和总体技术方案的制定，并对项目的技术路线、可行性和技术内容进行了严格把关。学校为项目的顺利开展提供了全方位的保障，包括办公场所、试验设备等必要支持。经过多年发展，课题组团队围绕非晶合金的特殊物理和力学性质，建立了完善的制备和测试实验平台。依托学校材料测试中心，购置了大量可共享的分析测试设备，能够对材料进行全面的分析测试和深入研究。在项目实施过程中，力学弛豫实验、蠕变和应力松弛实验以及样品制备与表征测试（如 X 射线衍射、热力学性质和透射电镜表征等）主要在团队实验室和学校材料测试中心完成。学校材料测试中心的老师提供了专业的指导和建议，为项目的顺利开展提供了有力的技术支持。
中国科学院力学研究所	2	中国科学院力学研究所作为本项目的第 2 完成单位，为项目中的分子动力学模拟提供了强大的计算资源，并与项目团队共享了实验与模拟的数据。通过结合双方的研究优势，促进了项目的顺利开展，并为后续模型建立和理论分析奠定了坚实基础。中国科学院力学研究所的非线性力学国家重点实验室拥有丰富的跨尺度力学研究经验和高性能计算平台。该单位项目完成人所在的“LNM 冲击动力学与新型材料力学性能”课题组，在非晶合金的力学行为研究方面具有深厚的基础，涵盖实验、理论和模拟研究，长期从事力学、物理和材料科学交叉领域的多尺度计算机模拟工作，重点关注材料微结构跨尺度力学的物理问题。其在无序合金的强度、弹塑性、蠕变、应力松弛、扩散以及跨时间尺度分子动力学等方面积累了丰富的经验。在本项目中，承担了计算机模拟非晶合金多级动力学行为的任务，明确了蠕变实验中观察到的分级弛豫行为的微观原子结构起源和演化机理，并结合实验数据分析，为非晶合金应力松弛和蠕变多级动力学的研究提供了重要基础。
香港城市大学	3	香港城市大学作为本项目的第 3 完成单位，承担了部分关键实验，有力协助并推进研究工作。该校是香港特别行政区政府重点资助的研究型高校之一，学校拥有世界级重点实验室和多个大学级别的研究中心，为研究人员提供了持续开展研究的平台。此外，香港城市大学以创新方法融合科学与文化，拓宽专业研究技能以满足工业发展需求，鼓励研究人员运用专业知识解决实际问题，通过跨学科团队合作提升能力，增强竞争力。该校与内地高校保持密切合作关系，推进高等教育合作发展。依托“香江学者计划”等交流项目，项目第一完成人曾赴香港城市大学交流学习。期间，香港城市大学协助完成了部分非晶合金的力学弛豫和纳米压痕实验，对实验数据进行了提取和分析，对非晶合金 α 和 β 弛豫模式的分解做出了重要贡献，并基于弛豫数据发展了相应理论模型，通过实验数据验证了模型，进一步强化了结构弛豫的物理图像。

八、完成人合作关系说明

（应以第一完成人角度，介绍项目完成人之间的合作经历或合作关系，不局限于第一完成人与其他完成人的合作，也可以包括其他完成人之间的合作。）

该项目完成人为：乔吉超，段亚娟，姚尧，王云江，杨勇。团队成员共同完成“非晶合金黏弹性力学行为研究”的相关研究工作。项目第一完成人乔吉超教授的完成单位和工作单位均为西北工业大学。

第二完成人段亚娟教授，现就职于西北工业大学，项目开展期间为乔吉超教授的在读博士生。期间对高熵非晶合金的玻璃转变过程进行了深入研究，揭示了高熵非晶合金微观结构非均匀性与弛豫机制及变形载体之间的内在关联，合作共同发表代表性论文 1。

第三完成人姚尧教授现为西安工业大学校长，项目开展过程中在西北工业大学任职，期间与乔吉超教授一直保持着紧密的科研合作关系，两位完成人合作共同获得陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖，并合作共同发表代表性论文 2、4、5。

第四完成人王云江研究员，工作单位及完成单位均为中国科学院力学研究所，与乔吉超教授开展了密切的合作。王云江研究员重点采用分子动力学模拟技术研究非晶合金的黏弹性力学行为，从原子轨迹上分析非晶合金黏弹性的物理本质。为项目中大部分的实验现象做机理性解释，合作共同发表代表性论文 1、4、5。

第五完成人杨勇教授，工作单位及完成单位均为香港城市大学，项目开展期间，乔吉超教授曾赴香港城市大学开展“香江学者”项目，杨勇教授为合作导师。该项目开展期间在其实验室开展纳米压痕等关键性实验，为项目的顺利开展提供了重要支持，合作共同发表代表性论文 1、3。