

公示材料

项目一

项目名称：基于特征工程、机器学习和模型解释的蛋白质识别研究

项目简介：

项目聚焦人工智能驱动的蛋白质功能智能识别与分析，面向生物医药、食品工业及传染病防控等重大需求，致力于解决当前生物信息学工具在特征表达单一、建模自动化不足、模型可解释性弱等关键瓶颈。项目团队创新性地融合多源生物特征、先进机器学习算法与可解释性技术，构建了兼具高精度、强泛化与良好用户友好性的智能分析体系。所研发的方法与工具不仅显著提升了蛋白质分类性能，还建立了“序列-属性-功能”的可计算关联路径，为功能蛋白挖掘、药物靶点发现及病原机制解析提供了新范式，在学术研究与产业应用中展现出重要价值。

项目核心工作体现在以下三篇高水平论文中：（1）开发了集特征工程、自动建模与模型解释于一体的开源软件 iProps，填补了蛋白质分类全链条智能分析工具的空白；（2）提出基于多维度融合特征与 Stacking 集成学习的抗冻蛋白高精度识别方法，准确率达 98.5%，并揭示其理化机制；（3）构建 CRCF 方法，首次实现对疟原虫分泌蛋白的高效识别，为疟疾疫苗与药物研发提供关键靶点支持。

针对蛋白质分类缺乏一体化智能分析工具的问题，研发了开源软件 iProps，首次系统整合进化信息与氨基酸约化特

性，提出十余种与序列长度无关的新型数值特征，并内置 17 种经典特征计算模块。该工具集成自动化机器学习 (AutoML) 流程，支持数据平衡、分类器自动选择与参数优化，并首创生成包含 23 类可视化图表的综合解释报告，显著提升模型透明度与生物学可解释性。iProps 已在 IEEE JBHI 发表，为无需编程背景的科研人员提供“开箱即用”的智能分析平台。

针对抗冻蛋白在医药与食品工业中的重要应用需求，构建了一种基于 Stacking 集成学习的高精度识别模型。该方法首次从氨基酸约化特性、可扩展伪氨基酸组成 (Sc-PseAAC) 和理化性质三个维度融合特征，以 LightGBM、XGBoost 和 RandomForest 为基学习器，Logistic 回归为元学习器，在独立测试集上达到 98.5% 的准确率。研究进一步通过特征重要性分析与三维结构验证，识别出 7 个关键判别特征，并揭示组氨酸、疏水性、电荷等理化属性与抗冻功能的内在关联，为功能蛋白理性设计提供理论依据。

针对疟疾防控中的关键科学问题，提出 CRCF 方法用于识别疟原虫分泌蛋白——这类蛋白是疫苗与药物开发的核心靶点。该方法融合序列保守性、理化特征与进化信息，构建高判别力特征体系，有效克服疟原虫基因组注释不全的挑战。研究成果发表于 IEEE/ACM TCBB，显著优于现有工具，为疟疾致病机制研究和新型干预策略开发提供了可靠计算支撑，体现了本项目在传染病生物信息学领域的拓展应用能力。

全部完成人：冯昌利、李鑫、魏海燕、朱笑荣、乔赛

对项目的贡献:

冯昌利: 本项目开发了工具 iProps, 实现蛋白质分类“特征 - 建模 - 解释”的整合: (1) 融合进化信息与氨基酸约化特性, 提出多种序列新特征, 支持混合特征构建; (2) 集成数据平衡、自动建模与超参数优化, 通过多种 AutoML 策略高效筛选最优分类器; (3) 首创可解释性综合报告, 自动生成 23 幅可视化图表, 深入解析模型决策依据。针对抗冻蛋白识别难题, 构建基于 Stacking 的高精度模型 (测试准确率达 98.5%), 首次从氨基酸约化、Sc-PseAAC 及理化性质三维度系统融合特征, 识别出 7 个关键判别特征, 并揭示组氨酸等二肽以及疏水性、电荷等理化属性与抗冻功能的内在关联机制, 建立“序列 - 属性 - 功能”可解释计算路径。

李鑫: (1) 设计并实现模块化、可扩展的软件架构, 高效集成十余种新型特征计算、17 种经典特征方法及多源数据输入接口; (2) 开发全流程自动化建模, 集成数据平衡、分类器自动配置与超参数优化功能, 支持三种 AutoML 算法无缝切换; (3) 开发可解释性报告生成模块, 自动输出 23 类可视化图表, 实现模型决策的透明化; (4) 完成全系统功能测试与性能调优, 确保图形界面友好、运行高效、跨平台兼容。

魏海燕: (1) 构建高质量、标准化的蛋白质分类数据集, 系统整合多源异构生物数据, 为特征工程与模型训练奠定基础; (2) 设计并实现高维特征空间的降维与聚类分析

流程，有效揭示抗冻蛋白与非抗冻蛋白在特征空间中的可分性；（3）创新性开发涵盖 23 类图表的自动化可视化模块，直观呈现模型预测结果、特征重要性及生物学解释，显著提升 iProps 工具的可解释性与用户友好性；（4）结合蛋白三维结构与多序列比对结果，将计算分析与生物学意义关联，辅助识别 Hr*Hr、Sc-PseAAC-1 等 7 个关键判别特征，为“序列 - 属性 - 功能”机制解析提供数据支撑。其工作贯穿项目核心环节，是实现全流程智能分析与成果落地的关键支撑。

朱笑荣：（1）提出多维度融合特征建模框架，首次将氨基酸约化特性、Sc-PseAAC 与理化性质三类异构特征统一于同一数学表达体系，增强模型判别能力；（2）设计基于 Stacking 策略的集成学习模型：以 LightGBM、XGBoost 和 RandomForest 为基学习器，Logistic 回归为元学习器，构建机器学习分类器；（3）引入可解释性约束优化目标函数，结合 SHAP、LIME 等方法量化特征贡献，实现模型决策的生物学可解释性；（4）开发高维稀疏特征下的高效计算与正则化策略，有效缓解过拟合，提升泛化性能。其工作为项目提供了核心算法支撑与理论创新。

乔赛：针对 iProps 软件开发的复杂流程，设计并实施多层次测试方案，覆盖单元、模块与端到端场景，有效保障算法实现的正确性与数值稳定性；在抗冻蛋白识别模型开发中，通过系统性调试优化 Stacking 集成框架中基学习器与元学习器的数据流与参数传递，显著提升模型收敛速度与预测一致性；构建自动化测试脚本与回归测试机制，支持跨平

台兼容性验证，为 iProps 的开源发布与科研应用提供了可靠质量保障。

全部完成单位：泰山学院

排序：1/1

主要知识产权：

一种用于计算机系统的数据管理方法及系统—国家发明专利

计算机软件在线实时可视化调试方法及装置—国家发明专利

一种针对肺 CT 图像阈值分割结果的肺膜粘连结节区域精确修复方法—国家发明专利

基于计算机软件开发的加密系统及方法—国家发明专利

一种实现多通道数据采集的单片机数据处理系统和方法—国家发明专利

代表性论文：

[1] A stacking-based algorithm for antifreeze protein identification using combined physicochemical, pseudo amino acid composition, and reduction property features.

[2] iProps: A Comprehensive Software Tool for Protein Classification and Analysis With Automatic Machine Learning Capabilities and Model Interpretation Capabilities.

[3] CRCF: A Method of Identifying Secretory Proteins of Malaria Parasites

推广应用:

本项目相关技术成果已实现有效转化与应用。其中，项目团队研发的国家发明专利“一种用于计算机系统的数据管理方法及系统”（专利号：ZL202311003051.5）于2023年11月28日已通过专利许可方式授权给泰安学志信息有限公司，合同的有效期限为2023年11月28日至2025年11月27日，转化金额20万元。该专利已集成应用于该公司生物信息分析平台的数据处理模块，显著提升了其系统在多源异构数据管理与高效调用方面的性能，标志着项目成果从理论研究向产业应用迈出实质性步伐。专利预计实施一年后能为企业创造产值百余万元，可以取得良好的经济效益和社会效应。以合作项目为依托，公司目前在申请发明专利1项，正在撰写的发明专利有1项。该专利的成功转化和应用成为我校为推进泰安市经济发展社会服务项目中的重要组成部分。

经济和社会效益:

本项目涉及的研究对象为生物研究中蛋白质的识别与分析，所属范畴为技术开发及科学研究中的基础性算法工具研发。项目核心目标是为相关领域研究人员和从业人员开发一套免费、高效、易用、跨平台的智能分析与计算工具，重点体现于方法创新性、工具实用性与科研支撑能力。因此，本项目暂不设置直接经济指标；其价值主要体现在通过开源软件降低生物医药、食品等领域功能蛋白研发的初期

实验成本。

提升基础科研效率：所开发的开源、免费、易用的智能分析工具，可显著降低高校、科研院所及中小型生物技术机构在蛋白质功能预测方面的技术门槛与计算成本，助力科研人员高效开展功能蛋白相关研究。

推动科研工具国产化与自主可控：项目产出的软件工具基于自主算法与代码实现，减少对国外商业软件或封闭平台的依赖，增强我国在生物信息学基础工具领域的技术自主性。

服务生物医药与食品产业发展：抗冻蛋白识别模型可为本市食品保鲜、冷冻医疗、生物制剂稳定等应用场景提供理论支持与计算筛选手段，潜在服务于本地相关企业的技术研发需求。

促进学科交叉与人才培养：项目融合生物信息学、人工智能与计算生物学，为培养兼具生物学背景与数据科学能力的复合型人才提供实践平台与教学资源。

推动科研成果开放共享：通过开源发布代码与申请软件著作权，保障成果的可复现性与广泛传播，营造开放、协作的科研生态。

项目二

项目名称：随机因素影响下非线性系统的稳定性及其控制策略研究

项目简介：

在自然界与工程技术等领域普遍存在受随机因素影响的非线性动力系统，其失稳可能导致结构破坏或设备失效。为保障系统安全可靠地运行，本项目将随机因素构建为高斯与泊松白噪声共同激励模型，针对高斯与泊松白噪声共同激励下的非线性系统，建立了随机稳定性分析与控制理论，具有重要的理论意义与应用价值。

1. 在科学价值方面，本项目实现了以下核心突破。

（1）理论模型的突破。传统控制理论多基于确定性系统或仅考虑高斯噪声激励的情形，难以刻画实际工程中存在的突发性、冲击性扰动（泊松噪声）。本项目构建了高斯与泊松白噪声共同激励下复杂非线性系统的模型，极大地拓展了随机动力学的研究范畴。

（2）方法的创新。将随机平均法与动态规划原理相结合。本项目通过随机平均法，将高维复杂的系统运动方程简化为维数大幅降低的平均 Itô 随机微分积分方程，克服了“维数灾难”问题。然后，基于动态规划原理建立了具有待定成本函数的动态规划方程，并求解出全局最优的控制律。

（3）稳定性判据的精确化。本项目推导了受控系统的最大 Lyapunov 指数，以此为量化指标，确定了使系统概率为 1 渐近 Lyapunov 稳定的最优控制力，实现了稳定性的定量设计与控制。

2. 在技术价值方面，本项目提供了高效、可靠的工程控制策略设计流程。

（1）复杂度显著降低。随机平均法的应用，将稳定化控制的设计从高维原系统空间转化到低维平均系统空间，极大地简化了设计的复杂性，提高了计算效率。

（2）控制律的最优性与普适性。所推导的最优控制律源于动态规划原理，保证了在给定性能指标下的全局最优性。该设计方法可适用于具有相同数学结构的各类工程系统，如航空航天、机械制造、土木工程等领域。

（3）有效性充分验证。本项目将理论成果应用于典型工程系统，进行了详细的数值模拟。通过对比控制与未控制情况下系统的响应，验证了控制策略的有效性。

3. 在经济与社会价值方面，本项目的成果对经济社会发展和公共安全具有深远意义，为工程安全保驾护航。

（1）提升装备可靠性，降低运维成本。在航空航天、风力发电、高速列车等领域，关键部件长期承受风载、气流冲击等随机激励。应用该控制策略，可有效延长设备寿命，减少故障。

（2）保障基础设施安全，服务公共安全。大型土木工程结构（如桥梁、超高层建筑）在地震、强风等极端荷载下的稳定性至关重要。本项目的方法，可为这类结构的振动控制和安全防护设计提供科学依据，提升城市应对自然灾害的韧性，保障人民生命财产安全，社会效益显著。

（3）推动相关产业技术升级。本成果为智能控制、可靠性工程等领域提供了新的理论工具和技术路径，有助于推

动高端装备制造业、防灾减灾产业的技术进步和自主创新能力提升。

4. 在文化价值方面，本项目是力学、数学与控制科学的深度交叉融合。展示了从工程中提炼科学问题，用科学理论指导工程实践的科研范式，对于营造鼓励创新的科研文化具有示范作用。

本项目在随机稳定性及其控制领域取得了从理论到应用的创新，成果具有重要的科学意义和广阔的产业化应用前景，符合泰安市科技创新成果提名奖的评选要求。

完成人排序及对项目的创新贡献：

1. 刘伟彦，本项目负责人，是项目研究体系的总设计者与核心贡献者，对各项科技创新点起到决定性作用。具体贡献包括：

（1）构建理论框架：提出将随机平均法与随机最优控制理论相结合的核心思路，确立了解决混合噪声激励下拟哈密顿系统稳定化问题的总体技术路线。

（2）奠定核心理论：主导完成了从系统运动方程推导平均 Itô 微分方程、建立动态规划方程到求解最优控制律的全过程关键推导。

（3）创立稳定性判据：推导受控系统最大 Lyapunov 指数的解析表达式，为稳定性分析与参数设计提供了关键理论依据。

（4）指导研究实施：指导团队将理论应用于典型工程系统，通过对数值结果的深入分析，验证了控制策略的有效

性。

2. 尹逊汝，该参与人是项目理论成果验证的核心执行者，主要负责数值模拟与计算分析工作。具体贡献包括：

（1）构建了适用于混合噪声激励非线性系统的数值模拟程序，为验证控制策略提供了可靠工具。

（2）对“拟不可积”与“拟可积非共振”两类系统进行了系统的数值模拟，对比控制前后的相图、时间历程和统计指标，为理论有效性提供了有力证据。

（3）通过参数遍历计算，协助分析了系统参数对控制效果的影响规律，为最优控制策略设计提供了关键数据支持。

该参与人将抽象理论转化为可量化的实证结果，为项目科技创新点的确立提供了不可或缺的数值证据链。

3. 姜山，该参与人承担项目研究的梳理与支撑工作，具体贡献包括：

（1）系统梳理国内外随机稳定性控制与非高斯激励领域文献，为项目立项与创新点确立提供理论依据。

（2）协助数值模拟阶段的数据处理与图表绘制，使理论结果清晰呈现。

（3）参与研究资料整理与论文初稿撰写，协助完成部分章节的写作与校对。该参与人的工作有效保障了项目研究的规范性与效率，是团队的重要支持力量。

4. 杨洪祥，该参与人主要负责项目的理论推导工作。具体贡献包括：

（1）负责理论推导。应用随机平均法，完成了从系统

原方程到关于多个首次积分的平均 Itô 随机微分方程的严格推导。

(2) 求解最优控制律。基于动态规划原理，参与建立并求解了具有待定成本函数的动态规划方程，为多自由度系统找到了全局最优的控制律解析表达式。

(3) 完成数值模拟验证。负责将理论方法应用于典型工程系统，设计并执行了控制与未控制系统的对比数值模拟，以直观、有力的数据验证了所提控制策略的有效性和优越性。

该参与人的工作，为项目科技创新点的理论严谨性提供了坚实基础。

全部完成单位及排序：

泰山学院（1/1）

提名书中主要知识产权、代表性论文、论著目录：

1. Weiyan Liu, Xunru Yin, Zhongjin Guo, Hongxiang Yang, Nana Shan. Feedback stabilization of quasi nonintegrable Hamiltonian systems under combined Gaussian and Poisson white noise excitations. Probabilistic Engineering Mechanics, 2023, 71:103407.

（SCI 一区检索，影响因子 2.6）

2. Weian Liu, Xunru Yin, Zhongjin Guo, Shan Jiang. Stochastic stabilization of quasi integrable and non-resonant Hamiltonian systems under combined Gaussian and Poisson white noise excitation. Probabilistic Engineering Mechanics, 2025, 79:103733.

(SCI 一区检索, 影响因子 3.5)

3. 刘伟彦. 高斯与泊松白噪声共同激励下高维非线性系统的随机稳定性. 湘潭大学出版社, 2021.06. (ISBN 978-7-5687-0557-8)

4. Weiyan Liu, Weiqiu Zhu, Lincong Chen. Stochastic averaging for SDOF strongly nonlinear system under combined harmonic and Poisson white noise excitation. International Journal of Non-linear Mechanics, 2020, 126: 103574. (SCI 二区检索, 影响因子 2.313)

推广应用情况、经济和社会效益:

本项目“随机因素影响下非线性系统的稳定性及其控制策略研究”研究成果的核心内容已发表和出版于本领域国际权威学术期刊 Probabilistic Engineering Mechanics、International Journal of Non-linear Mechanics 等, 以上论著系统地阐述了该成果的理论方法, 已成为该研究方向的重要文献。自发表以来, 在非线性随机动力学与控制领域获得了国内外同行的广泛关注与正面评价, 多位同行学者在他们公开发表的学术论文中引用了本项目成果, 并给予了积极评价, 部分引用如下:

(1) 在论文 “K. Mathiyalagan, T. Elizabeth Jeyanthi. Backstepping control for stochastic strict-feedback systems with Lévy noise. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2025, 195: 116241.” 中引用了本项目论文, 评价为:

“ Applebaum et al. [31] addressed almost sure exponential stability by imposing bounds on the coefficients of SJDS. Moment stability for SJDS driven by Lévy noise imposing boundedness has also been discussed by many authors see, [32, 33] and references therein. Stability analysis of SJDS by the process of linearization has been investigated in [34 – 36] etc.”

(2) 在论文 “Sun, JJ, Luo YY, Chen LC, Yan B. Approximate averaged derivative moments and stochastic response of high-DOF quasi-non-integrable Hamiltonian systems under Poisson white noises. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2024, 166: 104805.” 中引用了本项目论文, 评价为: “The stochastic averaging method is a powerful dimensionality reduction approach for investigating the stochastic dynamics of multidegree-of-freedom (MDOF) quasi-non-integrable Hamiltonian systems under Poisson white noise [34 – 36].”

(3) 在论文 “Chen XF, Li, J, Ma JZ. Dynamical responses for a vertical vibration model of a four-roller cold rolling mill under combined stochastic and harmonic excitations. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2023, 73: 103480.” 中引用了本项目论文, 评价为: “Recently, the dynamic responses of

a series of typical nonlinear systems with combined excitation were investigated, including Duffing oscillator [26], Hamiltonian system [27], and M-D-O-F system [28,29].”

(4) 在论文 “Sun, JJ, Luo, ZQ, Yan B. Stochastic stability of nonlinear mechanical metamaterial systems under combined Gaussian and Poisson white noises. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2025,143:108621.” 中引用了本项目论文, 评价为: “Since most random loads can be effectively described as a combination of Gaussian and Poisson white noise [26,27], some researchers [28,29] have applied the stochastic averaging method to determine the stochastic stability of quasi non-integrable Hamiltonian systems under combined Gaussian and Poisson white noises.”

(5) 在论文 “刘伟渭, 余玺, 唐爽权, 沈印, 张国勇. 磁悬浮列车非线性随机稳定性及分岔研究. *铁道学报*, 2025, 47(7): 52-63.” 中引用了本项目论文, 评价为:

“研究概率为 1 渐进稳定性一般使用最大 Lyapunov 指数方法 [26].”

这些在国内外学术期刊的公开、正面引用, 客观、公正地印证了本项目研究成果的科学价值、技术水平、重要意义及学术影响力。

本项目成果已发表多篇 SCI 论文与专著，属多学科交叉研究。针对国际前沿的随机因素影响下的非线性系统的稳定性及其控制问题，提出了基于最大 Lyapunov 指数与 Lyapunov 函数的稳定性分析与控制方法，获同行应用推广，为相关研究奠定理论基础。成果为重大基础设施与高端装备在极端荷载下的安全设计提供理论支撑，服务于国家防灾减灾战略；通过提升系统可靠性，降低维护成本，并为高端装备制造业升级提供技术支持，具有显著社会与经济效益。

项目三

一、项目名称

具有输入时滞的随机 Stackelberg 博弈控制及应用

二、项目简介

在当前国家大力推动“先进控制与智能制造”及“工业节能降碳”战略背景下，产业系统普遍面临控制复杂、能效低下、资源配置不均等关键问题。特别是在供应链与装备控制等典型工业场景中，系统普遍具有多层决策结构、输入时滞特性与随机扰动影响，导致传统控制算法难以实现全局最优。如何在不确定环境下实现多层决策系统的协同优化与能效提升，已成为智能制造与工业控制领域亟待突破的核心科学与工程问题。

本项目以此为导向，依托申请人前期关于确定性系统 Stackelberg 博弈控制的研究基础，系统研究了具有输入时滞的随机 Stackelberg 博弈控制问题，并进一步拓展至混合

H_2/H_∞ 控制框架。该研究聚焦于工业系统中常见的时滞随机控制难题，提出了以随机极大值原理为核心的求解机制，从理论上揭示了时滞系统最优解的存在性与唯一性条件，构建了可求解的最优层级决策模型。该模型克服了传统方法中将复杂混合控制问题简化处理的局限，实现了对非因果性与随机扰动双重约束下的真实混合控制问题的求解，为复杂工业过程的层级优化提供了统一理论框架。

在应用层面，本项目成果面向企业的实际生产与节能需求进行了工程化落地。团队基于上述理论成果，构建了供应链协同优化模型与智能节电控制系统，并在企业应用中完成了系统验证。在供应链场景中，团队整合了企业上下游数据流与信息流，针对库存调度、运输计划及生产排程问题，建立了多层博弈优化模型。该模型显著提升了企业供应链的整体响应效率，实现了订单执行周期缩短与成本约束条件下的最优调度。在节能控制场景中，项目基于最优控制理论与动态能耗建模，提出了自适应节电算法并完成控制器参数调试。系统可根据实时负载与工况自动调整输出策略，实现“感知—决策—控制”一体化闭环优化。控制器具备自学习与参数自整定功能，设备平均能耗下降约 12.8%，单位产品能耗降低 0.6kWh/件，综合效率提升 9.6%，节能率稳定在 10% - 13%。目前，研究成果已在合作企业供应链管理系统与生产线中连续运行两年以上，具备良好的可靠性与鲁棒性。系统运行后企业能源成本与维护成本明显下降，库存周转率与生产协调度显著提升，形成了稳定的经济与社会效益。项目成果同时

被纳入企业后续车间改造与节能推广计划，展现出较强的可复制性与行业推广潜力。

总体而言，本项目在理论上突破了具有输入时滞的随机 Stackelberg 博弈控制求解难题，在工程上实现了从控制理论到实际生产系统的跨界转化，为智能制造、能源管理与供应链优化等领域提供了可落地的系统性解决方案。该成果不仅丰富了系统与控制科学的理论体系，也为多智能体协作、节能控制与产业智能化提供了可持续的技术支撑，具有显著的经济效益与战略价值。

项目执行期间项目负责人发表的学术论文中，共有 19 篇受到了该基金的资助，其中 SCI 检索论文 4 篇，EI 检索论文 15 篇；出版学术专著 1 部；参与授权发明专利 2 项。联合桂林理工大学、山东科技大学兼职培养硕士研究生 6 人。

三、主要完成人（“主要完成人情况”摘自“主要完成人情况表”中的部分内容，公示姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目贡献）

1. **李小倩**：排名 1；副教授；工作单位：泰山学院；完成单位：泰山学院。

项目负责人，负责本项目的总体设计与规划，明确研究方向与技术路线，组织实施全过程研究，组建科研团队并培养青年骨干力量。在研究工作中，负责人针对具有输入时滞的随机博弈控制问题，提出了系统化的解决方案，构建了具有输入时滞的随机博弈控制理论体系。在工程应用方面，将理论成果成功嵌入实际控制系统，形成了可直接部署的博弈

优化算法，实现了复杂系统的分层协调与能效最优控制。该方法已在供应链管理、节能调度及云计算能耗优化等领域实现应用，显著提升了系统响应速度与资源利用率，推动了理论成果的产业化落地。负责人作为 9 篇代表性论文的通讯作者，对项目的科学创新与工程应用均作出关键性贡献，本项目研究工作量占本人工作量 80%。

2. **景宗雷**：排名 2；在读博士生；单位：北京航空航天大学；完成单位：泰山学院。

项目主要参与人，利用最优滤波方法得到多层级博弈系统的最优估计以及控制器的设计；利用在线强化学习算法推导 Stackelberg 策略集控制器。是主要科学发现的主要贡献者。主要学术贡献为：对本项目的第一、二、四项科学发现做出了重要贡献，是代表性论文 1 的共同第一作者，是代表性论文 8 的第一作者，本项目研究工作量占本人工作量 50%。佐证材料为代表性论文 1、2、3、5、6、7、8、9。

3. **鞠培军**：排名 3；教授；工作单位：泰山学院；完成单位：泰山学院。

项目主要参与人，研究了具有输入时滞的连续时间系统的最优控制问题，给出控制器结构并同时得到控制器结构的策略。主要学术贡献为：对本项目的第一、二、四项科学发现做出了重要贡献。是代表性论文 1、2、3、5、6、7、8、9 的合作者。本项目研究工作量占本人工作量的 30%。佐证材料为代表性论文 1、2、3、5、6、7、8、9。

4. **张焕水**：排名 4；教授；工作单位：山东科技大学；

完成单位：泰山学院。

项目主要参与人，协助项目负责人寻找正则问题解存在的条件，指导项目负责人利用正则 Riccati 方程推导得到混合问题的标准解；主要学术贡献为：对本项目的第一、三项科学发现做出了重要贡献。是代表性论文 4 的通讯作者，是代表性论文专著 1、3、4 的合作者。本项目研究工作量占本人工作量的 30%。佐证材料为代表性论文 1、3、4。

5. **国忠金**；排名：5；教授；工作单位：泰山学院；完成单位：泰山学院。

项目主要参与人，给出激励型 Stackelberg 策略在多智能体系统中的模型，对多个控制器的结构以及存在条件进行了论证。主要学术贡献为：是主要科学发现一、二的主要贡献者。是代表性论文专著 3、7 的合作者。本项目研究工作量占本人工作量的 30%。佐证材料为代表性论文 3、7。

四、主要完成单位（“主要完成人单位”摘自“主要完成单位情况表”中的部分内容，公示单位名称、排名、对本项目主要学术贡献）

该项目由泰山学院独立完成，泰山学院对本项目的所有科学问题做出了贡献。

五、代表性论文专著目录

[1] Zonglei Jing, **Xiaoqian Li***, Peijun Ju, and Huanshui Zhang. Optimal Control and Filtering for Hierarchical Decision Problems with H_∞ Constraint Based on Stackelberg Strategy. *IEEE Transactions on*

Automatic Control, , 2024, 69 (9), doi.
10.1109/TAC.2024.3374487.

[2] **Xiaoqian Li***, Zonglei Jing, and Peijun Ju. Leader-Follower Based Online Reinforcement Learning Algorithm in Problem with Hierarchy Decision Makers. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 2024, 29 (1): 48–58. DOI: 10.62678/IJICS202403.10114.

[3] **Xiaoqian Li***, Mengyu Bai, Huanshui Zhang, Zonglei Jing, Peijun Ju, and Zhongjin Guo. Incentive Stackelberg Game for H_∞ -Constrained Multi-hierarchy Systems Under Observation Information. *IET Control Theory and Applications*, 2022, 16 (18): 1821–1833.

[4] **Xiaoqian Li**, Juanjuan Xu, and Huanshui Zhang*. Standard Solution to Mixed H_2/H_∞ Control with Regular Riccati Equation. *IET Control Theory and Applications*, 2020, 14 (20): 3643–3651.

[5] **Xiaoqian Li***, Peijun Ju, and Zonglei Jing. Solution of Delayed Mixed H_2/H_∞ Problem with Continuous-time System Based on Nash Game Approach. *Proceedings of the 40th Chinese Control Conference*, 2021, 1508–1512.

[6] **Xiaoqian Li***, Peijun Ju, Zhongjin Guo, Jing Lei, and Zonglei Jing. A Nash Game Approach to Mixed H_2/H_∞

Problem with Input Delay: The Discrete-Time Case. *33rd Chinese Control and Decision Conference*, 2021, 3763–3767.

[7] Liu Tang, Mengyu Bai, **Xiaoqian Li***, Zonglei Jing, Zhongjin Guo, and Peijun Ju. H_∞ Constrained Control for Multi-Hierarchies Decision Players with Asymmetric Information. *Proceedings of the 41th Chinese Control Conference*, 2022, 1706–1710.

[8] Zonglei Jing, **Xiaoqian Li***, Xianglong Li, Peijun Ju, Tongxing Li, and Shufen Zhao. Online Stackelberg Learning Solution for Non-Zero-Sum Games with Infinite Horizon Cost. *China Automation Congress*, 2022, 822–826.

[9] **Xiaoqian Li***, Zonglei Jing, Peijun Ju and Shufen Zhao. Optimal Trajectory Tracking for Unknown H_∞ Constrained Systems Based on Reinforcement Learning. 2023 China Automation Congress (CAC), Chongqing, China, 2023, pp. 44–49, doi: 10.1109/CAC59555.2023.10450886.

[10] 李小倩. Stackelberg 模型在非合作博弈控制问题中的应用研究. 清华大学出版社, 2022.

六、推广经济效益和社会效益

本项目研究成果不仅在学术层面上丰富了系统与控制科学的理论体系, 而且为相关成果的推广应用奠定了坚实基础, 特别是在多智能体协作控制等前沿方向展现出重要价值。

在该领域中，智能体通常指具备感知、通信和信息处理能力的单元，如无线传感器、移动机器人、自主车辆和空天飞行器等，多智能体系统则由这些单元通过通信网络构成，依靠局部协作完成复杂任务。由于其具有鲁棒性、灵活性和可扩展性，已成为当前网络控制理论研究的重要方向。项目提出的理论成果为此类系统的协调与优化提供了新的思路和方法，有望为智能交通、航天控制、机器人集群、军事科技和交通监控等领域提供有力支撑，推动先进控制理论在国家战略性新兴产业中的落地与发展，具有广阔的社会应用前景与深远的战略意义。

本项目技术前期已经在山东富源众邦电子有限公司、山东云孚智能科技有限公司和深圳市回车科技开发有限公司得到应用。具体应用情况包括：

1、生产情况：本项目在三家合作企业中均实现了技术落地与系统部署，覆盖制造业、能源控制及信息技术服务等不同产业场景。在制造企业中，项目团队通过整合供应链上下游数据，建立了时滞随机 Stackelberg 博弈控制模型，实现了库存调度、生产计划与物流运输的动态协调，使生产计划响应时间缩短约 15%，库存周转周期减少 12%。在能源控制领域，项目团队完成了智能节电系统的控制器调试与算法优化，使生产设备平均能耗下降约 12.8%，单位产品能耗降低 0.6kWh/件，综合效率提升 9.6%。在信息技术企业中，项目技术被应用于云计算与大数据平台的能效调度，实现服务器能耗降低约 11.5%，系统响应时延缩短 20%，显著提升

了数据处理效率和系统稳定性。

2、应用情况：三家企业的应用成果表明，该项目的核心算法在不同场景下均具备良好的鲁棒性和可扩展性。供应链优化系统通过引入时滞补偿和博弈协调机制，实现了多层决策的全局最优控制，企业整体运营成本下降约 8%；智能节电系统通过自学习控制与闭环优化机制，实现了长期稳定节能，节能率保持在 10% - 13%；信息技术企业的云平台能耗控制模块则实现了计算资源的自适应分配与动态调度，使系统能效和运行经济性显著提升。三家企业均验证了项目技术在实际生产环境中的可靠性与工程实用性。

3、推广情况：目前，三家企业的系统均已稳定运行两年以上，运行效果持续良好。制造与能源类企业已将本项目成果纳入新一轮节能改造与生产调度系统升级计划，并在下游合作厂区进行复制推广。信息技术企业计划将本项目的能耗调度与博弈优化机制应用于数据中心与工业互联网平台建设中。项目的持续推广不仅带动了合作企业的智能化与数字化转型，也在区域范围内形成了可复制、可推广的产业示范效应，为智能制造、节能控制与数字经济融合发展提供了现实样板。

基于该合作产生的经济和社会效益包括：本项目研究成果在丰富系统与控制科学理论体系的同时，推动了先进控制方法在工程领域的应用转化。本项目在智能制造、能源调度和供应链优化等领域实现了推广应用，显著提升了企业的生产效率与资源利用率。通过在供应链优化、节能控制和智能

调度系统中的落地应用，相关企业平均能耗降低约 10%，运营效率提升 8% - 15%，形成了良好的示范带动效应。项目推动了区域制造业与数字产业的智能化、绿色化转型，带动上下游企业开展技术改造与数字化升级，促进了节能减排与可持续发展。研究成果在提升产业核心竞争力的同时，也产生了显著的间接经济效益，对促进地方产业结构优化和高质量发展具有重要的社会价值与长远意义。

项目四

一、项目名称

增强钙钛矿光伏器件性能的材料设计及界面优化的关键技术研究

二、项目简介

为深入贯彻“四个革命、一个合作”能源安全新战略，推动新能源产业高质量发展。国家能源局《2025 年能源工作指导意见》和山东省《新能源产业科技创新行动计划（2025-2027 年）》对新能源发展提出了新任务、新要求，要求光伏电池关键材料、设备及组件自给水平显著提升，新型光伏电池实现规模化生产及应用。钙钛矿太阳能电池（PSCs）作为新能源光伏器件的代表，将进一步引领能源生产和消费革命的主流方向，发挥能源绿色低碳转型的主导作用，为实现碳中和目标提供支撑。

1、在材料设计、界面优化和器件方面，本项目解决了制备高质量钙钛矿电池薄膜以及高稳定性、高效率钙钛矿器

件的瓶颈问题。创新性地提出通过钙钛矿光敏化材料组分及微观结构调控、制备新型电子提取材料、活性层界面优化、多异质结和体相异质界面结构建等方法来大幅提升钙钛矿电池的光伏性能。揭示了钙钛矿材料组分微观结构和晶粒界面优化对于有机-无机杂化钙钛矿薄膜的形貌控制、非辐射复合和缺陷密度影响的内在机理。阐明了界面钝化对于钙钛矿薄膜晶粒尺寸、热稳定性和光伏性能优化和提升策略。优化了基于有机无机杂化钙钛矿薄膜的工艺流程和关键技术。开发了大面积有机无机杂化钙钛矿太阳能电池的制备工艺，有效面积为 60cm^2 的钙钛矿电池的转换效率高达 15.78%，采用含氟热塑性聚氨酯 FTPU 封装的器件放置 6 个月后，其光电转换效率仅降低 6%。该成果从根本上打破了大面积制备高质量有机-无机杂化钙钛矿薄膜的技术壁垒，为钙钛矿电池的组件生产和未来产业化奠定了工艺基础和技术支撑。

2、在产品推广和应用方面，本项目在山东泰山东方明烨能源科技有限公司搭建完成万级超净室和先进的钙钛矿电池的中试生产线，年生产能力达到 2000 套产品（组件）。钙钛矿光伏组件基本满足民用推广条件，所生产的组件在辐照度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，光伏组件规格 60 片，组件面积分别为 1.8m^2 （ $1.20\text{m} \times 1.50\text{m}$ ），光伏组件的标称功率为 250W。该产品已经用于农光互补、普通用户家庭光伏与建筑一体化等场所。该项目推广应用三年来累积新增直接经济效益 2050 万元，间接经济效益 430 万元，为我国绿色新能源的高价值利用与多元产品开发提供了重要的技术支撑和良好的应用示范。

三、全部完成人排序及对项目的创新贡献

1、姓名：张亚男

排序：1

单位：泰山学院

主要科技创新贡献：（1）完成锡基硫酰胺钝化和 PVP 钝化钙钛矿材料、卤素掺杂钙钛矿材料、氧化钛基复合材料、多异质结复合材料的设计合成与测试表征；

（2）完成基于锡基硫酰胺钝化和 PVP 钝化钙钛矿材料、卤素掺杂钙钛矿材料、氧化钛基复合材料、多异质结复合材料的太阳能光伏器件的制备组装和工艺参数优化；

（3）完成钙钛矿光伏器件的性能优化研究；

（4）完成钙钛矿光伏器件相关的论文撰写和发明专利申请工作；

（5）参与完成光伏器件应用和推广工作。

2、姓名：李群

排序：2

单位：泰山学院

主要科技创新贡献：（1）完成氧化钛基复合材料、多异质结复合材料的合成与分析优化；

（2）完成钙钛矿光伏器件的缺陷测试分析和界面优化；

（3）完成钙钛矿光伏器件的测试与性能优化；

（4）完成钙钛矿光伏器件相关的论文的修改工作。

3、姓名：何明

排序：3

单位：山东泰山东方明烨能源科技有限公司

主要科技创新贡献：（1）校企横向合作研究项目和成果转化推广具体负责人；

（2）完成钙钛矿光伏组件的制备和测试；

（3）完成钙钛矿光伏组件的应用推广和安装调试。

4、姓名：李博

排序：4

单位：山东泰山东方明烨能源科技有限公司

主要科技创新贡献：（1）完成聚乙烯吡咯烷酮、硫酰胺钝化钙钛矿材料的合成与测试；

（2）完成基于界面优化的钙钛矿光伏器件的测试与性能分析；

（3）完成钙钛矿光伏器件的缺陷系统检测和界面缺陷优化；

（4）完成钙钛矿光伏器件大面积制备和性能优化。

四、全部完成单位及排序

1、泰山学院

排序 1

2、山东泰山东方明烨能源科技有限公司

排序 2

五、提名书中主要知识产权、代表性论文、论著目录

序号	论文（论著）名称	发表刊物（出版社）	发表（出版）时间	作者 （按刊物发表顺序）
1	Insight into structure defects in high-performance perovskite solar cells.	Journal of Power Sources	2023.06	张亚男、李群、李博、王成祥

2	Efficient Passivation Strategy on Sn Related Defects for High Performance All-Inorganic CsSnI ₃ Perovskite Solar Cells.	Advanced Functional Materials	2021.03	李博、邸浩翔、常伯宏、尹瑞阳、付琳、张亚男*、尹龙卫
3	Enhanced optical absorption and efficient cascade electron extraction based on energy band alignment double absorbers perovskite solar cells.	Solar Energy Materials and Solar Cells	2019.07	张亚男、李博、付琳、邹勇、李群、尹龙卫
4	Surface passivation engineering strategy to fully-inorganic cubic CsPbI ₃ perovskites for high-performance solar cells.	Nature Communications	2018.03	李博、张亚男、付琳、于彤、周舒婕、张芦元、尹龙卫
5	A fluorine-modulated bulk-phase heterojunction and tolerance factor for enhanced performance and structure stability of cesium lead halide perovskite solar cells.	Journal of Materials Chemistry A	2018.07	付琳、张亚男、常伯宏、李博、周舒婕、张芦元、尹龙卫
6	Efficient electron transfer layer based on Al ₂ O ₃ passivated TiO ₂ nanorod arrays for high performance evaporation-route deposited FAPbI ₃ perovskite solar cells.	Solar Energy Materials and Solar Cells	2017.05	张亚男、李博、张芦元、尹龙卫
7	Reduced Graphene Oxide Wrapped Mesoporous Hierarchical TiO ₂ -CdS as a Photoanode for High-Performance Dye-Sensitized Solar Cells.	European Journal of Inorganic Chemistry	2017.04	张亚男、王成祥、袁之敏、张芦元、尹龙卫
8	Graded Heterojunction Engineering for Hole-Conductor-Free Perovskite Solar Cells with High Hole Extraction Efficiency and Conductivity.	Advanced Materials	2017.10	李博、张亚男、张芦元、尹龙卫
9	PbCl ₂ -tuned inorganic cubic CsPbBr ₃ (Cl) perovskite solar cells with enhanced electron lifetime, diffusion length and photovoltaic performance.	Journal of Power Sources	2017.05	李博、张亚男、张芦元、尹龙卫

六、推广应用情况

目前本课题组开发的钙钛矿光伏组件已经通过国家标准 GB/T19064-2003 测试，满足民用推广条件，所生产的组件在辐照度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，光伏组件规格 60 片，组件面积分别为 1.8 m^2 ，光伏组件的标称功率为 250 W。该光伏组件安装简易，维护方便，价格低廉，使用寿命长。2022 年由山东泰山东方明烨能源科技有限公司推向市场以后，获得良好的反馈和极大成功。在大型商场、高铁广场和写字楼以及家庭用户中进行宣传和推广应用。山东泰山东方明烨能源科技有限公司公布的 2023 年到 2024 年度报告中提出，通过新增一线品牌客户订单的带动，公司业绩明显增长，全年销量得以同比增长 12.4% 至 1050 万片（组件）；其次是受益于提高高端产品占比，从而推动公司贴合产品销量占比由去年同期的 25.5% 增长至 48.6%。公司 2022 年-2024 年完成营收 2050 万元，同比上涨 15%；实现净利润 430 万元，同比增长 18%。

七、经济效益和社会效益

1、经济效益：本课题组对分布式光伏发电技术经济效益测算研究发现，成果转化后经济效益 2022-2024 年新增利润分别为 50 万、100 万和 280 万元。

2、社会效益：太阳能电池深刻影响着国家的工业、农业和商业发展，钙钛矿太阳能电池的利用是国民经济和社会可持续化的重要组成部分。是以绿色无污染化带动工业化，转变经济增长方式，提高国民经济运行质量和效率，对实现

新能源规划和碳中和目标具有十分重要的意义。

项目五

一、项目名称

人工智能驱动的多维度智能信息处理关键技术研究及应用

二、成果简介

本成果由泰山学院胡志强团队牵头，联合泰安市奇蚁信息科技有限公司、山东云聚科技有限公司研发，构建“AI 驱动数据处理-混沌神经网络优化-深度学习建模控制”技术体系，覆盖智慧营销、机器人、医疗、环保多场景。技术上首创“AI+混沌+深度学习”融合框架：多变频正弦混沌神经网络提升 TSP 问题精度 22%，CBSO-DBN 模型使污水处理控制精度升 76.16%，AI 用户兴趣挖掘技术降需求定位误差 40%。获国家发明专利 2 项、其他知识产权 5 项，发表 SCI/EI 论文 7 篇、出版著作 3 部。

三、全部完成人

胡志强；夏卫振；刘心语；赵晓东；张永锋

四、项目的创新贡献

（1）胡志强（泰山学院）：主导技术体系，研发模型提控精，获专利发论文。

作为项目负责人，主导“人工智能驱动的多维度智能处理”技术体系构建，提出“AI+混沌 +深度学习”跨技术融合框架。牵头研发多变频正弦混沌神经网络（MFCSCNN），

攻克其动力学特性优化与 TSP 问题应用难题；推动深度学习驱动的污水处理水质建模技术落地，研发 CBSO-DBN 模型并实现 76.16%的控制精度提升。统筹专利、论文、成果转化全流程，主导合作发表 SCI/EI 论文 7 篇，授权国家发明专利 2 项，实用新型专利 2 项，为项目技术系统性与落地性奠定核心基础。

（2）夏卫振（泰安市奇蚁信息科技有限公司）：攻 AI 匹配难题，提效 40%并转化专利。

聚焦“人工智能驱动的用户兴趣挖掘、智能匹配与大数据推送技术”，发明基于用户兴趣短语特征价值评分的挖掘机制，设计“挖掘窗口筛选+数据集精简”双层优化策略，攻克多模态数据（尤其是图像数据）智能匹配难题，研发双评估网络匹配模型，使图像数据匹配可靠度提升 40%。合作主导 2 项相关国家发明专利的技术研发与申报，推动专利实施许可转化，共同完成计算机软件著作权 3 项，为智慧营销、用户协同领域提供核心技术支撑。

（3）刘心语（山东云聚科技有限公司）：促技术落地，核效益助成科研转化闭环。

专注技术应用与效益转化，协调多家企业的技术落地，编制应用效果报告、财务台账分析等旁证材料，明确近三年直接经济效益的计算依据；参与技术推广方案设计，助力项目形成“科研-转化-应用”闭环，在社会效益层面推动污水处理达标率提升、养老服务效率优化等民生价值落地，为项目的应用规模与效益验证提供关键支撑。

(4) 赵晓东 (泰山学院): 攻建模技术, 研软件适配多场景。

深耕“深度学习驱动的非线性复杂系统建模与智能控制技术”, 提出基于复杂性结构优化 (CBSO) 的深度信念网络建模方法, 构建“拟合误差-计算复杂度”双目标优化机制; 研发基于知识与深度学习的模型预测控制软件, 实现污水处理、智能穿戴等场景的多系统适配。推动软件著作权申报与民生设备 (如智能盆栽、共享单车装置) 技术应用, 发表学术论文 2 篇, 强化项目在工控与软件领域的技术价值。

(5) 张永锋 (泰山学院): 攻关技术, 升准率优算法集成应用测试。

负责“混沌神经网络驱动的多场景智能优化技术”中医疗与机器人方向, 提出复值 Logistic 混沌映射并应用于心电图分类, 使 MIT-BIH 数据库分类准确率达 96.5%; 参与智能监护机器人、风电场巡逻机器人的算法优化, 设计“混沌神经网络初规划+遗传算法优化”路径规划双流程, 实现路径长度减少 15%、避障成功率提升至 98%。合作发表 SCI 论文 1 篇, 推动相关技术的落地实施与集成应用, 助力项目在医疗与机器人领域的技术突破与场景落地。

五、全部完成单位

泰山学院, 泰安市奇蚁信息科技有限公司, 山东云聚科技有限公司

六、推广应用前景与措施

(1) 推广应用前景

① 领域拓展前景：技术可向智慧农业（精准灌溉）、智慧交通（路况预测）延伸，解决多领域非线性系统建模与智能优化需求，适配性强。

② 区域辐射前景：从泰安本地向山东省内及周边省市推广，复制“产学研”模式，助力更多传统企业智能化升级，潜力显著。

③ 产业带动前景：推动 AI 与机器人、环保、医疗等产业融合，预计带动上下游产业链产值增长，创造更多就业岗位。

（2）推广应用措施

① 政企协同推广：联合泰山学院、奇蚁信息等单位，举办技术推介会，对接地方企业需求，提供定制化解决方案。

② 技术标准化落地：基于现有专利与软件著作权，制定技术应用标准，降低企业适配成本，加速规模化应用。

③ 人才与技术同步输出：依托高校培养 AI 技术人才，为合作企业提供技术培训，保障技术落地后稳定运行。

七、主要技术文件目录及来源

（1）知识产权

[1] 国家发明专利：胡志强，国忠金，张睿，李小倩，刘心语，张甲兵. 基于人工智能模型的数据挖掘方法及系统. 专利号：ZL 2022 1 0823015.2.

[2] 国家发明专利：胡志强，国忠金，李小倩，姜山，夏卫振，张甲兵，赵晓东. 基于数据挖掘的智能匹配方法及系统. 专利号：ZL 2023 1 0934932.2.

[3] 计算机软件著作权: 泰山学院, 胡志强, 国忠金, 山东云聚科技有限公司, 刘心语, 蒋坤. 基于知识和深度学习的模型预测控制软件 V1.0. 登记号: 2022SR1042506.

[4] 实用新型专利: 胡志强, 李进京, 霍宪旭, 马一浩, 潘明月. 一种新型共享单车停放装置. 专利号: ZL 2020 2 1026722.1.

[5] 实用新型专利: 胡志强, 刘心语, 周红, 马超, 张芳芳, 何慧清, 张甲兵. 一种智能雾化扫地机器人. 专利号: ZL 2021 22 688283.1.

[6] 计算机软件著作权: 山东云聚科技有限公司, 刘心语, 胡志强, 张甲兵, 马超. 云聚 4G 智慧农业大棚监控系统 V1.0. (2021 年 12 月 27 日) 登记号: 2021SR2181374.

[7] 计算机软件著作权: 山东云聚科技有限公司, 刘心语, 胡志强, 张甲兵, 马超. 云聚智能监护设备管理系统 V1.0. (2021 年 12 月 27 日) 登记号: 2021SR2177749.

(2) 论文著作

[1] Zhiqiang Hu, Zhongjin Guo, Gongming Wang, Lei Wang, Xiaodong Zhao, Yongfeng Zhang. The Multiple Frequency Conversion Sinusoidal Chaotic Neural Network and Its Application[J]. Fractal and Fractional, 2023, 7(9): 697.

[2] 胡志强. 人工神经网络原理及应用[M]. 珀加蒙(英国)出版社, 2021.12.

[3] 胡志强. 城市污水处理系统运行及过程控制[M]. 美国: 朗文出版社, 2022.03.

[4] 胡志强, 国忠金. 变频正弦混沌神经网络分析与设计[M]. 电子工业出版社, 2024.11.

[5] Junfei Qiao, Zhiqiang Hu, Wenjing Li. Hysteretic noisy frequency conversion sinusoidal chaotic neural network for traveling salesman problem[J]. Neural Computing & Applications, 2019, 31:7055-7069.

[6] Luobing Chen, Zhiqiang Hu, Fangfang Zhang, Zhongjin Guo, Kun Jiang, Lei Kou. Remote wind farm patrol path planning based on the hybrid optimization algorithm[J]. Processes, 2022, 10(10):2101.

[7] Gongming Wang, Guanghui Yuan, Zhiqiang Hu, Yuanying Chi, Qing-Shan Jia, Junfei Qiao. Complexity-based Structural Optimization of Deep Belief Network and Application in Wastewater Treatment Process[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(4):6974-6982.

[8] Fangfang Zhang, Luobing Chen, Lei Kou, Zhiqiang Hu, Minglei Shu, Gongming Wang. Chaotic Neural Networks with Complex-valued Weight and its Applications in Electrocardiogram Classification[J]. Physica Scripta, 2024, 99(1):015240.

[9] Zhiqiang Hu, Zhongjin Guo, Lei Wang, Kun Jiang, Yaping Li. Research on improved chaotic particle swarm optimization algorithm[C]. The 37th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), 2022:

952-957.

[10] Zhiqiang Hu, Xiaodong Zhao, Xiaoqian Li, Lei Wang, Zhonghuan Yang, Liwei Fei. Multi-objective Frequency Conversion Sinusoidal Chaotic Neural Network[C]. The 43rd Chinese Control Conference (CCC), Kunming, China, 2024:1866-1872.

八、经济效益和社会效益

本项目推动人工智能多技术融合应用，在智慧环保领域提升污水处理达标率至 98%，改善区域生态；在民生服务领域优化养老、教育服务匹配效率，提升居民生活品质；深化建设培养 AI 研发人才 5 名，发表学术论文 7 篇，授权知识产权 7 项，助力区域科研与人才培养。项目落地成效显著，近三年累计实现 1568 万元的经济效益，其中直接经济效益约 700 万元。间接带动泰安人工智能和机器人产业链发展，预计 2025 年相关产业产值增长超 1500 万元，形成“科研-转化-应用”良性生态，对推动传统产业智能化升级、助力“智慧泰安”建设具有重要意义。

项目六

一、项目名称

黄河下游风成沉积光释光测年技术优化与古环境重建应用

二、项目简介

本项目聚焦黄河下游湿润-半湿润气候过渡带的鲁中地

区，围绕黄土-古土壤沉积体系开展系统性研究，旨在揭示东亚季风区晚第四纪以来高分辨率的气候变化过程、沉积物源演化及成壤机制，填补区域古环境研究的关键空白。项目成果不仅深化了对我国东部季风区气候系统演变规律的科学认知，也为全球气候变化背景下区域生态环境响应与可持续发展提供了重要理论支撑。

我国黄土高原的黄土-古土壤序列是研究全球气候变化的经典载体，但研究多集中于西北干旱-半干旱核心区，对东部湿润-半湿润区，尤其是黄河下游鲁中山区的研究相对薄弱。该区域地处东亚季风影响的核心地带，气候敏感性强，是理解风尘堆积、河流-风力耦合及季风-水文系统协同演化的理想区域。然而，鲁中地区古土壤的高分辨率年代框架尚未建立，物源归属不清，且对古土壤成因类型缺乏系统辨识，严重制约了对该区古气候记录准确性的评估与区域对比。

针对上述科学问题，本项目创新性地融合沉积学、年代学、地球化学与同位素示踪等多学科方法，选取邵庄（SZ）和佛村（FC）等典型黄土-古土壤剖面，开展系统研究。

本项目围绕黄河流域生态保护与高质量发展国家战略需求，聚焦黄河下游地区广泛分布的黄土-古土壤沉积序列，系统开展晚第四纪环境演变研究。项目创新性地采用光释光测年技术，针对黄河下游风成沉积物的特点，对释光测年所需石英和长石矿物的提纯流程进行了系统优化。该提纯方法包括：将避光采集的沉积物样品水洗以去除表面附着物，湿筛 63-90 μm 粒级的混合矿物颗粒，依次经过 10%浓度的过

氧化氢溶液去除有机质、10%浓度的稀盐酸处理去除碳酸盐矿物，经纯水反复清洗至中性后烘干；随后利用多聚戊酸钠重液进行密度分选，先后经过 2.58g/cm^3 、 2.62g/cm^3 和 2.75g/cm^3 的重液进行分离，分别富集钾长石和石英矿物组分；进一步采用氢氟酸和盐酸进行酸洗刻蚀，选择性溶蚀长石等非目标矿物并去除颗粒表面风化层；最后获得纯净的石英或钾长石单矿物颗粒，显著提升了释光信号的稳定性和测年精度，为高分辨率古环境重建提供了可靠的年代学基础。对山东境内黄河冲洪积平原多个典型黄土剖面进行高精度年代学重建，突破了传统测年方法在风成与水成沉积交叉区域的应用局限。研究结合粒度分析、磁化率、地球化学元素（如稀土元素、主量元素）和矿物学指标，综合判识沉积物来源，明确黄河中游风尘输入与局部河流搬运的相对贡献，揭示物源演化过程。在此基础上，重建了末次间冰期以来华北东部地区的古气候变化序列，识别出多个显著的冷暖交替阶段与极端气候事件，为理解区域气候响应机制提供了关键证据。

通过石英 OSL 单片再生剂量法（SAR）和钾长石后红外释光（pRIR290）测年技术，首次建立了鲁中地区高精度的沉积年代序列：邵庄剖面覆盖 $8.0\pm 1.1\text{ ka}$ 至 $50.8\pm 2.7\text{ ka}$ ，佛村剖面则延伸至 $144.0\pm 7.8\text{ ka}$ ，为区域晚更新世以来的古环境重建提供了坚实的时间标尺。这一技术突破解决了以往该区年代控制薄弱的难题，显著提升了研究的时空分辨率。

在物源分析方面，项目团队对靖边、黎城、佛村、偏关

和东明等多地点黄河沉积物及黄土样品进行碎屑锆石 U-Pb 年龄测定，结合粒度特征对比，明确指出鲁中黄土的主要物源为邻近黄河河漫滩的再搬运沉积物。这一发现揭示了黄河水系在风尘物质供给中的关键作用，深化了对“风成-水成”耦合沉积过程的理解，为区域地貌演化与河流-气候相互作用研究提供了新视角。尤为突出的是，本项目首次在鲁中地区识别出非加积型古土壤的存在。通过野外宏观观察与粒度、化学蚀变指数（CIA）等微观指标综合分析，发现部分古土壤层表现为 5–16 μm 细颗粒比例显著升高、>63 μm 粗颗粒减少、CIA 值偏低等特征，指示其主要由下伏黄土在气候相对稳定期经原地风化淋滤形成。这一发现强调了成壤过程的复杂性，对准确解读古气候记录、避免环境指标误判具有重要意义。

综合研究表明，尽管存在局部成壤改造，鲁中黄土-古土壤序列仍清晰记录了多期冰期-间冰期气候旋回，其变化与东亚季风强度波动高度同步，是全球气候变化在季风边缘区的敏感响应。研究成果发表于 *Quaternary Geochronology*、*Geochronometria* 等国际权威期刊，受到国内外同行广泛关注与引用。

本项目成果在服务国家重大战略需求方面亦具深远意义。数据可为区域气候变化预测、生态修复、水土保持及地质灾害风险评估提供基础数据，助力黄河流域生态保护和高质量发展。同时，项目深化了公众对地球系统科学与气候演变规律的认识，具有显著的社会文化价值。

三、全部完成人排序及其对项目的创新贡献

1. 赵秋月（泰山学院旅游学院）

作为本项目负责人，系统开展了光释光测年技术在沉积物年代学中的应用研究，创新性地将该技术应用于黄河流域、西南山区及汾河流域等典型区域的沉积物定年。负责实验设计、样品测试与数据解析，建立了高精度沉积序列年代框架，揭示了风沙活动、洪水事件与地震沉积的周期性规律，为物源追溯与古气候重建提供了关键年代标尺。主导与四川大学、中国地震局地震预测研究所、青海大学等多家单位的技术合作与数据服务，推动了测年技术的规模化应用。研究成果支撑了多项国家级科研项目，为区域环境演变、地质灾害风险评估提供了科学依据，显著提升了光释光测年技术在古环境与灾害研究领域的应用水平。

2. 彭淑贞（泰山学院旅游学院）

释光测年材料方面，通过设计多组对比实验，优化石英与钾长石样品前处理流程，将避光采集的沉积物样品水洗以去除表面附着物，湿筛 63-90 μm 粒级的混合矿物颗粒，依次经过 10%浓度的过氧化氢溶液去除有机质、10%浓度的稀盐酸处理去除碳酸盐矿物，经纯水反复清洗至中性后烘干；随后利用多聚戊酸钠重液进行密度分选，先后经过 2.58g/cm³、2.62g/cm³ 和 2.75g/cm³ 的重液进行分离，分别富集钾长石和石英矿物组分；进一步采用氢氟酸和盐酸进行酸洗刻蚀，选择性溶蚀长石等非目标矿物并去除颗粒表面风化层；最后获

得纯净的石英或钾长石单矿物颗粒，显著提升了释光信号的稳定性和测年精度。

3. 丁敏（泰山学院旅游学院）

主要负责项目野外采样、实验平台搭建与成果应用推广。野外工作方面，配合团队完成 3 个野外剖面（覆盖黄土高原黄土和鲁中山地黄土）的系统采样，累计采集沉积物样本 200 余件，确保样本的代表性与可追溯性；实验平台建设方面，参与完成 1 个实验室的筹建，尤其是光释光测年实验室辐射安全许可证的办理，保证光释光实验室建设的环境条件，参加光释光仪器的前期论证和购买；成果推广方面，撰写研究报告，为项目成果的实际转化提供了重要支撑。

4. 张伟（泰山学院旅游学院）

主要负责项目野外采样、实验平台搭建与成果应用推广。野外工作方面，制定“多尺度、立体化”采样方案，配合团队完成 4 个野外剖面（覆盖黄土高原黄土和鲁中山地黄土）的系统采样，累计采集沉积物样本 200 余件，建立样本溯源数据库（包含采样位置、深度、岩性特征等 5 项关键信息），确保样本的代表性与可追溯性；实验平台建设方面，参与搭建光释光测年一体化实验平台，完成 1 台光释光测年仪的调试与校准，制定标准化实验操作流程，保障了项目实验数据的一致性与可比性；成果推广方面，推动项目技术与地质勘查、文物保护等领域的需求对接，协助完成钻孔沉积年代测定、沙地沉积物光释光测年研究，撰写研究报告，为项目成果的实际转化提供了重要支撑。

5. 刘秀英（泰山学院旅游学院）

在本项目中，本人聚焦核心技术应用与数据价值挖掘，承担了两大关键工作：一是负责沉积物样品的前处理与光释光测年实验操作，通过优化石英颗粒提纯流程、校准测年仪器参数，提升样品年代数据的准确性，为后续分析奠定可靠数据基础；二是协助梳理年代序列与古气候指标的对应关系，整理出气候突变期的沉积物响应特征，为项目最终揭示研究区晚更新世以来的古气候演化规律提供了重要支撑。个人工作成果已融入项目核心报告，为项目在区域环境演变研究领域的突破提供了有力保障。

四、全部完成单位及排序

项目依托泰山学院提供科研平台支持，拥有“释光测年实验室”（配备 Riso TL/OSL reader Model DA-20），承担全部野外调查、样品处理、实验测试与理论研究工作。所有成果均在本单位完成。

五、主要知识产权与代表性论文、论著目录

1. Zhao, Q.Y., Peng, S.Z., Liu, X.Y., Ding, M., Wang, L., Hao, Q.Z., Kang, S.G., Zhang, W., Xiong, R.W. Yue, J.S., Fan, T. Multi-step post-IR IRSL dating and palaeoclimate implications from 270 to 90 ka in the Central Shandong Mountains, eastern China[J]. Quaternary Geochronology, 2024, 83: 101590.

2. Zhao, Q.Y., Peng, S.Z., Fan, N.N., Wang, L., Hao, Q.Z., Liu, X.Y., Zhou, R., Ding, M., Zhang, W., Liu, N. Luminescence chronology loess-palaeosol deposits in the Central Shandong

Mountains region: provenances and paleoclimate implications[J]. Quaternary Geochronology, 2022, 70: 101296.

3. Zhao, Q.Y., Ding, M., Peng, S.Z., Wang, L., Zhang, W., Song, B., Zhou, R., Yue, J.S., Zheng, D.D., High resolution quartz OSL and K-feldspar post-IR IRSL dating of loess in the central Shandong mountains (eastern China)[J]. Geochronometria, 2021, 48 (1): 232–241.

4. Zhao, Q.Y., Thomsen, K.J., Murray, A.S., Wei, M.J., Song, B. Single-grain quartz OSL dating of debris flow deposits from Men Tou Gou, south west Beijing, China[J]. Quaternary Geochronology, 2017, 41: 62-69.

5. Zhao, Q.Y., Thomsen, K.J., Murray, A.S., Wei M.J., Pan, B.L., Song, B., Zhou, R., Chen, S.Z., Zhao, X.H., Chen, H.Y. Testing the use of OSL from quartz grains for dating debris flows in Miyun, northeast Beijing, China[J]. Quaternary Geochronology, 2015, 30: 320-327.

6. 赵秋月, 方懋, 彭淑贞, 刘宁, 臧凯旋, 宋波, 范念念, 周锐, 张伟, 张文琪, 丁敏, 赖忠平. 倒数第二次间冰期以来黄河下游冲洪积物释光年代及其古气候意义[J]. 第四纪研究, 2022, 42(05): 1277-1286.

7. 赵秋月, 臧凯旋, 彭淑贞, 周锐, 范念念, 丁敏, 方懋, 吉春雯. 末次冰期以来青州黄土光释光测年及其对古气候的指示[J]. 地球环境学报, 2022, 13(03): 281-295.

8. 赵秋月, 魏明建, 周锐, 宋波, 潘宝林. 富石英粉体

热释光陷阱参数对等效剂量的影响[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(02): 372-377.

9. 赵秋月, 魏明建, 周锐, 宋波, 潘宝林, 陈淑贞, 赵晓红. 释光技术在水成沉积物测年中的应用进展[J]. 地质论, 2014, 60(01): 31-38.

10. 赵秋月, 魏明建, 宋波, 周锐, 张彬. 晚更新世云南蒋家沟流域泥石流发育的热释光证据[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(07): 865-868.

六、推广应用情况

光释光测年技术作为第四纪沉积物年代学研究的核心手段, 已在相关高校及科研机构广泛应用, 展现出显著的科学价值与社会效益。该技术依托高分辨率年代测定, 广泛应用于风成沉积、河湖相沉积及灾害性沉积物的定年研究, 服务于古气候重建、环境演变分析及地质灾害评估等领域。目前, 技术成果已推广至四川大学、中国地震局地震预测研究所、青海大学等多家高校与科研单位。合作项目涵盖黄河流域、西南山区堰塞湖等沉积物定年。通过提供改进的光释光测年服务, 支撑了多项国家自然科学基金项目及重大科研课题。该技术的应用不仅推动了区域环境演变规律的深入认知, 还为地质灾害风险评估、气候变化响应机制研究提供了关键数据支撑。

七、经济效益与社会效益

(一) 经济效益

成果支撑下, 四川大学范老师获得四川省自然科学基金

（20 万元）。

（二）社会效益

光释光测年技术为沉积物年代、物源与古气候研究提供了精准年代标尺，推动了第四纪环境演变与灾害响应机制的科学认知，显著提升了我国在古气候与地质灾害领域的科技水平。成果广泛应用于自然资源保护、生态环境修复及防灾减灾规划，为国土安全与重大工程建设提供科学支撑。技术推广至多所高校与科研机构，培养了大批专业人才，提升了公众科学素养。项目服务带动了科研协作与测试产业发展，间接促进了环境咨询、地质调查等相关领域技术服务升级，产生了良好的社会效益与间接经济效益。

项目七

项目名称：樱桃酒酿造工业酵母定向选育关键技术及应用。

项目简介：

项目所属科学技术领域：本项目属于生物技术与食品科学技术领域，具体涉及工业微生物育种、发酵工程及食品加工制造方向。

一、项目背景与技术痛点

我国樱桃酒酿造行业长期面临核心酿造酵母依赖进口的“卡脖子”问题。进口酵母与本土原料适配性差，导致酿造过程中高级醇（杂醇油）含量过高（易引发饮后“上头”）、特征香气物质匮乏等共性技术难题，严重制约了国产樱桃酒

品质提升与产业竞争力。随着高品质进口酒的大举冲击，该问题暴露的更加明显。突破高性能酿酒酵母的定向选育技术，实现菌种国产化替代，对樱桃产业高质量发展至关重要。

二、技术内容与创新点

针对上述瓶颈，本项目在“山东省自然科学基金重点项目”等支持下，通过产学研联合攻关，发明了低产高级醇、高产乙偶姻和乙酸乙酯酿酒酵母的育种关键技术，构建了适宜泰安本土樱桃酒酿造的自主知识产权酿酒酵母，并配套开发了樱桃酒发酵蒸馏节能工艺与设备，显著提升了樱桃酒品质及生产效率，大大减轻了樱桃酒酿造产业对进口酵母的依赖。形成了三项核心创新：

1. 创新点一：发明了低产高级醇、高产乙酸乙酯的酿酒酵母杂交育种关键技术

首次通过杂交育种技术，成功选育出性能稳定的能够低产高级醇和高产乙酸乙酯的酿酒酵母 QL-001，该菌株显著降低高级醇生成并提升愉悦果香。该酵母酿造实验证实，与亲本菌株相比，其可使：酒中异丁醇含量降低 12.64%-16.2%；使异戊醇含量降低 15.9%-19.86%；使活性戊醇含量降低 27.76%-39.77%，使乙酸乙酯（果香关键物质）含量提升 15.8%-56.7%。酿酒酵母 QL-001 具有降低高级醇含量以及提升香气物质乙酸乙酯含量的优点，且性能稳定，所酿酒品果香浓郁，呈现青苹果、菠萝的清新香气，酒体圆润饱满、细腻优雅，品质显著提升。

2. 创新点二：建立了基于代谢工程改造的高产乙偶姻、

低产异丁醇酵母的理性选育技术体系

以代谢工程理论为指导，通过对酿酒酵母 *THI3*、*ADH5*、*BDH1* 等基因的精准敲除与 *BDH2*、*ALSD* 基因的过表达/外源引入，系统性重构了乙偶姻合成代谢通路，成功构建工程菌株 TS002。该菌株能使酒中异丁醇含量降低 11.12%，使乙偶姻含量提高近 4 倍左右，赋予酒体浓郁的烤面包、杏仁、巧克力等醇厚香气。

3. 创新点三：研发了配套的樱桃酒发酵/蒸馏节能工艺与装备

发明集成了樱桃破碎、去核、压榨、清洗、过滤，樱桃酒发酵智能控制与新型白兰地蒸馏装置的全套提质增效装备系统。通过优化工艺与控制参数，进一步抑制了高级醇生成，缩短了陈酿周期，整体生产效率提升，使综合成本降低 3% 以上。

三、技术经济指标与成果

本项目已获授权中国发明专利 3 项，国际发明专利 2 项，发表 SCI 论文 2 篇，出版学术专著 1 部，参与起草山东省团体标准 2 项，完成硕士论文 2 篇，形成了完整的自主知识产权体系。涵盖酿酒酵母高级醇代谢关键基因，构建了低产高级醇酵母菌株，并开发了新型白兰地蒸馏设备及樱桃加工装备。研究成果经相关专家鉴定，综合技术居国内领先水平。

四、应用推广与效益情况

本项目成果于 2022 年开始在省内重点樱桃酒企业实现产业化应用。近两年，仅项目完成单位生产樱桃酒、白兰地

等系列产品 30 万瓶，实现企业新增产值 6000 万元，新增销售收入 206 万元，新增利税 20 万元，减少了每年因樱桃腐烂造成的经济损失近 100 万元。

项目社会与行业效益：成功打破了进口酵母的垄断，大幅降低了行业对进口酵母的依赖，为产业菌种安全提供了有力保障；通过提升樱桃酒品质、减轻饮后不适感，增强了国产樱桃酒的市场竞争力，有力推动了行业的技术进步与转型升级，在乡村振兴工作中解决了当地老百姓就业 50 余人。

全部完成人排序：秦伟帅，张娜，林科，张蕾，周翠霞，郑昌柱。

完成人对项目的创新贡献：

秦伟帅：本项目总负责人。主持完成了低产高级醇酵母菌种构建关键技术研发与产业化的研究方案、技术路线制定、配套设备的研发、生产过程参数优化等研究工作，设计酵母杂交与基因敲除的策略，探究 THI3、ADH5 基因的敲除对酵母高级醇的产量的影响。对技术创新点 1、2、3 有实质贡献。

张娜：完成酵母敲除 BDH1 基因并外源整合 ALSD 基因及结果分析，以酿酒酵母 BY4741 (*Saccharomyces cerevisiae*) 为出发菌株，敲除编码类丙酮酸脱羧酶的 THI3 基因，获得敲除 THI3 基因的工程菌 BY4741-ΔTHI3。敲除工程菌 BY4741-ΔTHI3 编码乙醇脱氢酶的 ADH5 基因，获得敲除 ADH5 基因的工程菌 BY4741-ΔTHI3-ΔADH5。并协助公司完成工业菌的发酵测试分析工作，对技术创新点 2 有实质贡献。

林科：过表达 BDH2 基因，对来自基因组上的 BDH2 基

因过表达后去除 Kan 片段获得 TS002 菌株。并协助公司完成工业菌的发酵测试分析工作，对技术创新点 3 有实质贡献。

张蕾：负责酵母杂交与基因敲除的部分试验。并协助公司完成工业菌的发酵测试分析工作，对技术创新点 1、2 有实质贡献。

周翠霞：负责基因敲除的部分试验。并协助公司完成工业菌的发酵测试分析工作，对技术创新点 2 有实质贡献。

郑昌柱：负责产业化菌种的樱桃酒发酵生产，白兰地蒸馏以及酒的理化指标分析，优化了菌株的发酵及蒸馏工艺条件，对创新点 3 做出了创造性的贡献。

全部完成单位及排序：泰山学院、山东泉灵酒庄有限公司。

提名书中主要知识产权、代表性论文、论著目录：

1.主要知识产权和标准规范证明

（1）一种酿酒酵母及其在生产低高级醇和/或高乙酸乙酯酒产品中的应用

（2）一种低产异丁醇和/或高产乙偶姻的重组酿酒酵母及其构建方法与应用

（3）一种白兰地塔式连续蒸馏装置

（4）WINE YEAST WITH LOW-YIELD HIGHER ALCOHOLS

（5）CHERRY JUICE WINE AND PREPARATION METHOD THEREOF

（6）一种樱桃白兰地酒酿制用发酵装置

- (7) 一种樱桃酒加工过滤装置
- (8) 一种樱桃果汁去核装置
- (9) 一种樱桃果汁压榨装置
- (10) 一种樱桃果汁加工用清洗装置
- (11) 一种樱桃白兰地酒生产用果实破碎装置
- (12) 一种樱桃白兰地酒储酒装置
- (13) 一种樱桃酒加工用渣液分离装置
- (14) 一种樱桃酒生产用冷处理装置
- (15) 团体标准：《樱桃酒》
- (16) 团体标准：《樱桃蒸馏酒及樱桃白兰地》

2. 代表性论文、论著

(1) 论文证明：Transcriptomic and metabolomic correlation analysis: effect of initial SO₂ addition on higher alcohol synthesis in *Saccharomyces cerevisiae* and identification of key regulatory genes。

(2) 论文证明：Transcriptomic and metabolomic analysis: effects of different temperature conditions on higher alcohol production by *Saccharomyces cerevisiae* in grape must and exploration of related genes。

(3) 论著证明：低产高级醇酵母菌种改良与发酵调控。

推广应用情况、经济效益和社会效益：

本项目的相关技术自 2022 年开始先后在企业实施产业化。本项目构建的低产高级醇/高产乙偶姻、乙酸乙酯工业酵母菌株已在山东泉灵酒庄有限公司实现生产化规模应用。应

用结果表明，工程菌 QL- 001、TS002（*Saccharomyces cerevisiae*）以及白兰地蒸馏等装置应用到樱桃酒及白兰地生产中，菌株的发酵性能优良，发酵及蒸馏产品香气浓郁、口感醇厚、好喝“不上头”，研制的系列产品均已上市销售。并取得了良好的经济效益，近两年项目完成单位生产樱桃酒、白兰地等系列产品共计 30 万瓶，实现新增产值 6000 万元，新增销售收入 206 万元，新增利税 20 万元。所生产系列产品各项指标经检测合格率为 100%，质量稳定可靠，应用效果好，具有良好的市场前景。

本项目围绕菌株的产高级醇水平、发酵特性等生产实际要求，综合利用代谢工程改造、杂交育种、等多种生物育种方法，先后研制出低产高级醇、高产乙偶姻和乙酸乙酯的自主知识产权工业菌种 2 株，所酿酒口感醇厚、香气浓郁、好喝“不上头”，具有很强的创新性，是一条极有工业化前景的重要途径，对泰安市樱桃产业健康发展有良好的促进作用。

项目获得了高水平樱桃酒酿造菌种，加强了国内菌种的技术水平和专利保护，为行业菌种的安全性提供有力保障。核心技术通过产业化推广应用，提高企业经济效益，促进当地老百姓就业，减少废物排放，推动产业的技术进步。本技术的推广应用对于提高泰安樱桃加工产品的竞争力，推动樱桃酒酿造相关产业的前进等具有十分重要的意义。

项目八

一、项目名称

基于二维碳化钛 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 超级电容器的创制与开发

二、项目简介

本项目提出构建新型 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 超级电容器，取得了系列原创性突破，整体创新思路如下：

(1) 首次提出了柔性、独立和少层的超致密 $\text{d-Ti}_3\text{C}_2$ 对称 SC 薄膜。通过蚀刻 HCl 和 LiF 混合溶液缓慢干燥防止薄膜与空间之间的自重堆积。能够实现从活性薄膜到电流集电器的有效电子传输，快速充电/放电过程中，更多的阳离子参与插层/脱层。体积能量密度达到 41 Wh L^{-1} ，10000 次循环后电化学稳定性高达 95.3%，表现出优异的热稳定性和可重复性。

(2) 首次实现了通过非原位尿素和 MEA 辅助的溶剂热方法制备 N 掺杂的 Ti_3C_2 薄膜，界面耦合协同提升离子传输与赝电容贡献，UN- Ti_3C_2 薄膜电容为 786 F g^{-1} ，在 20000 次循环后电容保持率 100%。对称 EC 具有 76 Wh L^{-1} 的超高体积能量密度和最大功率密度为 31112 W L^{-1} ，为开发器件满足柔性储能需求的高性能电化学电容器和各种离子电池提供示范作用。

(3) 首次验证了引入 BC、 NaOH 碱处理和低温退火来调节 MXene/BC 复合薄膜的表面官能团， $-\text{Na}$ 和 $-\text{O}$ 官能团占据 MXene 纳米片的表面，比表面积增加到 $62.47 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ，纳米级中间层增强 SSC 离子传输。体积电容为 2186 F cm^{-3} ，能量密度高达 250 W kg^{-1} 。10000 次充放电循环后电容保持

率为 83.46%，为制备高性能薄膜电极提供高效和廉价的有效途径。

(4) 首次阐明了通过静电纺丝技术制备 $\text{MnO}_x/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-MXene/CNFs}$ 复合薄膜电极，柔韧性 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{ MXene}$ 可以有效缓解碳化处理过程中的应力和应变，具有良好的循环稳定性和机械性能。衍生的 MMC/CNF 薄膜电极比电容高达 $211.57\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ ，为制备具有良好电化学性能的 MXene 柔性纤维薄膜电极提供可行的方法。

三、项目主要完成人以及贡献

主要完成人	科技创新贡献	排名
高博文	(1) 首次验证了引入 BC、NaOH 碱处理和低温退火来调节 MXene/BC 复合薄膜的表面官能团， $-\text{Na}$ 和 $-\text{O}$ 官能团占据 MXene 纳米片的表面，比表面积增加到 $62.47\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ ，纳米级中间层增强 SSC 离子传输。 (2) 首次阐明了通过静电纺丝技术制备 $\text{MnO}_x/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-MXene/CNFs}$ 复合薄膜电极，柔韧性 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{ MXene}$ 可以有效缓解碳化处理过程中的应力和应变。	1
阙文修	(1) 首次提出了柔性、独立和少层的超致密 d- Ti_3C_2 对称 SC 薄膜。通过蚀刻 HCl 和 LiF 混合溶液缓慢干燥防止薄膜与空间之间的自重堆积。能够实现从活性薄膜到电流集电器的有效电子传输，快速充电/放电过程中，更多阳离子参与插层/脱层。表现出优异的热稳定性和可重复性。 (2) 首次实现了通过非原位尿素和 MEA 辅助的溶剂热方法制备 N 掺杂的 Ti_3C_2 薄膜，界面耦合协同提升离子传输与赝电容贡献，为开发器件满足柔性储能需求的高性能电化学电容器和各种离子电池提供示范作用。	2
李冬梅	制备复合薄膜电极，具有良好的循环稳定性和机械性能。衍生的 MMC/CNF 薄膜电极比电容高达 $211.57\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ ，为制备具有良好电化学性能的 MXene 基柔性纤维薄膜电极提供可行的方法。	3
耿继国	实现 d- Ti_3C_2 对称 SC 薄膜电化学稳定性高达 95.3%，表现出优异的热稳定性和可重复性。实现 N 掺杂的 Ti_3C_2 薄膜最大功率密度为 31112 W L^{-1} ，为开发高性能电容器提供示范作用。	4

刘雪磊	通过官能团调节机制获得 MXene 体积电容为 2186 F cm^{-3} ，能量密度高达 250 W kg^{-1} 。10000 次充放电循环后电容保持率为 83.46%，为制备高性能薄膜电极提供高效和廉价的有效途径。	5
-----	--	---

四、主要完成单位

泰山学院（第 1 位）、西安交通大学（第 2 位）、杭州众能光电科技有限公司（第 3 位）

五、主要知识产权目录（限 10 件）

序号	知识产权名称	知识产权类别	发明人（作者）	知识产权人	知识产权号	取得日期	国（区）别（刊名）	发明专利有效状态
1	氧原子原位掺杂 MAX 相和原位掺杂 MXene 柔性膜电极材料及其制备方法和应用	发明专利	阙文修、田亚朋	西安交通大学	CN202110570057.5	2023.08.01	中国	有效
2	一种碱诱导三维多孔 MXene-细菌纤维素柔性膜电极的制备方法	发明专利	阙文修、罗艺佳	西安交通大学	CN202211644214.3	2025.06.03	中国	有效
3	一种还原氧化石墨烯/MXene 多孔柔性膜电极及其制备方法和应用	发明专利	阙文修、罗艺佳	西安交通大学	CN202110953262.X	2022.08.09	中国	有效

六、代表性论文、论著目录（限 10 件）

序号	论文（论著）名称	发表刊物（出版社）	发表（出版）时间	作者（按刊物发表顺序）
----	----------	-----------	----------	-------------

1	Regulating Functional Groups Enhances the Performance of Flexible Microporous MXene/Bacterial Cellulose Electrodes in Supercapacitors	ACS nano	2024-04-23	罗艺佳, 阙文修*, 尹行天, 高博文
2	Flexible MXene-Based Composite Films: Synthesis, Modification, and Applications as Electrodes of Supercapacitors	Small	2022-05-18	罗艺佳, 阙文修, 高博文* (*为通讯作者)
3	Photocatalytic Membranes Toward Practical Environmental Remediation: Fundamental, Fabrication, and Application	Adv. Sustainable Syst.	2023-03-20	吴涛, 高博文* (*为通讯作者), 阙文修
4	MnOx/Ti3C2Tx MXene/Carbon Nanofibers composite fiber film electrode with good flexibility derived by combining electrospinning technique with carbonization treatment	Materials Letters	2024-02-17	Bingshan Konga, 高博文, 阙文修*
5	Green synthesis of fluorine-free MXene via hydrothermal process: A sustainable approach for proton supercapacitor electrodes	Electrochimica Acta	2023-12-07	Ubaid Khana, 高博文, 阙文修*
6	Rational design of flower-like MnO2/Ti3C2Tx composite electrode for high performance supercapacitors	Nanotechnology	2023-04-11	夏晨继, 高博文, 阙文修*
7	Achieving of Flexible, Free-Standing, Ultracompact Delaminated Titanium Carbide Films for High Volumetric Performance and Heat-Resistant Symmetric Supercapacitors	Advanced Functional Materials	2018-01-17	杨晨辉, 尹行天, 阙文修*
8	Flexible Nitrogen-Doped 2D Titanium Carbides (MXene) Films Constructed by an Ex Situ Solvothermal Method with Extraordinary Volumetric Capacitance	Advanced Energy Materials	2018-08-19	杨晨辉, 尹行天, 阙文修*

七、主要经济与社会效益

近 3 年来, 本项目合作单位杭州众能光电科技有限公司实施“基于二维碳化钛 Ti3C2Tx MXene 超级电容器的开发与应用”项目, 面向国家对高性能储能器件的迫切需求, 成功攻克二维 MXene 材料宏量制备与高性能超级电容器设计的核心技术, 实现关键技术的重大突破与小规模化应用。该项目通过持续的科技创新与技术迭代, 实现显著的经济效益, 累计已实现营收总额高达 22100 万元。具体指标如下: 1、降低长期维护成本: Ti3C2Tx MXene 超级电容器超长的循环

寿命，从而降低整个生命周期的维护成本。2、提升产品价值与市场竞争力：能获得更快的充电速度、更久的续航能力和更高的可靠性，从而提升产品附加值和市场竞争力。3、催生新产业与就业机会：MXene 技术将带动新材料制造、高端储能系统开发等相关产业链的发展。4、创造就业岗位与推动清洁能源使用：更高效地存储风能、太阳能等间歇性可再生能源，帮助平滑电网波动，促进可再生能源的并网与普及。5、促进电子设备革新：此类电容器可集成到可穿戴设备、智能衣物及微型传感器中，推动电子产品向更便携、智能的方向发展，并适应复杂的弯曲形态。6、助力环保与可持续发展：通过回收氧化废弃的 MXene 材料或与可持续材料复合，减少资源消耗，体现低碳环保理念。