

# 四式融合、三维协同化学实践育人体系的构建与实践

郭玉鹏<sup>1,2,3</sup>, 李雅洁<sup>1,3</sup>, 张大伟<sup>1,2,3</sup>, 朱万春<sup>1,3</sup>,  
魏士刚<sup>1,3</sup>, 张雷<sup>1,3</sup>, 许海<sup>1,3</sup>

(1. 吉林大学化学学院, 长春 130012;  
2. 国家教材建设重点研究基地(高等学校理学教材研究), 长春 130012;  
3. 吉林大学化学国家级实验教学示范中心, 长春 130012)

**摘要** 针对化学实验教学在服务多学科、大规模、差异化人才培养中出现的目标模糊、路径断裂与协同缺失等结构性难题, 吉林大学化学学院系统构建并实践“四式融合-三维协同”一体化育人新体系. 以“执行力、发展力、应变力、创新力”为导向, 重塑育人目标; 通过“延伸式、贯通式、递进式、嵌入式”四式融合, 实现理论与实践动态互哺、科教与产教双向赋能、课内课外无缝衔接、育才育人同频共振; 同时创设“管理-师资-学生”三维协同机制, 全面激活化学基础学科对多学科发展的辐射助能作用. 多年实践表明, 学生的综合实践能力与创新能力得到了显著提升, 毕业生被深造单位和用人单位评价为“基础扎实、视野开阔、创新突出”. 该模式已在10余所高校复制推广, 为基础实验教学服务多学科人才培养提供了成熟、可操作的“吉大方案”.

**关键词** 四式融合; 三维协同; 化学; 实践育人

中图分类号 O6; G64 文献标志码 A doi: 10.7503/ejcu20260076

## Construction and Practice of a "Four-Mode Integration, Three-Dimensional Collaboration" Chemistry Practical Talent Cultivation System

GUO Yupeng<sup>1,2,3\*</sup>, LI Yajie<sup>1,3</sup>, ZHANG Dawei<sup>1,2,3</sup>, ZHU Wanchun<sup>1,3</sup>,  
WEI Shigang<sup>1,3</sup>, ZHANG Lei<sup>1,3</sup>, XU Hai<sup>1,3</sup>

(1. College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130012, China;  
2. National Research Center for Educational Material,  
(Higher Education Natural Sciences Teaching Materials Research), Changchun 130012, China;  
3. National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education,  
Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract** In response to the structural challenges of vague objectives, fragmented pathways, and lack of collaboration in chemical experiment teaching when serving multidisciplinary, differentiated, and large-scale talent cultivation, the College of Chemistry at Jilin University has systematically constructed and implemented a new integrated education system termed "Four-Mode Integration and Three-Dimensional Collaboration." Guided by the principles of "execution capability, development capability, adaptability, and innovation capability," the

收稿日期: 2026-02-08. 网络首发日期: 2026-02-28.

联系人简介: 郭玉鹏, 男, 博士, 教授, 主要从事化学实验教学组织管理、高等教育教学、教材方面的研究.

E-mail: guoyupeng@jlu.edu.cn

基金项目: 国家教材基地重大项目(批准号: 2025GH-ZDA-GJ-Y-032)资助.

Supported by the Major Project of the National Research Center for Educational Materials, China(No.2025GH-ZDA-GJ-Y-032).

educational objectives have been reshaped. Through the integration of four modes—"extended, interconnected, progressive, and embedded"—dynamic mutual reinforcement between theory and practice, bidirectional empowerment of scientific education and industry-education collaboration, seamless connection between in-class and extracurricular activities, and synchronized resonance between talent cultivation and holistic education have been achieved. Additionally, a three-dimensional collaborative mechanism involving "management, faculty, and students" has been established to fully activate the radiating and driving effect of chemistry as a fundamental discipline on multidisciplinary development. Years of practice have shown a significant improvement in students' comprehensive practical and innovative abilities. Graduates are consistently evaluated by further education institutions and employers as having "a solid foundation, broad perspectives, and outstanding innovation." This model has been replicated and promoted in more than 10 universities, providing a mature and operable "Jilin University Solution" for basic experimental teaching to serve multidisciplinary talent cultivation.

**Keywords** Four-mode integration; Three-dimensional collaboration; Chemistry; Practical education

党的二十大报告明确提出要“加快建设高质量教育体系”，教育部等部委相继出台《新时代高等教育人才培养质量提升行动计划》、《关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》等政策文件，强调要面向国家重大战略需求，推动高等教育从“以知识传授为中心”向“以能力培养为核心”转变，强化基础学科支撑作用，深化产教融合、科教融汇，构建以学生发展为中心、以创新能力为导向的实践育人新体系<sup>[1-3]</sup>。在这一政策导向下，高校作为人才培养的主阵地，必须主动回应新时代对高层次创新型人才的迫切需求，推动教育教学体系系统性重构，实现从“知识验证”向“能力生成”、从“学科分治”向“交叉融合”的范式跃迁。然而，面对理工农医等多学科交叉融合的发展趋势<sup>[4]</sup>，传统实践教学体系日益暴露出课程同质化、碎片化、科教脱节、创新能力支撑不足、跨学科协同机制缺失等共性问题<sup>[5,6]</sup>。尤其在综合性大学中，学生生源背景多元、知识结构差异显著、人才培养目标多样，如何在统一育人理念下推动教学体系重构、教学资源整合与保障机制创新，成为当前高校教育教学综合改革亟需破解的关键难题。

吉林大学作为国家“双一流”建设高校，始终坚持以服务国家战略需求为导向，化学学科依托七十余载的深厚育人积淀，其人才培养范式广受好评并获得2023年国家级教学成果奖一等奖<sup>[7]</sup>。为继续发挥化学在生命、医药、电子、能源、材料及农学等多学科领域的基础性、支撑性作用，积极探索面向多学科、多专业、大规模学生群体的实践育人新路径<sup>[8]</sup>。为此，吉林大学化学学院立足“化学+”学科交叉优势，梳理各学科人才培养能力要求，凝练总结将“执行力、发展力、应变力、创新力”作为化学实践育人体系核心能力目标，系统构建“四式融合”育人路径，即理论与实践“延伸式”融合、教学与科研“贯通式”融合、课内与课外“递进式”融合、育才与育人“嵌入式”融合，推动实践教学从“课程导向”向“能力导向”转型。同时，以“管理协同、师资协同、学生协同”三维协同为保障，打破学院、学科、专业壁垒，整合理学、工学、农学、医学等实践平台资源，构建多层次、共享型实践教学体系，逐步形成“实验课程统筹规划、教学资源共建共享、师生互动协同育人”的新格局。

## 1 当下化学实践教学的核心困境

面对新工科、新医科、新农科交叉融合趋势，化学实验教学在做好本学院教学工作的同时需服务各学院生源背景迥异的学生。然而，统一大纲与多元需求错位，加剧了化学实践教学的复杂性——既需兼顾不同分数段学生的能力起点，又要匹配多学科各专业的育人目标，使得原本已存在的教学问题更显突出。目前，化学实践教学的核心困境在以下三方面：

(1) 多学科化学实践育人目标模糊，核心能力培养体系缺失的问题。传统化学实践教学长期仅聚焦本学科人才基础阶段培养，忽视如何支撑“理、工、农、医”等其它学科专业阶段、课内和课外相融合的全方位的育人功能<sup>[9]</sup>。面对新时代对复合型人才“执行力、发展力、应变力、创新力”的综合能力要求，原有实践体系缺乏统一的能力导向框架，难以满足不同学科对学生实践素养的个性化、差异化需

求. 如何构建以核心能力为牵引, 理论素养与实践素养互促, 学科素养、人文素养与数智素养兼融, 面向全校多学科全阶段协同育人的化学实践教学新范式, 成为亟待破解的关键难题.

(2) 实践育人路径割裂断续, 融合机制不健全的问题. 长期以来, 化学实践教学存在“理论与实践脱节、教学与科研壁垒、课内与课外分离、育人与育才割裂”的多重困境. 具体表现为: 科研资源未能有效反哺教学, 创新训练滞后于科技前沿; 课程思政与能力培养“两张皮”, 价值引领嵌入不足<sup>[10,11]</sup>. 学生知识迁移能力弱、综合应用水平低, 难以实现从基础操作到高阶创新创造能力的跃升.

(3) 跨学科协同模式缺失, 管理、师资与学生三维协同联动不足的问题. 化学实践平台虽具备服务多学科的基础条件, 但在实际运行中普遍存在“重建设、轻协同”、“单向输出、双向互动少”的现象. 管理人员缺乏联系、无统筹协调机制, 教师跨学科协同育人指导动力不足, 学生联合参与活动类型少、深度有限, 持续发展乏力. 如何打破院系壁垒, 建立涵盖“管理协同、师资协同、学生协同”的三维联动机制, 形成互助共进的可持续发展格局, 是提升实践育人整体效能的重要挑战.

## 2 四式融合、三维协同: 化学实践教学体系的重构

面对当前目标-路径-保障三重困境交织, 为避免使“差异”演变为“差距”, 亟须以能力模型为牵引、融合机制为纽带、协同治理为保障的系统重构, 破解化学实践教学复杂性难题(图1).

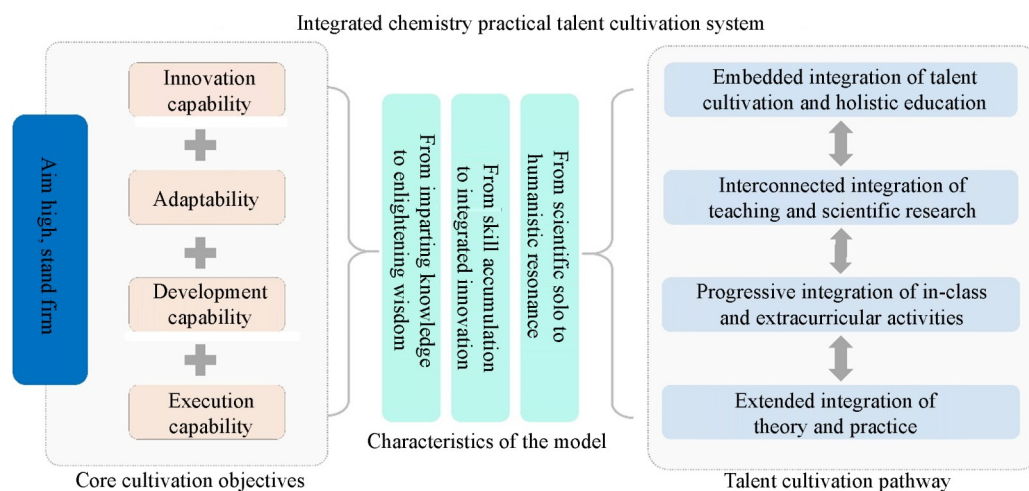


Fig. 1 Construction of the chemistry practical talent cultivation system with "Four-mode integration and three-dimensional collaboration"

### 2.1 基于“四力”能力导向, 明晰目标适配差异需求

针对多学科背景下差异化实践育人目标模糊、核心能力培养指向不明晰, 难以适配新时代复合型人才需求等问题, 我们立足国家战略要求, 率先提出并系统构建了以“执行力、发展力、应变力、创新力”(简称“四力”)为导向的化学实践育人新模式及其核心能力框架(图2). 其中, “执行力”聚焦实验规范、操作技能与安全素养, 旨在夯实学生的基础实践能力<sup>[12]</sup>; “发展力”强调自主学习、知识整合与持续成长潜力; “应变力”体现应对复杂问题的情境适应与综合解决能力; “创新力”则突出原始探索、交叉融合与成果转化能力.

“四力”能力导向的构建, 实现实践育人目标从传统的单一“技能训练”向全面“综合素养塑造”的根本性跃迁. 其核心内涵在于推动教学过程的深刻变革: 在价值导向上, 从“知识传授”走向“智慧启迪”, 强调在实验过程中激发学生的批判性思维与问题意识; 在能力培养上, 从“技能积累”迈向“综合创新”, 注重通过设计综合性、探究性实践项目, 促进学生认知升级与各项能力(特别是发展力、应变力、创新力)的有效转化; 在育人维度上, 从“学科独奏”转向“交叉共鸣”, 将科学家精神、绿色伦理、社会责任等核心价值元素深度融入实践育人全过程, 贯穿于“四力”培养的各环节, 实现科学理性、学科交叉与人文素养的深度融合.

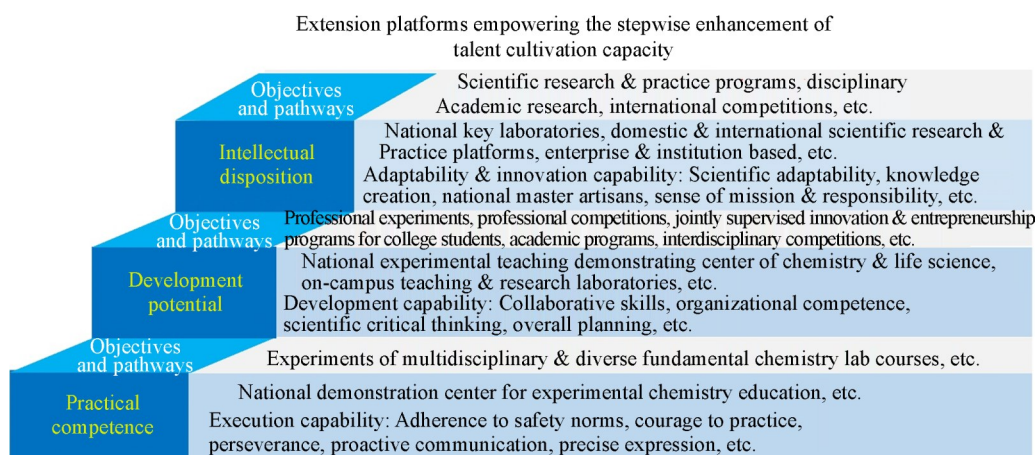


Fig. 2 Extension Platforms Empowering the Stepwise Enhancement of Talent Cultivation Capacity

基于这一能力框架目标,我们重构了面向全校多学科的服务型实践教学体系.其关键在于分类制定契合不同学科专业需求的课内、课外实践内容与细化的能力达成指标,从而成功实现了实践教学资源供给方式从“统一供给”向“分类培养”的战略转型.这一体系重构有效回应了不同专业对学生实践素养的多元诉求,精准破解了长期以来困扰实践育人的目标不清、能力指向模糊的根本性问题.

该模式的实施取得了显著成效.学生创新能力得到实质性提升,实践能力获得广泛认可,在国内顶级学科竞赛和国际竞赛中屡获殊荣;毕业生展现出的综合素质深受深造院校和录用单位的一致好评.这些成果充分验证了“四力”导向实践育人模式在有效解决目标模糊与能力培养不明晰问题、培养满足新时代国家战略需求的复合型人才方面的先进性和有效性.

## 2.2 探索构建四式融合,贯通路程破解断裂难题

面对实践教学环节中普遍存在的路径割裂断续、融合机制不健全等深层次问题,特别是针对理论与实践脱节、教学与科研壁垒、课内与课外分离、育才与育人“两张皮”等结构性矛盾,系统构建了“延伸式、贯通式、递进式、嵌入式”四式融合的实践育人新路径(图3).

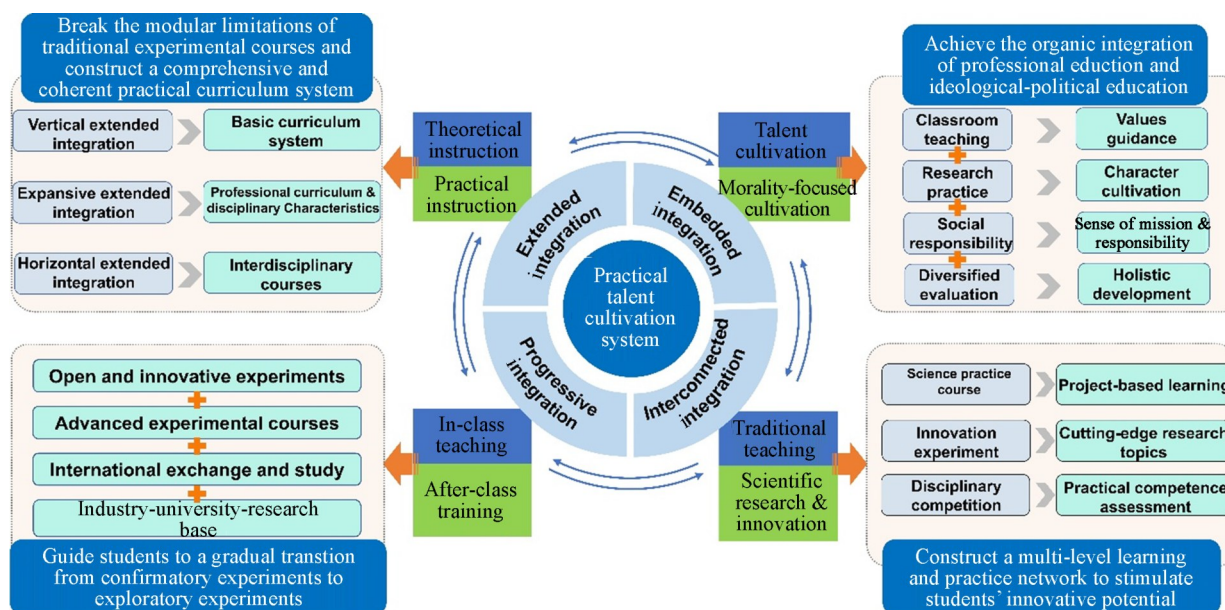


Fig. 3 Construction of the Practical Talent Cultivation Pathway with Four-Mode Integration

该路径通过多维协同机制打通能力培养的关键接续:依托延伸式融合开发虚拟仿真实验平台与开放性实践项目,构建数字化资源网络,打破传统教学的时空壁垒,推动课前预研与课后拓展的深度衔接,实现课内外实践链条的有机延伸;通过贯通式融合实施科研反哺教学计划,将国家重大科研项目

成果和研究探索过程转化为高阶实验教学和思维训练载体,让学生在真实科研情境中践行“做中学、研中创”,破除科教分离的固有屏障;采用递进式融合构建“基础能力训练-专业综合实践-创新项目孵化”的阶梯式成长通道,分阶段设定能力发展目标,形成螺旋上升的实践能力的培养轨迹;推进嵌入式融合将科学伦理、工匠精神与思政元素深度融入实验项目设计,实现价值引领与技能训练的同频共振.这一系统性重构形成了理论与实践动态互哺、科教与产教双向赋能、课内与课外无缝联动、育才与育人协同共生的深度融合教学体系,成功搭建起“知识内化-能力迁移-创新形成”的全链条实践育人生态.

例如,打破“一套实验包打天下”的传统格局,为不同学科量身定制“化学+”融合模块.针对化学专业学生直面学科前沿,在基础课中增设《以四元相图为指导原理的硫酸钾制备》、《光度法测定三价铬配合物的分裂能》等综合性项目,并以《含铬废液的处理》、《过氧化氢在催化氧化反应中的分解反应动力学研究》等创新设计实验锤炼科研思维;非化学类专业学生则走进“场景化”专题——医学方向开设《医用化学基础实验》,环境方向开设《环境污染物的化学监测与修复》专题,农学方向打造《化学与农业》实验专题,所有内容均紧扣本专业核心问题,以化学语言解析学科现象,既传递通用知识,又为后续专业课程预埋接口,实现从“统一验证”到“分类赋能”的精准过渡.同时,我们针对不同学科特征、不同学习阶段匹配相应竞赛,检验其育人成效,例如借助“全国大学生化学实验竞赛”、“全国大学生化学实验创新设计竞赛”、“全国大学生高分子材料实验实践大赛”、“全国大学生化工实验大赛”等学科基础和专业类实验技能赛事,巩固和检验课内教学成果;借助“国际生物分子设计大赛(BIOMOD)”、“国际基因工程机器大赛(iGEM)”、“‘挑战杯’大学生创业计划竞赛”、“全国大学生生命科学创新创业大赛”等国际国内学科交叉产教融合类竞赛,进一步深化学生科研思维,增强跨学科知识应用能力<sup>[13]</sup>.实施成效表明,该路径显著提升了学生的综合实践能力与创新素养,成果应用期间有效支撑了学校51个国家一流专业的建设与人才培养,为破解实践教学同质化困境提供了可推广的范式.

### 2.3 主动搭建三维协同、联动治理破解共建壁垒

为系统性解决跨学科实践育人中存在的资源壁垒与协同梗阻问题,搭建了“管理-师资-学生”三维联动治理机制,全面激活化学基础学科对多学科发展的辐射助能作用(图4).

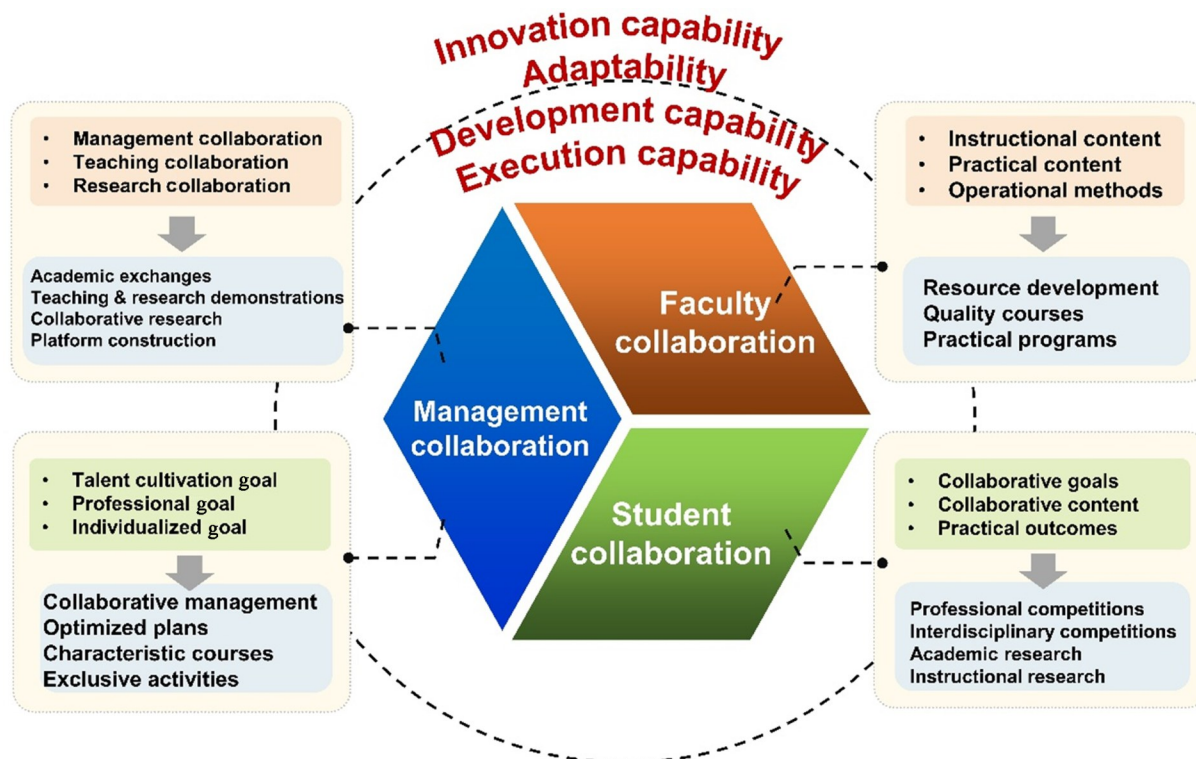


Fig. 4 Construction of the Guarantee Mechanism with Three-Dimensional Collaboration

在管理协同维度,立足化学实践育人平台的主导定位,依托吉林大学工会下属的青年组织如青年教职工工作委员会、青年教师交流协会,吉林大学教师发展中心、教务处(本科生院)等组织机构,开展特色活动,促进化学实践教学管理队伍由“学科零散自建”变为“多学科生态共建”,组建“化学+生命”、“化学+医学”、“化学+电子”、“化学+农学”和“化学+材料”五大跨学科课程管理群,通过AI大数据动态分析各专业差异化实践需求,定制个性化实践方案并持续优化实施路径,实现从“被动服务”向“主动赋能”的转型,同步推动跨学科实践平台共建与课内外活动协同承接<sup>[14-16]</sup>.在师资协同层面,打造“化学教师+专业教师+行业专家”开放式教学团队(图5),邀请相关学科教师深度参与化学实践课程设计,精准锚定化学能力对其他学科核心素养的支撑点,共同指导大创项目、学科竞赛与学术研究,显著强化实践教学的跨学科适配性.在学生协同领域,鼓励多学科学生联合组队,通过组织参加专业类与交叉类国内外高水平竞赛、教学研究及学术课题,充分发挥学生在实验设计、安全管理与技术传承中的主体作用,有效贯通“课堂学习-实践应用-创新产出”的育人培养链条.

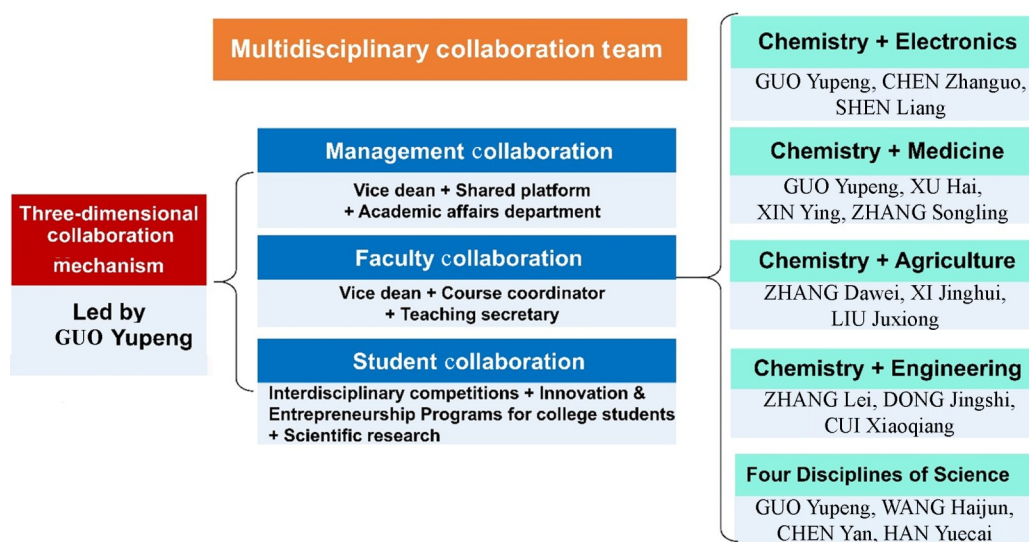


Fig. 5 Formation of the multidisciplinary collaboration team

同时,整合吉林大学化学学院、生命科学学院、基础医学院、动物医学学院及植物科学学院等多学院的专业教学和科研实验室及社会优质教育资源,搭建化学与其它学科交叉的“专业实验、中试实训、实习实践、科研训练和大型仪器训练”融通的实践教学平台.实行集中与分区相结合的管理模式,实现了优质资源共享.通过整合教学与科研实验室资源,建立起互惠互利、资源共享的运行机制.

该三维协同机制依托校级平台已实现多学科生态共建,通过明确管理主体责任、优化师资协作模式、激发学生自主效能,彻底打通学科资源壁垒,形成以化学为枢纽辐射多领域的协同育人新生态,推动化学与其他学院在课程共建、师资共享、学生共育等方面实现常态化协同.实施期间,该机制有效支撑了跨学科大创项目指导、联合学术论文发表及顶级学科竞赛获奖等系列成果,为多学科复合型人才培养提供了坚实的制度保障.

### 3 教学模式的应用及示范推广

学生核心能力显著增强,人才培养质量显著提升.自2013年以来,已在吉林大学包括化学在内的23个学院,80个专业,近8万余名学生中课内实验教学和“化学+”课外实践活动中应用,并取得显著效果.培养学生在全国大学生化学实验邀请赛、全国大学生化学实验创新设计大赛、全国大学生化工实验大赛、全国大学生化工设计竞赛等学科基础类、专业类竞赛获得国家级奖励37项(含特等奖6项、一等奖10项).此外,化学教师累计直接指导非化学类专业学生毕设、大创、竞赛等千余人次;指导学生获得国际生物大分子设计大赛(BIOMOD)金奖4个、银奖2项,国际遗传工程机器大赛(iGEM)金奖7项、银奖4项,国家级竞赛特等奖3项,国家级一等奖等9项,省校级奖200余项;本科生一作在

JACS, Angew. Chem. In. Ed., Nano Letters 发表SCI、EI、中文核心期刊论文50余篇<sup>[17-21]</sup>；获得授权专利10余项。化学+医学团队研发的“可视化荧光传感器快速检测试剂盒”获实用新型专利，检测效率提升70%。毕业生跨学科竞争力突出，如，2018届材料科学与工程学院本科生迟茜文，2021年以第一作者身份在《Nature》发表论文“A highly stable and flexible zeolite electrolyte solid-state Li-air battery”<sup>[22]</sup>；2013届植物科学学院本科生陆正昌保送研究生进入北京大学化学与分子工程学院吴云东院士团队；2015届植物科学学院本科生马正宁保送研究生进入武汉大学药学院；2020届植物科学学院植物保护专业本科生于显茏获全额奖学金留学日本东京大学化学系；2020届药学院本科生范宇涵获全额奖学金留学昆士兰大学化学工程系等高校。中国科学院等科研院所及吉林正大食品、万华化学等企业反馈，毕业生“化学应用能力与专业实践结合紧密”，快速成为技术骨干。

教学团队与资源建设能力提高，成效显著。依托吉林大学青年教职工工作委员会和青年教师交流协会等组织，搭建多学科青年教师交流平台，助力打造5大跨学科实践育人管理团队和“化学教师+专业教师+行业专家”复合型教师团队，含国家级科研领军人才6人、宝钢优秀教师2人，获国家级教学奖励8项、省级教学奖励6项，5人次获校级“课堂教学质量卓越奖”。建设国家级、省级精品课程各3门，省级一流虚拟仿真实验课程1门，出版包括国家十五、十一五、十二五规划教材、覆盖基础实验、专业实验在内的精品教材33本，发行量超过15万册，百余所院校使用。打造AR赋能+AI智助新课堂，助力数智课堂教学开展，并推广至其它院校。依托该模式，团队近10年来承担省级及以上教研项目11项，发表教改论文50余篇，利用教育部大学化学课程教学指导委员会、教育部化学实验教学改革创新研究虚拟教研室等平台开展专题培训90余场，经验被中央电视台、中国教育新闻网等主流媒体报道。

成果在多学科差异化实践育人上普适性强，示范辐射效应广泛深远。成果模式已被上海交通大学、大连理工大学、长春理工大学、沈阳农业大学及吉林农业大学等10余所省内外高校借鉴与应用推广，覆盖化学、材料、医学和农学等多个学科领域。打造化学国家级实验教学示范中心、化学生命科学专业国家级实验教学示范中心、无机合成与制备化学国家重点实验室、集成光电子学国家重点实验室等校内外实践育人平台，承接500余项国家级、省级等大学生创新创业训练计划项目，与英国布里斯托、日本名古屋大学等合作开展暑期海外科研实践项目，为多学科背景下基础课实践育人改革提供了“吉大方案”，示范引领作用获国内外百余所高校师生认可，形成“可复制、可推广”的实践育人范式。

## 4 总结与展望

“四式融合-三维协同”一体化体系以明晰能力目标破解育人方向模糊，以四式融合路径贯通教学断点，以三维协同机制盘活多方资源，十余年实践锻造出可复制、可推广的“吉大方案”，充分彰显了基础学科在大规模、差异化人才培养中的枢纽价值。面向未来，新一轮科技革命和产业变革对高层次复合型创新人才的需求将更为迫切，我们将持续升级“化学+”实践育人体系，拓宽跨学科协同广度与深度，加快数字化、智能化实践平台建设，探索“AI+实验教学”“虚拟仿真实践”等新模式，推动实践教学从资源共享迈向智能共创，为中国特色、世界水平的高等教育贡献可持续发展的“实践育人样板”。

感谢吉林大学电子科学与工程学院陈占国教授、沈亮教授，机械科学与工程学院董景石教授、王聪慧教授，基础医学院辛颖教授，白求恩第一临床医学院张松灵教授，白求恩口腔医学院刘志辉教授，材料科学与工程学院崔小强教授，植物科学学院席景会教授，动物医学学院柳巨雄教授，地球科学学院王旖旎教授，物理学院王海军教授，生命科学学院滕利荣教授、陈妍教授，数学学院韩月才教授对跨学科实践育人体系建设工作的大力支持，外国语言文化学院朱锋颖教授对文稿图形英文表述的精心修改与审校。

## 参 考 文 献

- [1] Ma F., *J. Chin. Soc. Educ.*, 2023, 0(7), 7-13(马飞. 中国教育学刊, 2023, 0(7), 7-13)
- [2] Liu Y. C., Dong J. H., Zhang A. L., *Chin. Univ. Sci. Technol.*, 2024, 433(9), 46-50(刘延畅, 董金慧, 张爱莉, 中国高校科技,

- 2024, 433(9), 46—50)
- [ 3 ] Tian L., Liu N. C., *High. Educ.*, **2025**, 89(1), 167—182
- [ 4 ] Zhang S. Y., Ding Y. Q., Du F. P., Yuan S. L., Guo J. X., Zhu Y. X., Huo J. C., Gong L. Y., Chen C. X., Wang F., Shen S. X., Wang L. X., Zou Y. X., *Univ. Chem.*, **2023**, 38(3), 1—8(张树永, 丁玉强, 杜凤沛, 苑世领, 郭今心, 朱亚先, 霍冀川, 龚良玉, 陈春霞, 王芬, 申树欣, 王立祥, 邹永新. 大学化学, **2023**, 38(3), 1—8)
- [ 5 ] Li Y. J., Guo Y. P., Wei S. G., Yan J., *Chin. J. Chem. Educ.*, **2025**, 46(18), 57—64(李雅洁, 郭玉鹏, 魏士刚, 闫瑾. 化学教育(中英文), **2025**, 46(18), 57—64)
- [ 6 ] Tong C. X., Li Y. J., Yan J., Qu X. J., Wei S. G., Fan Y., Song Z. G., Guo Y. P., *Univ. Chem.*, **2024**, 39(07), 49—55(童程霞, 李雅洁, 闫瑾, 屈学俭, 魏士刚, 范勇, 宋志光, 郭玉鹏, 大学化学, **2024**, 39(07), 49—55)
- [ 7 ] Guo Y. P., Lü Z. Y., Sun J. Q., Xu J. N., Song Z. G., *Chin. J. Chem. Educ.*, **2022**, 43(14), 8—12(郭玉鹏, 吕中元, 孙俊奇, 徐家宁, 宋志光. 化学教育(中英文), **2022**, 43(14), 8—12)
- [ 8 ] An Z. S., Zhang W. K., Sun J. Q., *Macromol. Rapid Commun.*, **2020**, 41(24), 2000630
- [ 9 ] Johnson R., *J. Chem. Educ.*, **2022**, 99(11), 3631—3632
- [ 10 ] Berland L. K., Schwarz C. V., Krist C., Kenyon L., Lo A. S., Reiser B. J., *J. Res. Sci. Teach.*, **2016**, 53(7), 1082—1112
- [ 11 ] Linn M. C., Palmer E., Baranger A., Gerard E., Stone E., *Science*, **2015**, 347(6222), 1261757
- [ 12 ] Zhang J. W., Peng S. Y., Wang P. C., Zhang F. L., Wang Q. L., Dou Z., *ACS Chem. Health Saf.*, **2024**, 31(5), 378—392
- [ 13 ] Schmitt F.-J., Frielingsdorf S., Friedrich T., Budisa N., *ChemBioChem*, **2021**, 22(5), 818—825
- [ 14 ] Chan C. K. Y., *Int. J. Educ. Technol. High. Educ.*, **2023**, 20(1), 38
- [ 15 ] Alzubi A. A. F., Nazim M., Alyami N., *Educ. Inf. Technol.*, **2025**, 30(11), 15147—15184
- [ 16 ] Alasadi E. A., Baiz C. R., *J. Chem. Educ.*, **2023**, 100(8), 2965—2971
- [ 17 ] Jin Z. Y., Jiao D. X., Dong Y. L., Liu L., Fan J. C., Gong M., Ma X. C., Wang Y., Zhang W., Zhang L., Yu Z. G., Voiry D., Zheng W. T., Cui X. Q., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, 63(6), e202318246
- [ 18 ] Li Z., Yang Y. W., *J. Mater. Chem. B*, **2017**, 5(47), 9278—9290
- [ 19 ] Han N., Xie R. H., Wang X. N., Liu S. X., *Chem. J. Chinese Universities*, **2018**, 39(7), 1378—1383(韩宁, 谢瑞红, 王雪娜, 刘木侠. 高等学校化学学报, **2018**, 39(7), 1378—1383)
- [ 20 ] Zou J. Y., Liu Y. P., Chen H., Li G. D., *Chem. J. Chinese Universities*, **2018**, 39(6), 1249—1254(邹佳运, 刘一蒲, 陈辉, 李国栋. 高等学校化学学报, **2018**, 39(6), 1249—1254)
- [ 21 ] Liang Z. H., Liu Y., Zhang Q., Guo Y. P., Ma Q., *Chem. Eng. J.*, **2020**, 385, 123825
- [ 22 ] Chi X. W., Li M. L., Di J. C., Bai P., Song L. N., Wang X. X., Li F., Liang S., Xu J. J., Yu J. H., *Nature*, **2021**, 592(7855), 5

(Ed.: V, K)