

2026年度陕西省科学技术奖提名项目公示材料

一、项目名称

干细胞与生态位协同调控重建肠神经系统作用及机制

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省卫生健康委员会

提名意见：

拟提名该项目为陕西省自然科学奖。

三、项目简介

该研究属于儿童外科领域。肠神经系统(Enteric nervous system, ENS)发育障碍导致的消化道畸形是新生儿/婴幼儿功能性肠梗阻的主要病因，危及生命。以先天性巨结肠(Hirschsprung disease, HSCR)及其同源病为代表，手术是其现有主要治疗措施，但远期多达 1/3 患儿发生致死性小肠结肠炎、慢性便秘、失禁等棘手的并发症，严重影响其生长发育和终身生活质量。干细胞移植有望成为 ENS 发育异常疾病潜在根治性策略，但仍面临“种子”细胞功能缺陷、肠神经再生不足、分子机制及微环境调控不明等系列问题亟待解决。

该团队依托 20 年深耕积累，在国家自然科学基金等 10 余项国家级科研项目的持续支持下，开辟了肠神经再生领域新理论，为 HSCR 及其同源病等 ENS 发育异常疾病相关研究提供新参考，为临床转化提供关键科学依据。主要科研成果简述如下：

1. 原创成果一：阐明维持细胞干性关键分子机制，提出“种子”细胞干性赋能理论，形成干细胞移植重建 ENS 策略理论与技术框架

肠神经嵴前体细胞(ENCC)是参与 ENS 发育与损伤再生的核心种子细胞，可实现自我更新、增殖迁移，并定向分化为神经元与肠胶质细胞，是 HSCR 等 ENS 发育缺陷疾病细胞移植治疗的核心候选细胞，具备极高的基础研究价值与临床转化前景。目前，ENCC 干性维持仍存在诸多技术瓶颈，严重制约了该领域的发展与临床应用。当前研究普遍面临 ENCC 细胞异质性高、体外易自发分化、体内复杂微环境难以精准模拟、长期扩增后干性衰退、高干性细胞特异性分选标志物缺失等关键难题，无法实现细胞的稳定扩增与精准质控，极大阻碍了肠神经再生修复技术的临床转化落地。

针对上述行业共性难点，该研究团队在 NSCF 30571932 等资助下开展了系统性、多维度的专项研究，突破了现有研究局限。研究团队从核心转录因子网络、微环境信号通路、细胞代谢能量稳态三大关键维度，全面解析了 ENCC 干性维持的核心分子机制，搭建了全方位的干性调控理论体系。通过深度转录调控网络分析，团队成功筛选鉴定出 TWIST1、PIM3、CHUK、F2RL1 等一批调控 ENCC 干性的关键核心分子，明确了非编码 RNA 靶向 SOX4/FOXP1、RhoA/ROCK 信号轴、syncytin-1 介导自噬等多条关键调控通路(Neurogastroenterol Motil. 2020; World J Pediatr. 2017; J Pediatr Surg. 2017; Exp Physiol. 2020)。同时，研究团队依托 HSCR 动物模型与患者临床样本，首次阐明了肠嗜铬细胞及 5-HT 分泌异常对 ENCC 生物学功能的影响，完整揭示了 ENCC 维持未分化状态、增殖迁移特性及双向分化潜能的分子机理，挖掘出多项可用于 ENCC 干性优化的潜在干预靶点(Cell Mol Life Sci.

2014)。

依托以上系列性研究成果，该团队创新性构建了以 ENCC 为核心的 ENS 再生修复理论体系与干细胞移植技术，从机制层面破解了制约肠神经再生领域发展的关键科学问题，厘清了 ENCC 干性维持机制不清、体外稳定扩增体系缺失等核心瓶颈，突破了传统肠神经发育与再生研究的认知局限，完善了 ENCC 干性调控的多维度分子理论体系，为精准优化 ENCC 体外稳态扩增、定向分化与功能质控提供了核心科学依据。

2. 原创成果二：针对“干细胞移植重建 ENS 效能不足”瓶颈，揭示“肠神经-菌群-炎症/免疫”互作核心机制，构建肠道微环境调控的协同干预理论框架

干细胞移植重建 ENS 的实际治疗效能有限，核心瓶颈在于移植 ENCC(种子)与 HSCR 病变肠道微环境(土壤)的兼容性不足。HSCR 病变肠段伴随持续性炎症浸润、肠道上皮屏障损伤、菌群-代谢稳态失衡等多重病理特征，致使移植的 ENCC 增殖、迁移与分化进程显著受阻，同时诱发大量细胞凋亡，无法构建具备完整功能的肠神经网络，极大阻碍 ENCC 移植方案向 HSCR 的临床转化。

该团队聚焦肠神经-菌群-炎症/免疫互作核心机制，搭建肠道微环境调控协同干预的理论体系，完成由外源性干细胞移植向内源性肠神经再生的治疗策略迭代。系列研究主要发现如下：①解析 HSCR 病变肠道微环境的病理缺陷，阐明“肠神经-菌群-炎症免疫”互作的理论基础。通过体外复刻 HSCR 病变肠道微环境，证实外源 ENCC 移植后增殖、迁移、分化受抑且大量凋亡，明确“种子

-土壤”不匹配是移植失败的关键因素；病变肠段主要存在免疫炎症紊乱(炎症因子浸润、上皮屏障破坏)、产 SCFAs 菌群失调及代谢谱异常两大病理改变(NSCF 82071692, EMBO J,2023; 中华小儿外科杂志, 2018、2021); ②国际首创粪菌-细胞“双移植”干预策略, 显著提升肠神经再生效率。建立粪菌移植(FMT)联合 ENCC 移植的双移植体系, 肠神经再生效率提升约 76%; FMT 可重塑肠道菌群组成, 抑制局部促炎反应, 修复受损微环境, 改善“种子-土壤”适配关系, 该生物学效应依赖短链脂肪酸(SCFAs)-MAPK 信号通路介导(NSCF 82300575, EMBO J,2023; 中华小儿外科杂志, 2021); ③建立 SCFAs 协同细胞移植模式, 同时靶向肠道微环境与移植细胞。SCFAs 联合 ENCC 移植可将肠神经再生效率提升约 80%, 可纠正肠道炎症免疫紊乱、调节肠内分泌细胞功能, 又可直接调控 ENCC 生物学表型, 抑制细胞凋亡、促进增殖迁移(EMBO J,2023; 陕西省优秀博士学位论文, 2024)。

系列研究立足“种子-土壤”病理互作视角, 突破 HSCR 外源性细胞移植的传统认知局限, 构建菌群-免疫-肠神经细胞跨维度调控理论, 建立从微环境预处理、细胞联合干预到无细胞内源性再生的完整技术逻辑链条。研究跳出单纯补充外源性干细胞的固有思路, 提出依托组织原位细胞重编程实现肠神经修复的新学术观点, 丰富消化道神经发育损伤性疾病的再生医学理论体系。

3. 原创性成果三: 生物活性小分子激活内源性肠神经再生的“无细胞移植重建 ENS”策略

HSCR 患者及动物模型的病变肠段内, 留存有处于静息状态的微量神经干细胞、丰富肠神经胶质细胞以及大量施旺细胞构成

的粗大神经纤维。基于这一病理特征，本团队尝试性提出生物活性小分子激活内源性肠神经再生的“无细胞移植重建 ENS”研究策略，拟摆脱对外源干细胞移植的依赖，开辟 ENS 重建研究新方向，为肠神经发育异常疾病的发病机制研究、非手术干预及成体神经再生提供全新思路。

但该策略仍面临若干关键难点：**HSCR** 病变肠段可重编程内源细胞存在个体异质性，长段型病变细胞储备匮乏，小分子转分化诱导效率有限；小分子介导广谱表观修饰，靶向特异性不足，存在细胞异常谱系转化风险；诱导产生的神经元常滞留未成熟状态，功能亚型分化不足，突触形成与功能性神经环路整合困难；病变肠段炎症、纤维化微环境抑制再生进程，灌肠给药局部作用时程有限，给药剂量及时序缺乏标准化方案；同时小分子存在脱靶风险，个体菌群差异干扰药效，临床转化仍存在瓶颈。

该团队在国际上首次报道：①**SCFAs** 能够激活 **HSCR** 病变肠段内源性 **ENCC** 介导肠神经发生；②**SCFAs** 主要组分丁酸可抑制 **Kdm2a** 并上调 **Klf4** 表达，驱动肠胶质细胞发生逆/转分化，启动内源性神经发生，该成果获 2025 年太平洋小儿外科联盟(**PAPS**) 学术年会 **Basic Prize**，并受邀进行大会发言；③**SCFAs** 同时具备诱导内源性肠神经再生与神经保护双重作用；④**HSCR** 病变肠段粗大神经纤维中的施旺细胞，可被诱导重编程转化为肠神经元。其核心机制为 **SCFAs** 经灌肠给药后，通过介导表观甲基化修饰，驱动肠胶质细胞逆/转分化，启动机体内源性神经发生，实现从“外源性干细胞移植→微环境协同调控→无细胞内源性再生”的研究范式革新，相关成果发表于 **J Pediatr Surg 2026**、**CMGH 2026** 等期

刊。

生物活性小分子激活内源性肠神经再生的“无细胞移植重建 ENS”策略拓展 ENS 重建相关研究领域新视野，对 ENS 发育异常疾病发病机制研究、非手术治疗，以及成体神经再生等具有极其重要的启示意义。

4. 原创成果四：开发原创性实时动态胚胎活体成像技术，实现了胚胎发育实时示踪与可干预窗口，解决了再生过程盲点问题

肠神经发育再生领域长期存在的技术短板：传统静态观测体系无法解析干细胞-生态位时空动态互作驱动 ENS 构建与损伤后重建的内在规律，再生过程存在关键观测盲点，制约肠神经再生基础理论突破。

团队自主开发实时动态胚胎活体成像技术，构建“胚胎视窗”，融合高时空分辨与长时程活体整体观测优势，实现肠神经发育进程实时动态可视化，完成器官发育研究从静态快照到动态连续解析的范式转变；进一步搭建多模态成像平台，实现胚胎发育实时监测、显微操作一体化多维解析，能够在活体原位层面追踪 ENCC 的迁移、分化及命运转归，直观解构干细胞与其微生态位协同互作的时序与空间特征，从时空维度揭示 ENS 构建与再生重建的内在调控，为肠神经再生的理论创新、再生策略设计提供强有力的革命性技术工具，相关成果发表于 *Science* 2020、*Cell stem cell* 2021。

研究团队针对肠神经发育再生领域活体观测手段匮乏、再生过程存在观测盲点的技术瓶颈，自主开发实时动态胚胎活体成像技术，构建“胚胎视窗”及多模态成像平台，突破传统静态观测的

局限。该技术不仅实现胚胎肠神经发育活体动态示踪，还可在活体层面解析干细胞-生态位协同调控重建 ENS 的动态细胞事件，将实时监测与显微操作相结合，为 ENS 发育、损伤后再生重建机制研究提供强有力的革命性技术工具。

该项目获得 10 余项国家自然科学基金及国家卫健委重大先天结构畸形关键诊疗技术项目等资助，荣获中华医学会儿外科学术年会、国际小儿外科学术年会等优秀论文奖，获得陕西省科技新星、陕西省优秀博士学位论文、西安交通大学“青年拔尖人才”、“青年优秀人才”等支持。至目前完成人以第一/通讯作者在 *Science*、*EMBO Journal*、*Journal of Pediatric Surgery*、*Pediatric Research*、*中华小儿外科杂志* 等杂志发表本项目相关论著，排名占领域内国际前列，*TRENDS IN MOLECULAR MEDICINE*、*GUT MICROBES*、*IMETA* 等评述和引用。

四、客观评价

一体化平台建设与应用成效：依托自主构建的“干细胞移植及微环境调控策略”，已累计承担国家自然科学基金项目 9 项，目前在研国家级及省部级科研项目 9 项；平台培养在读博士研究生 7 名，与哈佛医学院、杜克大学、墨尔本大学等国际一流院校建立了稳定的科研合作关系，联合发表高水平研究论文多篇。该平台通过整合干细胞技术与微环境调控手段，显著提升了 ENS 重建研究的效率与精准度，为相关疾病的治疗提供了重要的技术支撑和研究范式。

学术出版物引用情况：研究成果在胚胎发育可视化领域取得突破性进展，获美国科学院、医学院、艺术与科学院“三院院士

"Rudolf Jaenisch 教授高度认可,并受其特邀在《Science》(IF=56.9)合作发表里程碑式论文。作为第一作者/通讯作者在 Science》(IF=56.9)、《Cell Stem Cell》(IF=25.3)、《The EMBO Journal》(IF=11.4)等国际顶刊及《中华小儿外科杂志》等中文核心期刊持续产出创新成果,H 指数达 50。多篇论文入选 SCI 期刊封面文章,相关发现被《Nature》专题评述,并获《Trends in Molecular Medicine》《Gut Microbes》等权威期刊高频引用。研究成果被纳入人民卫生出版社《小儿外科学》(国家规培教材)、《小儿外科学》("十三五"研究生教材)和《儿童疾病与生长发育》(器官整合教材)三部国家级教材并担任副主编。

人才培养情况:第一完成人作为研究生导师,已培养硕士/博士研究生 32 名(其中博士 18 名),形成高水平学术传承梯队:1 人获陕西省优秀博士学位论文(田东浩),3 人入选陕西省科技新星计划(余辉、黄强、王岗),2 人获西安交通大学人才计划支持(黄强-青年拔尖人才、田东浩-青年优秀人才 A 类)。团队中有 3 人当选国际权威学术组织会员(高亚、余辉、田东浩任 PAPS/IPEG 会员),并多次在 PAPS、IPEG 等国际会议作特邀报告,荣获 2025 年度 PAPS Basic Prize 及 ISPSR Prem Puri Prize(1500 欧元)等国际学术奖项。现任 PAPS/IPEG 学术委员会委员兼中国区代表,同时担任中华医学会小儿外科分会副主任委员、中国医师协会小儿外科分会副主任委员,构建了国际化人才培养平台。

学术会议交流情况:

2018-2024 年,高亚教授作为先天性巨结肠研究领域的学科带头人,连续六年受邀在中华医学会小儿外科学分会学术年会作特

邀报告，包括《先天性巨结肠相关基础研究与临床转化》（2018）、《先天性巨结肠症细胞移植 ENS 再生研究展望》（2021）等重量级学术报告，期间更连续五年担任年会"肠神经系统发育与再生"分论坛主席。

2025 年，第一、二、三完成人作为第一/通讯作者于国际小儿外科学协会论坛(ISPSR)、太平洋小儿外科联盟(PAPS)学术年会做大会发言(Basic Prize)。

2024 年第五完成人黄强受邀于中华医学会小儿外科学学术年会开幕式主题报告，介绍发表于 **Science** 杂志原创性成果。

同行专家评价：

关于“外源性细胞移植联合 5-HT4 受体激动剂激活内源性 ENCCs”的突破性发现获得国际权威期刊《Trends in Molecular Medicine》(IF=13.8)两次引用并获得领域专家高度评价：①2021 年 UQAM 首席科学家、联合创始人 Nicolas Pilon 教授特别指出该研究"首次在大鼠神经节减少症模型中证实 5-HT4 受体激动剂可协同促进移植细胞存活与内源性神经嵴干细胞激活"的创新价值；②2022 年宾夕法尼亚大学费城儿童医院特约主席 Robert O Heuckeroth 教授在相关综述中对该研究结果予以引用。展现了"移植-药物"协同策略在 ENS 修复领域的重大科学意义和显著转化医学价值。

关于“粪菌移植通过 SCFAs 促进肠神经再生”的机制研究，获得国内外权威杂志引用。北京大学消化专业首席段丽萍教授发表《iMeta》杂志论文，引用该成果将其纳入立论依据。PeerJ 杂志主编 J Gregory Caporaso 教授于肠道微生物领域顶刊《Gut

microbes》发表重磅综述，引用本研究成果，系统阐述 FMT 如何改变受体微生物菌落的全面见解。

该研究建立的“小鼠胚胎可视化窗口实时动态监测技术”获得国际学术界广泛认可，为实时动态可视化监测 ENS 发育过程、阐明关键分子机制等相关研究提供了强有力的技术支持。其创新价值体现在以下方面：中国人工智能学会理事长、中国工程院院士戴琼海教授在《Nature Biotechnology》特别指出该技术"兼具高时空分辨率、高保真度和超低光毒性三大特征，为研究神经环路形成等瞬态三维动态过程建立了新标准"。该技术已在国际知名期刊引用 90 余次，展现出在发育生物学、神经科学和免疫学等领域的重大应用价值。

五、代表性论文专著目录

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码	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	Intravital imaging of mouse embryos	Science	Huang Q, Cohen MA, Alsina FC, Devlin G, Garrett A, McKey J, Havlik P, Rakhilin N, Wang E, Xiang K, Mathews P, Wang L, Bock C, Ruthig V, Wang Y, Negrete M, Wong CW, Murthy PKL, Zhang S, Daniel AR, Kirsch DG, Kang Y, Capel B	2020 Apr 10;368(6487):181-186.	2020年	黄强	黄强	黄强, Wang Ergang, Xiang Kun, Wang Lihua, Wang Yi, Wong Chi Wut, Zhang Shupe, Kang Yubin, Shen Xiling,	90	SCI-Expanded	是
2	Fecal microbiota transplantation enhances cell therapy in a rat model of hypoganglionosis by SCFA-induced MEK1/2 signaling pathway	EMBO J	Tian DH, Xu WY, Pan WK, Zheng BJ, Yang WL, Jia WY, Liu Y, Malgorzata A Garstka, Gao Y, Yu H	2023 Jan 4;42(1):e11139	2023年	余辉	田东浩	田东浩, 许文耀, 潘伟康, 郑百俊, 杨薇粒, 贾婉莹, 刘勇, 高亚, 余辉	17	SCI-Expanded	是

3	Combination of exogenous cell transplantation and 5-HT4 receptor agonism induce endogenous enteric neural crest-derived cells in a rat hypoganglioneurogenesis model	Exp Cell Res	Yu H,Zheng BJ,Pan WK,Wang HJ,Xie C,Zhao YY,Chen XL,Liu Y,Gao Y	2017 Feb 1;351(1):36-42	2016年	高亚	余辉	余辉, 郑百俊, 潘伟康, 王怀杰, 谢崇, 赵育樱, 陈新林, 刘勇, 高亚	18	SCI-Expanded	是
4	Phenotypic and functional comparison of rat enteric neural crest-derived cells during fetal and early-postnatal stages	Neural Regen Res	Tian DH,Qin CH,Xu WY,Pan WK,Zhao YY,Zheng BJ,Chen XL,Liu Y,Gao Y,Yu H	2021 Nov; 16(11):2310-2315	2021年	余辉	田东浩	田东浩, 钦传辉, 许文耀, 潘伟康, 赵育樱, 郑百俊, 陈新林, 刘勇, 高亚, 余辉	3	SCI-Expanded	
5	The frontier of live tissue imaging across space and time	Cell Stem Cell	Huang Q, Aliesha Garrett, Shree Bose, Stephanie Blocker, Anne C	2021 Apr 1;28(4):603-622.	2021年	黄强	黄强	黄强	44	SCI-Expanded	
合 计									172		

六、主要完成人情况

序号	姓名	技术职务	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目贡献
1	高亚	教授、主任医师	无	西安交通大学	西安交通大学	作为项目的主要负责人，总体负责制定研究策略、计划和实施方案，获 5 项国家自然科学基金资助，并主持 2019 年国家卫健委“重大先天结构畸形关键诊疗技术创新与应用”、2021 年小儿外科国家临床重点专科建设项目。
2	余辉	副研究员	副主任	西安交通大学	西安交通大学	本项目方案的主要设计者之一，负责实验设计、支持，指导研究，主持国家自然科学基金 3 项，代表作 1、2（共同通讯作者）、3（第一作者）。
3	田东浩	助理研究员	无	西安交通大学	西安交通大学	本项目方案的主要设计者之一，负责实验设计、支持，指导研究，主持国家自然科学基金 1 项，代表作 1、2（共同第一作者）。
4	黄强	教授	无	西安交通大学	西安交通大学	参与项目的核心设计与实验开展，代表作 4、5 第一作者/共同通讯。
5	郑百俊	副主任医师	科室副主任	西安交通大学	西安交通大学	作为项目核心成员，参与课题研究策略，明确研究方向与路径，保障项目实施。
6	许文耀	助理研究员	实验室副主任	西安交通大学	西安交通大学	完成项目的具体开展，参与实验的结果整理与分析等工作，代表作 1、2（共同第一作者）。

七、主要完成单位情况

西安交通大学作为本项目的唯一完成单位，为本研究的顺利开展与圆满完成提供了从战略规划、资源支撑到人才培养的全方位、立体化保障，是项目取得系列创新性成果的重要基石。其主要贡献体现在以下四个方面：

1. 顶层设计与战略资源支持：学校通过其成熟的组织管理体系和雄厚的科研实力，为项目提供了前瞻性的战略规划和稳定的资源保障。项目被纳入学校“干细胞研究-器官移植”重点交叉研

究专项，由交叉基金提供专项经费支持，并配备独立预算与专职管理团队，确保研究得以高效、有序推进。学校提供国家级、省部级项目配套经费和政策支持，是项目能够持续开展近 20 年的根本保证。

2. 一流的科研平台与硬件保障：项目主要依托环境与疾病相关基因教育部重点实验室等一流科研平台开展。该平台配备了本项目所需的核心大型仪器设备，如激光共聚焦显微镜、流式细胞分选仪、Auto MACSpro 免疫磁珠分选系统等，并设有专业功能实验室。学校大型仪器共享平台及其补贴政策，极大地降低了研究成本，提高了设备使用效率。

3. 全面的实验动物技术服务：西安交通大学医学部动物实验中心为本项目提供了卓越的动物实验全链条技术支持。中心不仅持有 SPF 级大/小鼠生产许可证，确保实验动物的稳定、高质量供应，更提供了包括基因修饰动物模型制作、胚胎显微操作、动物模型构建、标准化饲养与实验在内的全方位服务，满足了本项目从模型创建到表型分析的全部动物实验需求。

4. 系统性的人才培养与团队建设：学校通过“青年拔尖人才支持计划”（如黄强）、“青年优秀人才支持计划”（如田东浩）以及附属医院的“育英计划”（如余辉、田东浩）等多项人才政策，为项目第二、三、五完成人等核心骨干提供了专项经费、研究生招生指标和专业研究辅助等关键资源支持。这些政策有效稳定并培育了科研团队，激发了青年人才的创新活力，为项目的可持续发展奠定了坚实的人才基础。

综上所述，西安交通大学通过其战略性的资源投入、世界一

流的公共实验平台、全面的技术服务体系以及系统性的人才政策，为本项目构建了“软硬结合”的卓越科研环境，充分履行了作为主要完成单位的支撑与保障职责，对项目所有创新成果的产出做出了不可替代的贡献。

八、完成人合作关系说明

项目主要完成人（高亚、余辉、田东浩、郑百俊、黄强、许文耀）均来自西安交通大学，是一个长期稳定、分工明确、协作紧密的科研团队。团队成员围绕“干细胞移植协同微环境调控重建 ENS”这一核心方向，开展了近二十年的持续攻关与深度合作。合作关系建立在共同承担的多个国家级及省部级项目基础上，并通过共同发表学术论文、联合培养研究生、共同进行学术交流等多种形式得以体现和深化。具体合作关系阐述如下：

1. 长期稳定的科研伙伴关系：项目第一完成人高亚教授作为项目的总设计师和负责人，自 2006 年起便规划并引领该研究方向，牵头申请并获批了 6 项国家自然科学基金等重大课题，为团队提供了持续的研究支持和稳定的合作平台。余辉（排名第二）作为核心骨干和共同设计者，深度参与项目构思与实验设计，并指导田东浩（排名第三）、许文耀（排名第六）等青年骨干进行具体实验探索与技术优化。资深专家领衔、中青年骨干支撑、青年学者具体执行的梯队式合作模式，保证了研究的延续性和创新活力。

2. 紧密的学术指导与共研关系：余辉（通讯作者）与田东浩（第一作者）在《EMBO Journal》和《Neural Regen Res》等期刊上合作发表关于粪菌移植机制和细胞功能对比的关键研究成果；高亚（通讯作者）与余辉（第一作者）2016 年在《Exp Cell Res》

上合作发表关于 5-HT₄ 受体激动剂协同策略的突破性发现。黄强（排名第五）开发的“小鼠胚胎可视化窗口”技术（发表于《Science》）为团队其他成员研究肠神经发育机制提供了革命性工具，形成了技术支撑与生物学问题验证的紧密互动。

3. 跨学科交叉与专业互补：合作涵盖了从临床外科（高亚、郑百俊）到基础医学研究（余辉、田东浩、许文耀），再到前沿生物工程技术（黄强）的完整链条。郑百俊（排名第四）副主任医师，将临床问题转化为科学问题，确保了研究方向与临床需求的紧密结合；基础研究团队的发现通过临床视角审视其转化潜力，这种“临床-基础-技术”三位一体的合作模式是项目成功的关键。

4. 共同的人才培养与学术交流：共同培养了 15 名硕博研究生，并联合支持了多名青年人才的成长（如共同指导田东浩获陕西省优秀博士学位论文）。高亚、余辉、田东浩等连续多年在中华医学学会小儿外科学术年会、国际小儿外科协会（ISPSR）论坛等重要会议上作大会报告或主题发言。