

# 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

多孔配位聚合物的可控合成与吸附分离性能调控

## 二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：该成果围绕多孔配位聚合物的精准设计制备及相关吸附性质应用开展了新理论、新方法、新技术的基础研究。主要发现点有：1、首次提出了“协同吸附分离理论（SSST）”，通过三例具有特异吸附性能多孔配位聚合物材料串联排布的方式，首次实现了在乙炔/乙烯/乙烷/二氧化碳四组份混合气体中一步分离制备聚合物级纯度的乙烯，并进行了此技术的普适性验证。2、建立了“多位点整合设计”方法，实现了在单一多孔材料内部，设计整合多类特异性的吸附位点，进而实现单个吸附材料能够在多组分 C2 分离体系中（三组份和四组份），同时去除多种杂质，一步实现乙烯的高纯制备。3、阐明了“微孔主客体识别”规律，精准制备了具有不同孔结构特征的系列杂化超微孔材料，揭示了孔径和孔化学对于小分子客体吸附行为的影响和作用规律。5 篇代表论文被他引 745 次（索引报告），其中 2 篇代表论文入选 ESI 高被引论文（索引报告）。项目成员受邀在国内外学术会议做邀请报告 30 余次，相关研究成果被国内外著名学者多次正面评价。该项目获得 2023 陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖（特等奖）。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。特提名为陕西省自然科学奖一等奖。

## 三、项目简介

该项目属于化工学科中先进多孔吸附分离材料研究前沿基础领域。

该项目主要聚焦在多孔配位聚合物的精准设计制备及相关吸附性质应用方面，属于化工学科中的化工分离方向。目前 10-15% 的全球总能耗被使用在高能耗的工业分离环节，因此如何研发更节能的工业分离技术具有重要的现实意义。作为物理吸附分离技术的核心，高效多孔吸附分离材料的发展是重中之重。多孔配位配位聚合物（又称金属-有机框架），因其特定的化学组成和构筑方式，拥有着更庞大的结构数据库和更强大的结构可设计性。在面向特定化学分离条件下全球科学家们开展了大量的结构设计与吸附分离应用研究，但涉及最关键核心部分的问题，仍尚未得到真正的解答。第一：目前分离科学研究大多基于简单分离体系（双组分），现有的这些高性能多孔材料能否在面向更复杂分离体系（甚至是实际工业条件）下，依然能够展现出不错的应用潜力？第二：如何真正理解小分子客体在纳米限域空间内的吸附作用规律，甚至是预测出不同分子间的作用力排序与大小？第三：如何根据待分离的化学分子种类和物化特性，真正意义上地实现多孔材料的定制化设计？

基于以上这些关键问题，该项目在“战略性科技创新合作”重点专项（在研 1 项）、国家自然科学基金（已结题 3 项，在研 3 项）、陕西省自然科学基金（已结题 2 项）、陕西省高校创新团队（结题）等项目资助下，近年来聚焦在多孔配位聚合物的精准设计制备，纳米微观孔道下主客体作用规律探索，复杂多组分体系下的吸附分离研究，主要发现点如下：

1、首次提出了“协同吸附分离理论”，通过三例具有特异吸附性能多孔配位聚合物材料串联排布的方式，首次实现了在乙炔/乙烯/乙烷/二氧化碳四组份混合气体中一步分离制备聚合物级纯度乙烯，并进行了此理论的技术普适性验证。

2、建立了“多位点整合设计”方法，基于此方法实现了在单一多孔材料内部，设计整合多类特异性的吸附位点，进而实现单个吸附材料能够在多组分 C2 分离体系中（三组份和四组份），同时去除多种杂质，一步实现乙烯的高纯制备

3、阐明了“微孔主客体识别”规律，精准制备了具有不同孔结构特征的系列杂化超微孔材料，揭示了孔径和孔化学对于小分子客体吸附行为的影响和作用规律。

该项目的相关成果分别发表在 *Science*, *JACS*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, *Nat. Commun.*, 等国际顶级学术期刊，共计论文 70 篇，5 篇代表论文被他引 745 次（索引报告），其中 2 篇代表论文入选 ESI 高被引论文（索引报告），项目成员受邀在国内外学术会议做邀请报告 20 余次，相关研究成果被国内外著名学者正面评价。如美国科学院院士美国加州大学伯克利分校的 Omar M. Yaghi 教授（金属有机框架的开创者）和先驱，数次获诺贝尔奖提名），在论文 [*Nat. Rev. Mater.* 2020, 5, 764] 中评述道：基于 SSST 理论使金属有机框架材料表现出优异的物理化学性能（代表性引文 4）。京都大学 Susumu Kitagawa 教授（诺贝尔奖提名获得者、日本学士院院士）在其综述性论文[*Energy Chem* 2021, 3, 100067]上引用并肯定了我们的工作“NPU-1/2/3 实现了两种具有高度相似尺寸和沸点分子的挑战性分离”。暨南大学李丹教授（国家杰出青年、英国皇家化学会会士（FRSC），中国化学会理事）在论文 [*Nature* 2021, 595, 542] 中评述道：基于 SSST 理论的吸附分离技术展现了分子层面对于 MOF 材料结构和功能的精细调控（代表性引文 1）。福建物构所的洪茂椿院士（中科院院士、福建物构所所长）在论文[*Angew. Chem. Int. Ed.* 2021, 60, 7547]中评述道：基于 SSST 理论中使用的含氟 MOF 材料具有其极高的气体选择性。

基于以上研究成果，该项目研究团队成为国内多孔配位聚合物可控合成研究领域的引领团队之一，极大地推动了该领域的发展。此外，基于该项目的多孔材料物理吸附分离研究成果具有显著的吸附分离功能优势，项目团队与陕西省煤业化工技术研究院有限责任公司华州分公司深入合作，开拓性地推进该领域前沿科研成果落地应用（其他附件 2-1）。项目成果获得陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖特等奖（其他附件 1-1），项目的第一完成人在 2017 年入选“国家高层次人才计划”（其他附件 1-2），并于 2019 年被中国科协科学技术传播中心授予“中国十大新锐科技人物”（其他附件 1-3）。

## 四、客观评价

5 篇代表性论文成果受到学术界的广泛关注和认可，被美、英、德、日、法等国家和地区的学者（包括美国国家科学院院士 Omar Yaghi 教授，日本学士院院士 Susumu Kitagawa 教授，加拿大工程院院士 Edward Sargent 教授，欧洲科学院外籍院士 Banglin Chen 教授，中国科学院洪茂椿院士，陈小明院士等）在学术刊物正面引用和评价，被 *Nature*, *Nat. Chem.*, *Nat. Rev. Mater.*, *J. Am. Chem. Soc.*, *Angew. Chem. Int. Ed.* 等期刊他引 745 次，其中代表论著 1、2 入选 ESI 高被引论文。部分代表性评价如下：

（1）对于发现点一的客观评价：

1. 美国德克萨斯大学圣安东尼奥分校陈邦林教授（欧洲科学院外籍院士）在论文[*Nat. Chem.* 2021, 12, 933]中评述道：SSST 理论发挥了 MOF 材料的结构可调性和可修饰性，使得其表现出优异的气体分离性能；美国西北大学 Omar K. Farha 教授（美国科学促进会会士、欧洲科学院外籍院士，阿拉伯科学院院士）在论文[*Chem. Rev.* 2020, 120, 8130]中评述道：SSST 理论由于模块化的设计，使其能够解决传统多孔材料如活性炭、分子筛等无法解决的问题。（代表性引文 1、代表性引文 2）

2. 暨南大学李丹教授（国家杰出青年、英国皇家化学会会士（FRSC），中国化学会理事）在论文[*Nature* 2021, 595, 542]中评述道：基于 SSST 理论的吸附分离技术展现了分子层面对于 MOF 材料结构和功能的精细调控。（代表性引文 3）

3. 美国加州大学伯克利分校的, Omar M. Yaghi 教授（金属有机框架的开创者和先驱，美国科学院院士，数次获诺贝尔奖提名）在论文[*Nat. Rev. Mater.* 2020, 5, 764]中评述道：尽管 MOF 材料仅仅是由有限的组分构成，但是基于 SSST 理论的吸附分离方法使其能够表现出优异的物理化学性能。（代表性引文 4）

4. 日本京都大学 Susumu Kitagawa 教授（金属有机框架的开创者和先驱，数次获诺贝尔奖提名）在论文[*Angew. Chem. Int. Ed.* 2023, e202303903]中评述道：与其他传统多孔材料如沸石或者活性炭不同，SSST 方法能利用 MOF 材料灵活的孔活性，实现材料功能上的提升和突破（代表性引文 5）；美国德克萨斯大学圣安东尼奥分校陈邦林教授（欧洲科学院外籍院士）在论文[*Angew. Chem. Int. Ed.* 2020, 59, 4396]中评述道：包括 SSST 技术在内的 MOF 材料能够实现多种多样的气体分离和纯化任务，包括烷烃/烯烃分离、炔烃/烯烃分离及复杂的多组分分离。

5. 美国加州大学河滨分校 Pingyun Feng 教授（美国科学促进会会士）在论文[*J. Am. Chem. Soc.* 2020, 142, 2222]评述道：物理吸附分离技术如 SSST 等能够有效降低分离能耗，而对于乙烷选择性吸附的材料，由于可以直接在分离器末端收集高纯乙烯，使得分离过程更加简便高效。（代表性引文 6）

6. 福建物构所的洪茂椿院士（中科院院士）在论文[*Angew. Chem. Int. Ed.* 2021, 60, 7547]中评述道：SSST 中使用的含氟 MOF 材料，由于其极高的气体选择性引起了研究人员的广泛关注；中山大学的陈小明院士（中国科学院院士、发展中国家科学院院士）在论文[*Adv. Mater.* 2023, 35, 2207955]中评述道：SSST 方法通

过利用不同 MOF 的孔对于乙烷的亲和行为, 实现了乙烷选择性的吸附分离, 并且具有可观的选择性和吸附容量。

(2) 对于发现点二的客观评价:

1. 中山大学苏成勇教授(国家杰青、973 首席科学家、中国晶体学会副理事长)在论文[CCS Chem. 2023, DOI:10.31635/ccschem.023.202302698]中引用并肯定了我们的工作, 并称: 到目前为止, 只有 15 个 MOF 被报道并被突破实验证实能够成功地从三元 C<sub>2</sub> 气体混合物中实现一步 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 纯化。(代表性引文 7)

2. 日本京都大学 Susumu Kitagawa 教授(金属有机框架的开创者和先驱, 数次获诺贝尔奖提名)在其论文[Energy Chem 2021, 3, 100067]上引用并肯定了我们的工作 NPU-1/2/3 实现了两种具有高度相似尺寸和沸点分子的挑战性分离。

3. 美国德克萨斯大学圣安东尼奥分校陈邦林教授(欧洲科学院外籍院士)在论文[Nat. Commun. 2022, 13, 200]中引用并赞成了我们的观点: 基于多孔材料吸附的气体分离代表了一种有前途的替代技术; 对于我们提出的三位点整合策略, Banglin Chen 教授在综述性论文[Chem. Commun. 2022, 58, 747]上引用并评价到具有高度挑战性的混合物分离, 可以通过对孔结构的系统调控来实现。

4. 美国罗格斯大学 Jing Li 教授(欧洲科学院外籍院士、美国科学促进会会士)在论文[Small, 2023, 2304460] 中引用并赞成我们的观点: 通过吸附分离从 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 混合物中一步纯化 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 对吸附剂的孔结构和孔功能有严格的要求。主要原因是 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的四极矩和动力学直径介于 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 之间。此外, 她还在[AIChEJ. 2023, 69, e18021]等论文中引用并与我们的成果进行了对比: 这些数值与能够从 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 混合物中一步纯化 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的基准吸附剂相当。

(3) 对于发现点三的客观评价:

1. 西班牙科尔多瓦大学 Rafael Luque 教授(《Molecular Catalysis》杂志主编, H 因子 90)、西班牙瓦伦西亚理工大学 Hermenegildo Garcia 教授(2015-2021 年连续六年高被引科学家)和美国德克萨斯大学圣安东尼奥分校陈邦林教授(欧洲科学院外籍院士)等五人共同发表的论文[Chem. Soc. Rev., 2022, 51, 7427]中多次高度评价我们的工作, 并称: 就分离 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(50/50 混合物)而言, F-PYMO-Cu 和 UTSA-300a 是里程碑材料。(代表性引文 8)

2. 美国伊利诺伊理工学院 Sameh K. Elsaidi 教授, 在论文[Adv. Funct. Mater. 2024, 34, 2312280] 中高度认可我们的工作: Mg-MOF-74 (1.1), [Zn(odip)0.5(bpe)0.5](1.4), ZJU-197 (2.2), SU-101(Al) (2.5), QC-5-Cu(3.3) 和 MUF-16(15)仅被一种吸附剂(F-PYMO-Cu)超过。

3. 南开大学胡同亮教授在[Coord. Chem. Rev., 2022, 468, 214628]中高度评价了我们的工作, 指出: 2021 年, Chen 和同事报道了一种坚固的刚性框架 F-PYMO-Cu, 该框架具有规则的 1D 通道, 孔径为 3.4 Å, 也可以从 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 混合物中分离出乙烯。值得注意的是, 关于 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 三元混合物分离的研究仍然很少。事实上, 这种从三元混合物中一步生产乙烯的过程在工业中十分重要, 该研究领域在未来将蓬勃发展。

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本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，不得只填写本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	Synergistic sorbent separation for one-step ethylene purification from a four-component mixture	Science	Kai-Jie Chen, David G. Madden, Soumya Mukherjee, Tony Pham, Katherine A. Forrest, Amrit Kumar, Brian Space, Jie Kong, Qiu-Yu Zhang, Michael J. Zaworotko	2019 年 366 卷 6462 期 241-246 页	2019 年 10 月 11 日	Kai-Jie Chen, Michael J. Zaworotko	Kai-Jie Chen, David G. Madden	陈凯杰, 孔杰, 张秋禹	421	web of science	是
---	---	---------	---	-------------------------------	------------------	------------------------------------	-------------------------------	--------------	-----	----------------	---

2	Pore Engineering for One-Step Ethylene Purification from a Three-Component Hydrocarbon Mixture	Journal of the American Chemical Society	Baoyong Zhu, Jian-Wei Cao, Soumya Mukherjee, Tony Pham, Tao Zhang, Teng Wang, Xue Jiang, Katherine A. Forrest, Michael J. Zaworotko, and Kai-Jie Chen	2021 年 143 卷 3 期 1485-1492 页	2021 年 01 月 27 日	Michael J. Zaworotko, Kai-Jie Chen	Baoyong Zhu, Jian-Wei Cao	朱宝勇，曹健玮，张涛，王腾，姜雪，陈凯杰	201	web of science	是
---	--	--	---	------------------------------	------------------	------------------------------------	---------------------------	----------------------	-----	----------------	---

3	One-step ethylene production from a four-component gas mixture by a single physisorbent	Nature Communications	Jian-Wei Cao, Soumya Mukherje, Tony Pham, Yu Wang, Teng Wang, Tao Zhang, Xue Jiang, Hui-Juan Tang, Katherine A. Forrest, Brian Space, Michael J. Zaworotk, Kai-Jie Chen	2021 年 12 卷 1 期 s41467-021-26473-8 页	2021 年 11 月 11 日	Michael J. Zaworotk, Kai-Jie Chen	Jian-Wei Cao	曹健玮，王昱，王腾，张涛，姜雪，唐会娟，陈凯杰	84	web of science	是
---	---	-----------------------	---	--------------------------------------	------------------	-----------------------------------	--------------	-------------------------	----	----------------	---



4	General pore features for one-step C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> production from a C <sub>2</sub> hydrocarbon mixture	Chemical Communications	Tao Zhang, Jian-Wei Cao, Shu-Yi Zhang, He Feng, Ye Li, Yu Wang, Juan Chen, Teng Wang, Kai-Jie Chen	2022 年 58 卷第 4954-4957 页	2022 年 4 月 19 日	Kai-Jie Chen, Yu Wang	Tao Zhang, Jian-Wei Cao	张涛，曹健玮，张书益，冯赫，王昱，陈娟，王腾，陈凯杰	16	web of science	是
---	---	-------------------------	--	--------------------------	-----------------	-----------------------	-------------------------	----------------------------	----	----------------	---

5	Molecular Sieving of Acetylene from Ethylene in a Rigid Ultra-microporous Metal Organic Framework	Chemistry —A European Journal	Xue Jiang, Tony Pham, Jian-Wei Cao, Katherine A. Forrest, Hui Wang, Juan Chen, Qiu-Yu Zhang, Kai-Jie Chen	2021 年 27 卷 36 期第 9446-9453 页	20 21 年 6 月 25 号	Qiu -Yu Zha ng, Kai -Jie Che n	Xu e Jia ng	姜雪，曹健玮，汪辉，陈娟，张秋禹，陈凯杰	23	web of science	是
6											
7											
8											
合 计									745		

## 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：**填写完成人参与本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。

**对本项目贡献：**不超过 300 字。应具体写明完成人对本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	对本项目贡献
陈凯杰	1	副院长	教授	西北工业大学	西北工业大学	作为项目负责人，系统组织项目的论证和实施，并全程组织并实施了三个发现点的具体研究工作，包括方案制定、结果讨论分析、论文撰写修改等。为代表性论文 1-5 的第一/通讯作者
王昱	2	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	参与了发现点二、三的研究工作，在多孔配位聚合物的孔径控制方面进行系统的合成及相关吸附分离研究；是代表性论著 3 的共同作者，代表性论著 4 的共同通讯作者。
陈娟	3	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	主要对发现点三做出了重要贡献，完成了多孔配位聚合物的结构设计合成

						与 C2 气体吸附性能表征。为代表性论文 4 和 5 的共同作者。
张涛	4	无	副研究员	西北工业大学	西北工业大学	对发现点二、三的研究做出了贡献，参与了多例 MOF 材料的结构设计、性能分析和理论计算；是代表性论著 4 的共同第 1 作者，是代表性论著 2、3，5 的共同作者。
姜雪	5	无	无	西安电子科技大学	西北工业大学	对发现点三“孔结构协同调控”的研究做出了贡献，在多孔配位聚合物的孔径控制方面进行系统的合成及相关吸附分离研究；是代表性论著 5 的第 1 作者，是代表性论著 2、3 的共同作者。
曹健玮	6	无	无	西北工业大学	西北工业大学	对发现点二、三的研究做出了贡献，参与了多例 MOF 材料的结构设计、性能分析和理论计算；是代表性论著 3 的第 1 作者，是代表性论著 2，4 共同第 1 作者，是代表性论著 5 的共同作者。

## 七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	西北工业大学是本项目的唯一完成单位，学校为该项目组提供了良好的工作环境，从管理和服务上保证了项目的顺利进行。学校结合学科和创新平台建设，在人才培养、经费投入、项目申报等各方面对该团队进行了优先支持。对本项目的贡献包括：提供场地、水、电、仪器设备等硬件条件；提供书籍、电子数据库、文献检索等条件；学校的科研管理部门、财务部门为项目的日常管理和服务提供了重要帮助。
	2	
	3	

## 八、完成人合作关系说明

该项目的所有研究工作均是在第一完成人陈凯杰教授的系统组织下开展的，项目依托于陕西省特种功能与智能高分子材料工信部重点实验室和西安市功能有机多孔材料重点实验室。各完成人之间长期合作，共同承担多项国家级和省级课题，合作发表多篇论文。申请人陈凯杰教授是 2018 年 3 月引进至我校作为多孔材料研究方向的学科带头人，陈娟副教授和王昱副教授分别于 2018 年 6 月和 2021 年 3 月回国入职西北工业大学，加入陈凯杰教授研究团队，共同参与该项目的研究工作，张涛副研究员是 2019 年以博士后身份加入该团队，出站后留校工作，姜雪与陈凯杰教授是师生关系，长期致力于该项目的具体实施工作。

各完成人之间的具体合作关系如下：

1、本项目的第二完成人王昱副教授、第三完成人陈娟副教授与第一完成人陈凯杰教授同属于西北工业大学化学与化工学院化学研究中心教职工，期间，以陈凯杰教授为课题组组长，共同建立了新能源材料实验室，三位长期合作，共同承担并结题了多项省部级及以上研究课题，共同发表多篇论文。

2、本项目的第四完成人张涛副研究员 2019 年以博士后身份加入课题组，陈凯杰教授为其博士后合作导师，期间陈娟和王昱副教授共同指导并参与了其多项研究工作的实施，出站后张涛博士以副研究员身份加入课题组，共同开展工作。

3、第五完成人姜雪和第六完成人曹健玮是陈凯杰教授的博士生，在项目开展期间，直接参与了本项目的实施。

5、以上完成人共同申报并获批了 2023 陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖（特等奖），陈凯杰、王昱、陈娟、姜雪、张涛、曹健玮分别是该奖励的第 1、2、5、6、7、8 完成人。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。