储能学科建设

CCUS全链条导向下碳储专业学科交叉与数智赋能的育人实践

张凤远[1,3,6]，李世远[2,3*]，芮振华[3,4**]，徐春明[5]，蓝兴英[5]，曹文兴[3]
（[1]中国石油大学（北京）海南研究院，海南 三亚 572024；[2]中国石油大学（北京）研究生院，[3]中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室，[4]中国石油大学（北京）地球物理学院，[5]中国石油大学（北京）中国石油大学（北京）重质油全国重点实验室；[6]中国石油大学（北京）石油工程学院，北京 102249）

摘 要：在“双碳”战略深入推进与CCUS技术快速发展的背景下，碳储科学与工程领域对具备工程实践能力与多学科融合素养的复合型人才需求日益迫切，但现有培养体系在产教协同深度、学科交叉融合及实践能力支撑等方面仍存在不足。在实施过程中，通过课程体系重构与校企协同育人优化，更新6门核心课程，建设19个教学视频、13类拓展资源及29项课程资料；学生人均产业实践200小时，参与95项跨学科竞赛并获得国家级奖项15项；课程考核结果保持稳定，成绩分布更趋集中，学习过程参与度达99%以上。围绕全产业链人才培养需求，构建“双导师”校企协同指导机制、“三机制”动态知识体系、“双体系”交叉培养路径及数智化教学资源平台，推动理论教学、工程实践与创新能力协同提升。实践结果表明，该培养模式有助于提升学生解决复杂工程问题的能力与人才培养质量，促进人才培养与产业需求的匹配。以产教深度融合为基础、学科交叉为支撑、数智技术赋能为特征的培养路径，对提升新兴工科人才培养质量具有良好适用性与推广价值，可为碳储领域高质量发展提供持续人才支撑。

关键词：CCUS全链条；碳储科学与工程专业；学科交叉；双导师制；数智化教学
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0496
中图分类号：TK 02；G 642 **文献标志码：**A **文章编号：**2095-4239（2026）09-3839-12

Talent cultivation practice of interdisciplinarity and digital-intelligent empowerment for carbon storage specialty under the guidance of CCUS whole chain

ZHANG Fengyuan[1,3,6], LI Shiyuan[2,3*], RUI Zhenhua[3,4**], XU Chunming[5], LAN Xingying[5], CAO Wenxing[3]
([1]Hainan Research Institute, China University of Petroleum (Beijing), Sanya 572024, Hainan, China; [2]Graduate School, China University of Petroleum (Beijing), [3]State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), [4]College of Geophysics, China University of Petroleum (Beijing), [5]State Key Laboratory of Heavy Oil, China University of Petroleum (Beijing), [6]College of

收稿日期：2026-06-08；**修改稿日期：**2026-07-12。
基金项目：海南省高等学校教育教学改革重点项目“产教融合视域下交叉学科研究生培养模式研究——以碳储科学与工程专业为例”（Hnjg2025ZD-99）；北京市高等教育学会面上课题“产教-科教双融合视域下高校碳储专业人才培养模式研究与实践”（MS2025213）；北京市高等教育学会面上课题“碳储科学与工程多学科交叉新兴专业建设及创新人才培养”（MS2024072）；2024年中国石油大学（北京）本科教育教学改革立项项目（重大）“绿色化、智能化和国际化驱动下的石油工程专业拔尖创新人才培养模式改革与实践”（XM1072024001）；2025年北京高等教育本科教学改革创新项目"转型升级、产教融合、拔尖培优—石油工程专业建设综合改革创新与实践”（编号：2025-137）。
第一作者：张凤远（1993—），男，博士，副教授，从事油气渗流理论、CO_2提高采收率与封存等方面研究，E-mail：fengyuan@cup.edu.cn；**通信作者：**李世远，教授，E-mail：lishiyuan1983@cup.edu.cn；芮振华，教授，从事CO_2捕集、提高采收率与封存等方面研究，E-mail：ruizh@cup.edu.cn。
引用本文：张凤远, 李世远, 芮振华, 等. CCUS全链条导向下碳储专业学科交叉与数智赋能的育人实践[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3839-3850.
Citation：ZHANG Fengyuan, LI Shiyuan, RUI Zhenhua, et al. Talent cultivation practice of interdisciplinarity and digital-intelligent empowerment for carbon storage specialty under the guidance of CCUS whole chain[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3839-3850.

Petroleum Engineering, China University ofPetroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Against the backdrop of the deepening "dual carbon" strategy and the rapid advancement of carbon capture, utilization and storage (CCUS) technologies, the field of carbon storage science and engineeringurgently requires interdisciplinary talents with solid engineering practice capabilities and comprehensive multidisciplinary competence. Nevertheless, the existing talent cultivation system still faces major limitations inindustry-education collaboration, interdisciplinary integration, and practical training support, making it difficult to satisfy the evolving demands of the CCUS industrial chain. To address the talent demand across the entire CCUS industrial chain, this study constructs a university-enterprise dual-mentor guidance mechanism, a three-mechanism dynamic knowledge system, a dual-system interdisciplinary cultivation pathway, and a digital-intelligent teaching resource platform. The proposed framework aims to facilitate the coordinated advancement of theoretical learning, engineering practice, and innovation competence. During implementation, six core courses were updated through curriculum restructuring and university-enterprise collaborative education. Meanwhile, 19 teaching videos, 13 categories of supplementary resources, and 29 targeted course materials were developed, forming a structured digital-intelligent resource repository. In terms of practical outcomes, students completed an average of 200 hours of industrial practice, participated in 95 interdisciplinary competition projects, and won 15 national-level awards. Course assessment results remained stable, with more concentrated grade distributions. The participation rate in process-based learning exceeded 99%. The results demonstrate that the proposed cultivation model effectively strengthens students' ability to solve complex engineering problems, improves the overall quality of talent training, and enhances the alignment between talent cultivation and industrial requirements. Characterized by deep industry-education integration, interdisciplinary collaboration, and digital-intelligent empowerment, this cultivation pathway shows strong applicability and scalability for talent training in emerging engineering disciplines. It can also provide sustained talent support for the high-quality development of the carbon storage industry.

Keywords: CCUS full chain; carbon storage specialty; interdisciplinary integration; dual-mentor system; digital and intelligent teaching

在全球气候变化加剧和能源结构转型的背景下，我国提出了“2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的战略目标。碳封存（Carbon Storage，以下简称“碳储”）是实现“双碳”目标的关键技术路径之一。然而，我国碳储领域兼具深厚理论基础与实践能力的复合型人才供给严重不足，加快构建碳储专业人才培养体系已成为支撑“双碳”战略落地实施的迫切需求[1-2]。

《绿色双碳人才需求与发展报告（2024年）》数据显示，预计未来10年我国对“双碳”人才的需求将超过150万[3]。国际能源署也指出，全球碳储技术的发展将产生数十万个岗位，尤其是在储层评估、CO_2捕集与注入、安全监测等核心领域，这些岗位需要具备跨学科知识的高技能人才[4]。

然而，当前我国的碳储相关学科尚处于起步阶段，碳储专业人才的培养模式未能有效满足行业复合型人才的需求。一方面，产教融合不够紧密，使得学生在学习过程中缺乏真实的工作场景和技术需求的体验。另一方面，学科交叉的深度不足，传统的单一学科培养模式难以满足快速发展的行业需求[5-6]。

在此背景下，文章提出“产教融合”与“学科交叉”相结合的碳储专业人才培养模式。能够紧密对接碳储行业需求，推动学科之间的深度融合，提

升实践能力，积极响应《中国教育现代化 2035》关于“深化产教融合”及《碳达峰碳中和行动方案（2021—2030 年）》关于“推动技术创新与人才培养”的战略目标，为破解碳储专业人才培养供给侧结构性改革提供新模式。

1　碳储专业人才培养现状与问题

1.1　人才培养现状

根据教育部高教司专业设置结果数据库，截至 2025 年全国已有 13 所高校正式获批设置“碳储科学与工程”本科专业，其中 9 所为“世界一流学科建设高校”。基于当前高校在培养体系构建方面的实践，各高校正着力推进碳储专业人才培养体系构建与发展[7-9]。在教学改革方面，以 2023 年北京市教学改革创新项目立项情况为例，其中 3 所高校的碳储相关项目占本校立项总数的 20% 以上，相关教学改革持续深化；在交流研讨方面，重庆大学等 4 所高校已连续 4 年组织开展碳储专业人才培养专题研讨活动；在教材建设方面，中国矿业大学（北京）牵头编写并出版国内首套碳储专业系列教材，为专业教学提供了基础支撑；在实践教学基地建设方面，6 所高校联合 10 余家行业单位共建实践育人基地，为提升学生实践能力提供了平台保障。总体而言，当前碳储专业培养体系已初具规模，培养方案、教材建设和实践平台逐步完善。进一步梳理培养方案和课程设置发现，以“二氧化碳提高采收率原理”“碳储安全与监测”等核心课程为代表，现有课程内容已涉及碳捕集、封存、利用、监测等主要技术环节，但课程之间仍以传统优势学科延伸和知识模块组合为主，围绕 CCUS 全链条复杂工程问题的系统整合、校企共同设计和实践项目嵌入仍显不足。因此，当前碳储专业人才培养虽已具备良好基础，但在产教协同、学科交叉和工程能力贯通培养方面仍需进一步优化。

根据行业需求与人才供给的调研数据，《2024 年气候变化绿皮书》显示我国碳中和相关职位数量同比增长 52%，企业招聘薪酬水平也呈上升趋势，但企业在实际招聘中仍面临复合型“双碳”人才供给不足、匹配度不高的困境[11]。根据《中国碳捕集利用与封存年度报告（2023）》，当前我国规划和运行的 CCUS 示范项目接近百个[12-13]，迅速扩张的市场对碳储人才产生大量需求。然而，根据中国石油天然气集团有限公司、中国石油化工集团有限公司和中国海洋石油集团有限公司 2025 年度校园招聘岗位信息统计，仅有 14 个岗位的专业要求将“碳储科学与工程”列入其中，占比不足 0.4%，显示出高校碳储人才培养与企业岗位需求之间存在供需衔接不充分的问题，人才培养规模、能力结构与产业岗位释放之间仍需进一步协调。

以毕业生发展路径为切入点进行分析，目前已掌握的相关数据表明，首届碳储科学与工程专业毕业生整体呈现出继续深造比例较高的特征，升学人数普遍多于就业人数（图 1）。较高的深造比例反映出学生对继续提升专业能力和科研能力的现实需求，也说明碳储科学与工程作为新兴交叉专业，其本科毕业生直接进入产业核心岗位的通道仍处于培育阶段。结合当前能源企业碳储相关岗位设置数量较少的现状可以看出，高校碳储人才培养与新兴“双碳”岗位需求之间仍存在一定程度的衔接不足，毕业生进入 CCUS 全链条核心岗位的渠道仍需进一步拓展。上述现象反映出当前碳储专业人才培养仍需在培养目标、课程体系与实践路径等方面进一步加强与行业岗位需求的对接[14]。

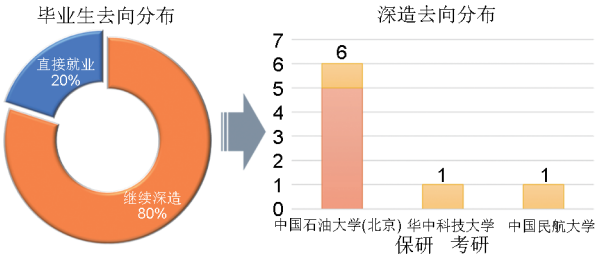


图 1　中国石油大学(北京)首届碳储科学与工程专业毕业生去向分布

Fig. 1 Distribution of graduates' career destinations of China University of Petroleum (Beijing)

1.2　碳储专业人才培养面临的主要问题

1.2.1　产教融合与全产业链需求相脱节

当前，高校与行业企业虽已建立初步合作关系，但企业参与仍多停留在浅层次协同阶段，尚未实质性融入核心课程体系与实践教学环节[15]，这一问题在导师协同机制方面表现尤为突出。在现有培养过程中，高校导师与企业导师之间尚未形成稳定的“双导师”协同指导体系。企业导师多以开展讲座、案例点评或短期实践指导等方式参与培养，尚未深入介入培养目标制定、课程内容更新、实践项

目设计和毕业论文指导等关键环节，导致产业实际需求难以及时转化为教学内容和能力培养标准。这种弱耦合的合作模式导致学生在学习过程中难以准确把握行业前沿需求与核心能力要求，毕业生普遍反映所学专业知识与实际岗位之间存在明显脱节。此外，实践教学在时序安排上也存在结构性矛盾：专业课程多集中于大二学年，而实践环节则安排在大三学年末，课程教学与实践环节之间缺乏有效衔接，进一步削弱了知识向能力转化的实效性。从国外工程教育产教融合研究看，Shah 和 Gillen 的研究表明大学—产业合作有助于将产业中的实际问题转化为教学任务，提升学生对岗位需求和工程实践的理解。在碳储人才培养方面，美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Olson 等围绕 CO_2 地质封存过程设计了系列教学活动，并将 CO_2 注入、地质封存和风险认知等内容融入本科生和研究生课程教学[16-17]，有助于将专业理论与工程实际相结合，增强课程教学的实践导向性，提升学生对碳储工程问题的综合分析和解决能力。相比之下，当前我国碳储专业在企业深度参与课程共建、真实工程项目嵌入和校企联合指导等方面仍有较大提升空间。

1.2.2 学科融合深度与国际视野不足

多学科知识的深度融合是解决复杂碳封存问题的关键[18]。当前碳储专业的课程体系虽已体现出一定的交叉导向，但在内容组织上仍呈现“横向拼接有余、纵向递进不足”的特征。以地质学与石油工程为例，其交叉多仍停留于基础课程层面的知识叠加，而在涉及复杂储层表征、CO_2 注入过程模拟等核心技术领域时，学科间的深度融合仍显不足。从培养模式看，学科融合不足并不只是课程数量或课程内容的问题，更反映出跨学科协同培养机制尚不健全。现有课程多依托原有学科体系分别设置，石油工程、地质资源与化学工程、环境工程、信息技术等知识模块之间缺乏围绕 CCUS 全链条复杂工程问题的系统整合，尚未形成以项目任务为牵引、以能力达成为导向的跨学科培养路径。同时，课程内容与国际前沿衔接不足，学生普遍缺乏对国际 CCUS 技术发展动态、先进标准规范及跨学科前沿知识的系统了解，难以对标国际一流水平构建知识体系。

1.2.3 课程资源数智化建设滞后

在教育数字化转型的宏观背景下，数智化课程资源本应为碳储专业教学模式创新提供有力支撑。然而，当前该碳储专业的数智化建设整体滞后，尚未形成支撑资源供给、交互学习与过程评价协同推进的数智化教学体系，呈现“资源存量不足、交互体验薄弱、评价方式单一”的阶段性特征。具体表现为：面向碳储专业的在线学习平台尚未形成系统化的资源供给体系，教学内容仍以传统教材与讲座为主，缺乏基于虚拟仿真、场景模拟等技术的沉浸式学习资源[19]。现有资源的质量不高与静态化，限制了学生主动建构知识、开展探究式学习的空间，也制约了教学过程向个性化、智能化方向演进的步伐[20]。

综上所述，当前碳储专业的人才培养模式已难以有效满足行业对复合型高层次人才的迫切需求。亟须以产教融合与学科交叉为双重驱动，围绕课程体系重构、校企协同机制创新、数智化教学资源开发等关键环节开展系统研究，切实提升人才培养的适应性与前瞻性，为碳储行业高质量发展提供坚实的人才支撑。

2 碳储专业人才培养模式创新实践

本文采用单一案例分析的行动研究方法，围绕中国石油大学（北京）碳储科学与工程专业建设实践展开研究。该校较早开展碳储专业人才培养探索，已在培养方案制定、课程体系建设和校企协同育人等方面形成较完整的实践基础，因此可为分析新兴交叉工科专业培养模式改革提供典型案例。研究过程中，结合专业培养方案、课程大纲、教学资源建设记录、校企实践教学资料等，以及学生实践时长、课程成绩、竞赛获奖和国际交流参与情况等过程性数据，采用文本分析、案例分析和描述性统计相结合的方法，对培养模式构建过程及实施成效进行分类整理与相互印证。

在上述研究设计基础上，为满足碳储产业对复合型人才的迫切需求，基于产教融合与学科交叉理念，构建适配产业的培养模式。以产业技术发展趋势为导向，通过组建校企联合导师团队、构建产教融合知识体系、实施多学科交叉培养方案、建设数智化教学资源，形成“理论奠基—实践赋能—创新驱动”的协同育人链条。

2.1 “双导师”校企联合协同指导

碳储专业校企联合导师团队是实现产教融合人

才培养的核心载体[21-22]，通过高校与企业导师的优势互补，建立双导师协同育人机制。

校企联合导师团队组建遵循“双向选择、优势互补、动态调整”原则：高校结合专业多学科交叉特性，遴选学术骨干担任学术导师，覆盖碳捕集、封存、利用等全产业链理论研究；企业依托碳储项目实践资源，推荐具备全流程经验的技术骨干担任企业导师，实行“双导师制”职责分工（图2）：高校导师依托多学科交叉基础，负责课程体系建设、科研训练和理论指导；企业导师依托工程项目经验，负责工程案例引入、现场实践指导和岗位能力要求转化。

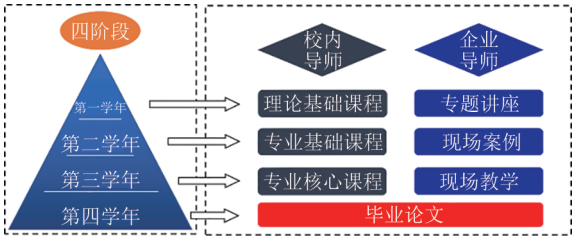


图2　“双导师制”职责分工体系

Fig. 2　Responsibility division system of the "dual supervisor system"

此外，在课程建设和毕业论文环节，企业导师参与教学重点调整、工程案例引入和选题应用价值把关，高校导师负责理论创新性与科学性指导，形成学术性与实践性协同的培养机制。

2.2　“三机制”动态构建碳储专业知识体系

面向碳储产业技术复杂性和知识动态更新需求，构建“产业导向、专家导学、动态更新”的学科知识体系，推动课程内容与CCUS全链条技术要点和产业前沿对接（图3）。

2.2.1　产业导向重构知识交叉架构

以产业需求为逻辑起点，重新构建课程体系，通过打破传统学科边界，依据碳捕集、运输、封存、监测与利用等全产业链的技术逻辑，将课程重构为若干核心知识模块。由高校导师与企业技术专家组成课程建设委员会，共同制定课程大纲，确保每一个知识点都能精准对接产业链的实际需求。

实践教学环节依托企业真实项目，将碳储全流程拆解为多学科交叉任务模块，模拟企业协作模式，引导学生在工程情境中整合地质、渗流、监测和安全评价等知识，学校定期邀请企业专家开展专题讲座，解决工程系统问题，强化相关跨学科知识的深度融合。毕业论文环节建立校企联合选题机制，通过“双导师+项目实践”提升选题的工程应用价值和研究前瞻性。



图3　产教融合视域下知识体系构建方案

Fig. 3　Schematic diagram of the construction plan for the disciplinary knowledge system of carbon storage specialty from the perspective of industry-education integration

2.2.2　专家导学强化实践育人效能

实施“专家导学”策略可深度整合行业专家资源，实现产业现场隐性知识向课堂教学的有效转化。通过建立常态化行业专家进校授课机制，将碳捕集、封存与监测等关键环节的工程案例、技术难题和行业规范引入课堂。同时，企业专家以第二导师身份参与学生培养过程，直接指导课程设计、实习实训及毕业设计等实践教学环节。学校定期邀请企业专家开展专题讲座，系统分享CCUS技术的最新进展、行业发展趋势及工程领域对职业素养的具体要求，这一机制可推动产业现场经验向教学内容转化。

2.2.3　动态反馈保障体系持续迭代

为深化产教融合、提升专业建设质量，精准对接产业发展需求，保障专业知识体系的先进性与产业适配性，结合专业建设实际，建立常态化产教反馈与知识体系动态更新机制。

依托产业咨询委员会，吸纳行业企业技术专家、高校骨干教师等多方力量，通过年度研讨、季度交流、专项调研等常态化形式，精准收集产业技术升级、岗位能力变化等新需求，建立产业需求动态数据库，形成可落地的需求转化清单，并根据反馈结果，及时删减陈旧知识点，补充前沿技术和真

实案例，提升课程体系与产业发展的适配性。

2.3 “双体系”构建交叉培养模式

多学科交叉是碳储科学与工程专业的核心特征，“双体系”协同构建多学科交叉培养模式，以“学科交叉、场景驱动、能力协同”为原则，通过课程体系重构、实践平台共建、科研项目联动等路径，打破石油工程、地质资源、化学工程等学科的壁垒，培养学生解决跨领域复杂工程问题的综合能力（图4）。

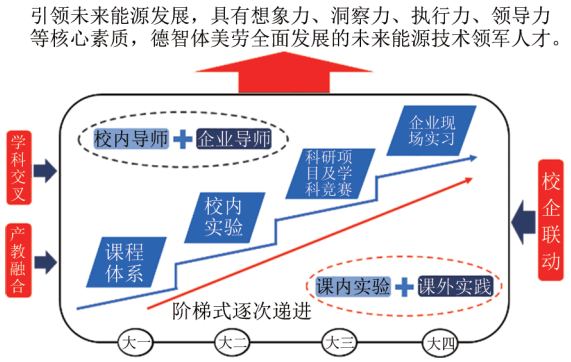


图4 碳储专业课程体系构建方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of construction plan for multidisciplinary interdisciplinary curriculum system of carbon storage specialty

2.3.1 学科交叉课程体系搭建

针对碳储专业多学科深度融合的需求，设计了“基础奠基-专业耦合-前沿贯通”三阶递进的课程体系，其内在的多学科交叉关系如图5所示。基础课程聚焦多学科理论基底的系统性夯实，通过构建“碳储科学基础矩阵”通识课程群，深度融合地质学、渗流物理、热工学等学科内核。

在专业核心课程层面，课程体系以“技术链”贯通“学科链”为基本逻辑，围绕“捕集—输送—封存—监测—利用”的CCUS全流程技术体系，设置《碳捕集原理与技术》《碳储安全与监测》《碳转化与资源化利用》等核心课程，强化多学科知识的系统融合。课程以工程问题为导向，整合多个学科的关键知识模块。在专业选修课程层面，课程设计以典型产业应用场景为牵引，推动学生实现由“知识学习”向“知识应用”的转变。以火电、钢铁、油气等重点排放行业为依托，构建场景化选修课程群与专题模块。以《碳储安全与监测》为例，课程围绕“如何确保CO_2在地质体中的长期安全封存”这一核心问题，从地质学与地球物理学、流体力学与渗流力学、地球化学、测井与传感技术以及安全工程与风险管理等学科中提炼相关理论与方法，并以CO_2封存项目全生命周期为主线，将知识体系贯穿于选址、注入、运行与封存关闭等关键环节，帮助学生在完整工程情境中综合运用跨学科知识。

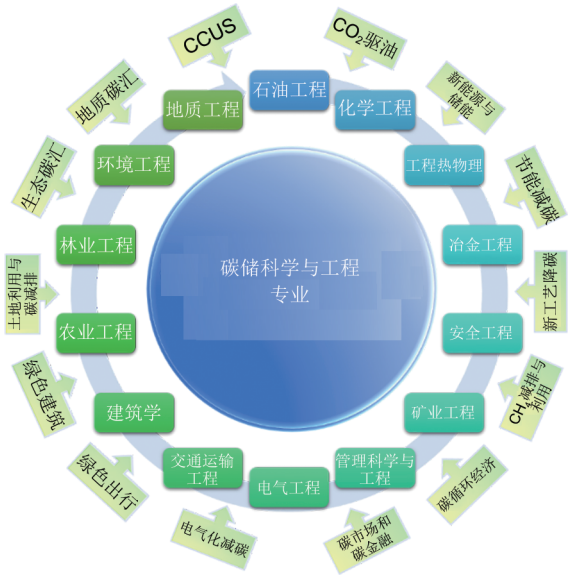


图5 碳储专业多学科交叉关系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of multidisciplinary interdisciplinary relationships for carbon storage specialty

2.3.2 构建工程实践创新体系

为促进理论教学与工程实践有机衔接，构建了“场景驱动、赛创融合”的工程实践创新育人体系。该体系立足CCUS产业实践需求，围绕学生工程实践能力、跨学科协同能力和创新创业能力培养，突出真实场景牵引、分层递进训练和项目实战支撑，推动知识传授向能力培养转变。

首先，构建全链条产业沉浸式实践教学体系。依托国家级CCUS示范项目平台，建立面向产业全流程的实践教学模式，形成“认知实习—跟岗实习—顶岗实习”三阶递进的实践教学路径。认知实习侧重工程全流程认知，跟岗实习侧重不同技术模块实践，顶岗实习侧重岗位胜任能力和复杂工程问题解决能力培养，从而推动学生在真实产业场景中实现专业认知、实践能力和工程能力的递进提升。

其次，构建基于项目制的多学科协同创新创业训练体系。依托“多学科导师团队+学生创新实践团队”的协同育人平台，建立产业实践问题向课程教学、科研训练和创新创业项目转化的机制，形成

“企业出题、高校答题、师生揭榜”的项目化培养模式。合作企业围绕CCUS工程现场中的真实痛点、技术瓶颈和岗位能力需求发布项目任务，高校导师将其转化为课程设计、科研训练和学科竞赛选题，学生跨学科组队开展方案设计、技术论证和成果转化，在真实工程问题牵引下完成知识整合与能力提升；同时，构建“以赛促学、以赛促创、以赛促用”的创新能力培养模式，引导学生围绕“双碳”目标与CCUS主题跨学科参赛，提升创新意识、团队协作能力和工程实践能力。

2.4　“双引育”构建国际化育人体系

为拓宽学生国际视野，依托国际能源领域合作网络，引入海外高校学者及国际能源企业专家，重点围绕国际碳封存标准、先进CO_2捕集技术、长周期安全监测、海洋碳储、国际碳市场规则等前沿内容开展专题教学，将全球最新技术路线、工程规范与行业经验引入课堂，弥补国内在部分前沿领域的实践不足。同时，建立中外导师联合指导机制，在毕业设计、科研创新、学科竞赛等环节引入国际视角，推动学生参与国际学术交流与跨国项目研讨，提升碳储专业人才的国际竞争力与跨文化沟通能力。通过国际化资源引入，实现国内产业需求与国际先进技术同频共振，进一步完善“产教融合、学科交叉、国际协同”三位一体的碳储专业人才培养体系，为我国碳储技术走向国际、参与全球气候治理提供具备国际视野的复合型人才支撑。

2.5　“三融合”构建数智化教学资源体系

碳储专业数智化课程教学资源是数字时代碳储人才培养的重要支撑，通过大数据、人工智能等数智技术打破传统教学的时空限制，构建“沉浸式体验、交互式学习、个性化推送”的教学新生态，为产教融合与学科交叉培养提供技术支撑，资源建设目标聚焦“三个融合”（图6）。

2.5.1　理论实践打造沉浸式场景

突破传统教材灌输模式，利用虚拟仿真、数字孪生、交互式三维模型等数智化技术，构建CCUS项目环境、碳监测场景、地质封存体模拟等高度仿真场景。交互式三维模型将储层岩心结构等抽象概念可视化，助力学生从“被动接受公式”转向“主动解决工程问题”。

2.5.2　学科协同搭建跨领域资源平台

打破地质工程、化学工程、环境科学等多学科壁垒，构建数智化资源集成平台，整合地质构造分析软件、区块链存证平台等工具与数据，形成多维度知识图谱，以数字化场景串联跨学科知识点，培养学生系统思维与跨学科整合能力，以应对碳储产业链各环节的挑战。

2.5.3　教学管理构建个性化教学体系

依托大数据、人工智能技术形成“智能诊断—动态适配—精准反馈”教学体系，构建“基础巩固—进阶提升—前沿探索”三级递进式课程模块。基础模块通过微视频、智能题库夯实核心理论；进阶模块以真实案例融入虚拟仿真、协作项目，培养问题解决能力；前沿模块通过专家讲座、文献指引对接学科新进展。智能系统实时追踪学习数据，动态调整学习路径，实现资源集约供给与个性化赋能。

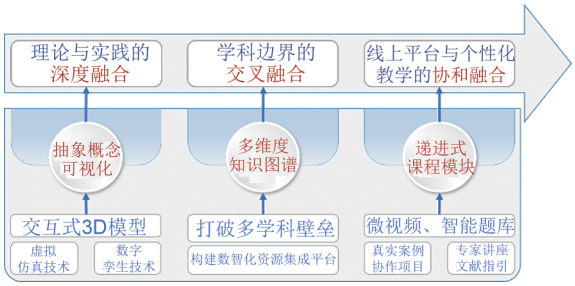


图6　数智化课程教学资源“三个融合”

Fig. 6　Three integrations of digital and intelligent curriculum teaching resources for carbon storage specialty

3　实践成效

中国石油大学（北京）碳储专业按照“厚基础、重交叉、强实践、促创新”的建设思路，构建以科技前沿技术为驱动的面向未来技术的人才培养新模式，在学科竞赛、科研项目、科研成果、教学质量等方面形成了阶段性建设成效，具体体现在以下几个方面：

3.1　双导师协同育人成效显著

学校建立了“校内导师+企业导师”协同育人机制，立足碳储专业人才培养实践，推动校内教学与企业资源深度融合。校内导师侧重理论体系构建与学术思维培养，企业导师聚焦实践技能训练与行业认知拓展，形成“理论筑基—实践赋能—认知深化”的协同链条（图7）。

在课程教学中，以“CO_2地质利用与封存”课程为例，学校采用双导师协同教学模式。校内导师

负责理论体系讲授，企业导师结合实际工程项目每学期开设不少于8学时的案例分析、实操指导和行业前沿解读，形成“理论讲解—案例分析—实操指导”的教学闭环。

在该课程的期末大作业选题中，学生选择的研究主题均来源于企业真实案例或典型工程场景，覆盖碳捕集、资源化利用以及地质/海洋封存等碳储全产业链关键环节，例如“膜分离法二氧化碳捕集技术的研究与应用”“CO_2在油气藏中的封存机理及研究与应用进展”等，这种方式显著提升了学生对碳储产业链各环节的认知深度和解决复杂工程问题的能力，充分体现了产教融合在人才培养中的实效。

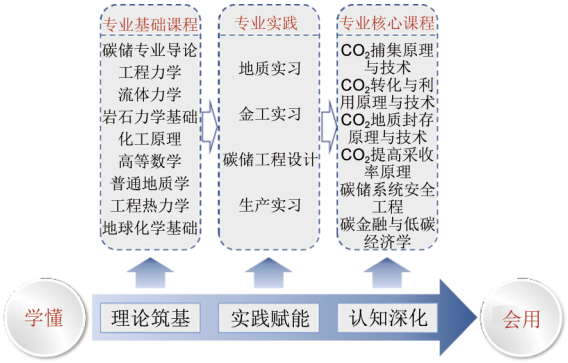


图7 碳储科学与工程学科课程设计

Fig. 7 Curriculum design of carbon storage science and engineering discipline

3.2 产教融合驱动知识体系前沿化

为保障知识体系的前沿性与适切性，学校连续举办多届全国高等学校碳储科学与工程人才培养研讨会，组织校内外专家围绕专业建设、人才培养、教材编写及教学方法改革等开展专题研讨，并据此系统修订课程内容。近三年来，已完成“二氧化碳提高采收率原理”等6门课程的教学内容更新，有效保障了产教融合背景下知识体系与产业发展需求的动态衔接。

依托石油工程、地质学等学科优势，学校将国家级科研项目成果和企业工程案例转化为教学资源，推动前沿科研成果进课堂。例如，将CO_2提高采收率与地质封存一体化相关工程案例引入“二氧化碳提高采收率原理”课程，用于支撑“提高采收率机理”等教学内容，逐步形成“科研案例进课堂、学术成果入教材”的动态更新机制。在课外拓展方面，学校邀请50余位企业专家和行业学者围绕CCUS技术前沿、工程应用和产业发展开展专题讲座（图8），并通过校内导师预习指导、专题研讨和学习反馈，形成“企业导师分享、校内导师引导、学生互动提升”的协同学习机制。



(a) 行业专家参与课内教学



(b) 企业专家开展专题讲座

图8 产教导师共同参与教学

Fig. 8 Participation of industry and academic tutors in teaching

3.3 学科交叉与竞赛成果丰硕

学校实施“一人一方案”个性化培养路径，构建了融合“开放创新”理念的研究型课程体系，专业基础课打破力学、化学等学科壁垒，核心必修课覆盖“捕集—转化—封存—应用—管控”全链条内容，联合中国矿业大学（北京）、重庆大学等5所高校，建设9本碳中和教材，助力形成支撑交叉培养的教材体系（图9）。

在碳储专业知识体系构建中，学校将工业级碳储工程实践需求融入课程，形成“基础理论—产业应用”双轨架构。学校目前已联合东营市政府、呼和浩特市政府等地方政府建立科研创新平台，设立CCUS技术创新中心，打造“科研+教学+产业”三位一体育人载体，学生人均累计参与工业实践时长达200小时，有效促进学生形成理论与实践相结合的产教融合交叉知识体系。同时，学校与胜利油田勘探开发研究院共建CCUS实践教学基地，连续5

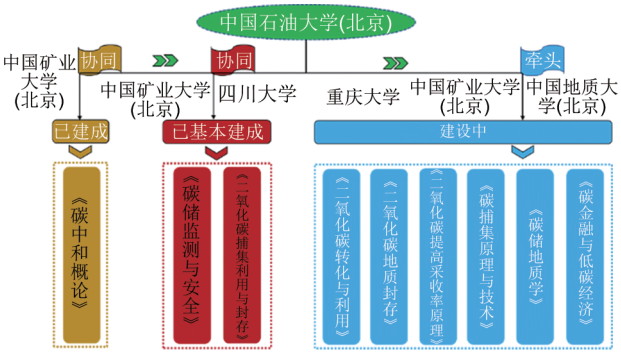


图9　碳储专业教材体系建设

Fig. 9　Textbook system construction of carbon storage specialty

年为学生提供地质勘查、工程设计等多学科融合的实践场地。学校还设立了首批CCUS双创教研室与实践基地，组织学生参与了“互联网+”“挑战杯”等国家级竞赛，其中2022级碳储专业本科生完成95项跨学科参赛作品，其中15项作品获得国家级奖项。

3.4　国际视野更开阔

为构建兼具本土实践特色与国际前沿视野的碳储专业人才培养体系，学校依托联合国教科文组织“碳中和与气候变化驱动绿色转型”教席平台，建立常态化海外专家引育、国际学术联动、跨国实践对接的协同机制，形成了“国内培养，对标国际”的立体化育人格局。

为打通学生跨国交流的实践渠道，学校连续三年主办二氧化碳捕集、利用与封存（carbon capture, utilization and storage，以下简称CCUS）（CCUS）国际会议等高水平国际学术盛会，汇聚来自中国、美国、挪威、加拿大等10余个国家的院士、顶尖高校学者及国际头部能源企业资深专家近百名，吸引超4万名行业同仁与师生线上线下参与。依托国际会议平台，组织碳储专业学生全程参与会议筹备、学术研讨、论文宣讲与国际交流等环节，使学生近距离接触国际CCUS技术前沿、工程规范与产业趋势，拓宽全球学术视野和跨国技术合作认知。

同时，学校累计邀请来自国际能源署（IEA）、挪威国家石油公司、壳牌、埃克森美孚等国际权威机构与头部能源企业的资深技术专家，以及来自美国斯坦福大学、加拿大卡尔加里大学、英国帝国理工大学等全球CCUS研究顶尖高校的学者42位，开展线上线下专题讲座47场，核心课程模块化授课累计超80学时。授课内容精准覆盖国际碳封存通用标准与规范、海洋碳封存前沿技术、长周期封存安全监测体系、全球碳市场与碳金融规则等国内教学体系中的薄弱环节，将国际一线工程实践经验与学术前沿成果直接转化为教学内容。同时建立中外导师联合指导机制，在学科中引入海外专家协同指导，累计联合指导学生课题8项，推动学生研究选题对标国际技术前沿，跟踪数据显示，2023—2025级碳储专业学生中，超过90%的学生参与过国际专家授课与学术交流活动，学生对全球CCUS技术发展动态、国际行业标准与全球气候治理体系的认知进一步加深。

3.5　数智化教学资源提质升级

数智化教学平台是碳储专业人才培养的重要组成部分。依托教务系统的CUPers学堂平台，学校已完成碳储专业多门课程数智化教学平台的构建（图10）。以《碳储安全与监测》课程为例，学校通过走访碳中和类高校及能源企业精准定位培养目标，并邀请跨学科CCUS专家指导课程建设，课程汇聚19个授课视频、13个非视频资源及29个课程资料，并集成了随堂签到、主题讨论、题库作业库等功能，实时追踪学生课堂互动数据、作业完成质量，重新定义了教学交互模式（图11、图12、图13）。近两年课程考核结果显示，随着课程建设与教学改革持续推进，课程规模由2024年的12人扩大至2025年的30人，合格率均保持100%，优秀率均为33.33%，平均分由85.75分小幅提升至85.83分，整体成绩水平保持稳定；成绩全距由35分收窄至24分，学生成绩分布更加集中，过程成绩标准差降低68.60%。上述结果表明，课程改革在扩大教学覆盖面的同时，较好地维持了教学质量稳定性，并促进了学生学习成效的均衡提升。同时数智化平台工具的深度应用使教学成效显著提升，形成“底线抬升、高分段稳定”的良性态势，验证了数智化手段对跨学科课程教学韧性的强化作用，为大规模培养复合型人才提供了技术支撑。

4　人才培养面临的挑战与建议

本文围绕碳储专业人才培养中产教融合不深、学科交叉不足和数智化支撑薄弱等问题，提出了“双导师”校企联合指导、“二机制”动态构建交叉

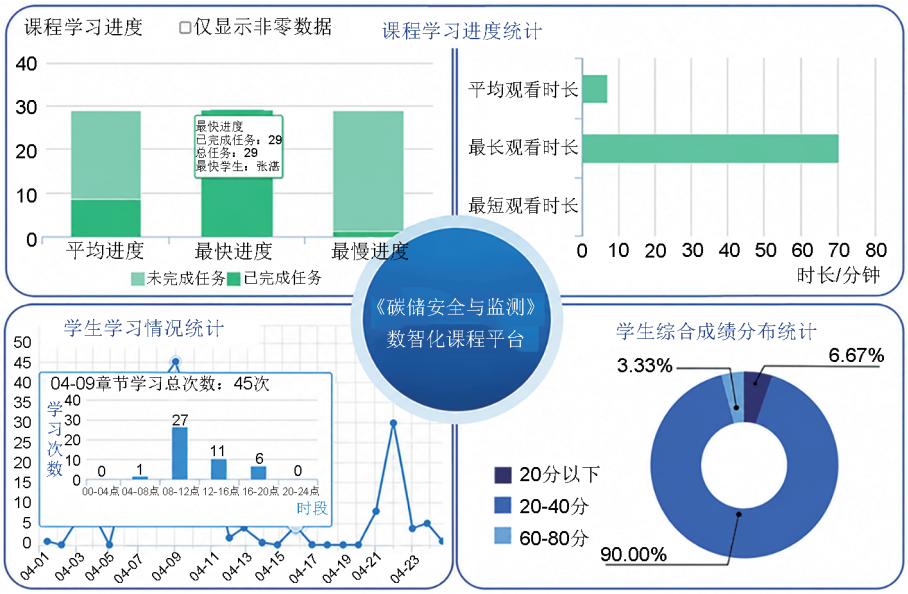


图10 《碳储安全与监测》数智化课程平台

Fig. 10 Digital and intelligent curriculum platform of carbon storage safety and monitoring

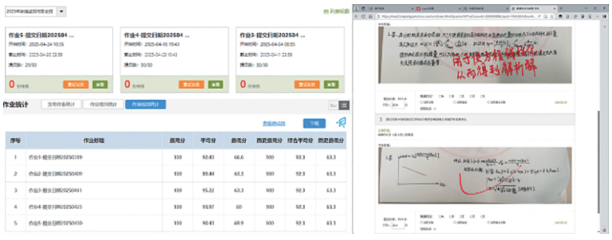


图11 数智化课程平台作业发布及批改

Fig. 11 Homework release and correction on the digital and intelligent curriculum platform

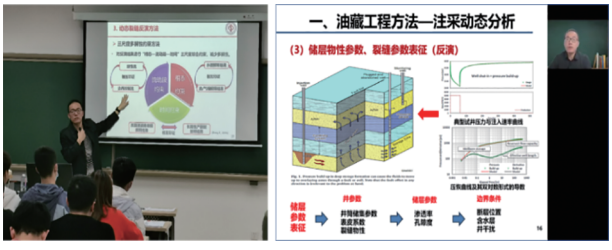


图12 课堂实录与授课视频

Fig. 12 Classroom records and teaching videos



图13 学生课堂互动与学习情况智能分析

Fig. 13 Intelligent analysis of student classroom interaction and learning status

知识体系、工程实践与创新创业“双体系”以及数智化课程教学体系等改革路径，并在实践中取得了较好成效。总体来看，相关改革较好地回应了碳储专业人才培养中的关键问题，为复合型、创新型人才培养提供了系统化思路和实践基础。

需要指出的是，碳储科学与工程专业作为新兴交叉专业，人才培养模式仍处于持续探索和完善阶段。当前实践主要基于某单一高校的专业建设过程展开，成效主要体现为课程建设、实践训练、竞赛成果、教学质量和国际交流等阶段性结果，后续仍需结合多届学生培养数据、毕业去向、岗位适应性及用人单位反馈进行持续跟踪，以进一步检验培养模式的长期效果。

该模式的推广应用也需具备一定条件。碳储专业涉及石油工程、地质资源、化学工程、环境工程、信息技术等多学科知识，对学科基础、师资队伍、科研平台、企业导师和实践基地的依赖性较强。不同高校在专业基础、区域产业需求和校企合作资源方面存在差异，因此在借鉴相关经验时，应结合自身学科优势和产业条件，对课程体系、实践路径和数智化资源建设方式进行适配调整，避免简单照搬。

产教融合与学科交叉培养的长效运行，还需要

更加稳定的制度保障。校企协同育人不能仅依赖短期项目、专题讲座或阶段性实习支撑，而应在企业导师聘任、课程共建、实践项目嵌入、毕业设计联合指导、学生评价和成果认定等方面形成常态化机制。数智化教学资源建设不应停留在视频、题库和资料积累层面，还需进一步加强真实工程场景、虚拟仿真、学习过程数据分析和教学反馈评价的深度融合，使数智技术真正赋能跨学科知识整合和复杂工程能力培养。

未来，应进一步围绕碳储产业发展需求和新工科人才培养要求，持续完善校企协同育人长效机制，加强交叉课程体系的一体化设计，推动企业真实工程问题进入课程教学、科研训练和毕业设计全过程。同时，应深化人工智能、大数据等技术在教学组织、学习支持和质量评价中的应用，逐步形成可持续、可推广、可迭代的碳储专业人才培养模式，为服务“双碳”战略和CCUS产业发展提供更加稳定的人才支撑。

5　结　论

面向“双碳”战略背景下碳储产业快速发展对高层次复合型人才的迫切需求，本文聚焦碳储专业人才培养中产教融合不够深入、学科交叉支撑不足以及数智化教学体系不够完善等现实问题，系统探讨了碳储专业人才培养模式改革路径，并形成了较为完整的改革思路与实践方案。

实践表明，本文构建的碳储专业人才培养模式在推动校企协同育人、促进多学科知识融合、强化工程实践训练和提升人才培养质量等方面取得了积极成效，为服务碳储产业发展需求提供了有力支撑，也为新兴交叉专业的人才培养改革提供了可借鉴的思路。

同时也应看到，碳储专业作为面向国家战略需求的新兴专业，其人才培养模式仍需在推广适用性、制度保障、课程协同和数智化深度应用等方面不断完善。未来，应继续围绕产业需求变化和教育教学改革趋势，持续优化协同育人机制、完善交叉课程体系、深化数智技术赋能，不断提升碳储专业人才培养的科学性、系统性和前瞻性，为我国碳储领域高质量发展提供更加坚实的人才支撑。

参 考 文 献

[1] 李猛, 苟倩誌, 郑玉杰, 等. 学科交叉背景下储能科学与工程专业本硕博贯通培养实践[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(5): 2141-2148.
LI M, GOU Q Z, ZHENG Y J, et al. Interdis ciplinary practice of undergraduate, master, and Ph. D. in major of energy storage science and engineering[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(5): 2141-2148.

[2] 何雅玲, 兰剑, 李慧, 等. 服务"双碳"战略 培养储能创新型领军人才[J]. 中国高等教育, 2024(5): 26-29.
HE Y L, LAN J, LI H, et al. Serving the "double carbon" strategy and cultivating innovative leading talents for energy storage[J]. China Higher Education, 2024(5): 26-29.

[3] 中国高等教育学会. 绿色双碳人才需求与发展报告(2024年)[R]. 北京: 中国高等教育学会, 2024.
China Higher Education Association. Report on the demand and development of green and dual-carbon talents (2024)[R]. Beijing: China Higher Education Association, 2024. (in Chinese)

[4] AGENCY I E. Carbon capture, utilisation and storage: The Opportunity in Southeast Asia[M]. OECD, 2021 DOI: 10.1787/c90c6043-en.

[5] 王如志, 崔素萍, 聂祚仁. "双碳" 目标视角下 "四位一体" 本科教育模式创新[J]. 中国大学教学, 2022(4): 14-18. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0450.2022.04.004.
WANG R Z, CUI S P, NIE Z R. Innovation of "four in one" undergraduate education mode from the perspective of "double carbon" goal[J]. China University Teaching, 2022(4): 14-18. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0450.2022.04.004.

[6] WANG S. Carbon energy: A multidisciplinary exploration of energy technologies and carbon materials science[J]. Carbon Energy, 2019, 1(1): 4-5. DOI:10.1002/cey2.7.

[7] 芮振华, 张凤远, 梁永图, 等. "双碳" 目标下高校开设碳储科学与工程专业的必要性与初步实践[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(3): 385-392. DOI:10.13639/j.odpt.202209053.
RUI Z H, ZHANG F Y, LIANG Y T, et al. Necessity and preliminary practice of carbon storage science and engineering major in colleges under the dual carbon goals[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(3): 385-392. DOI: 10.13639/j.odpt.202209053.

[8] 饶中浩, 刘臣臻, 霍宇涛, 等. 面向储能技术的跨学科拔尖创新人才培养教学实践与探索[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3): 1206-1212. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021-0001.
RAO Z H, LIU C Z, HUO Y T, et al. Practice and exploration of teaching for interdisciplinary outstanding and innovative talents training oriented to energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(3): 1206-1212. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021-0001.

[9] 东晓虎, 刘慧卿, 黄世军, 等. 碳中和背景下高校能源类专业教学改革思考——以石油工程专业为例[J]. 教育教学论坛, 2022(10): 51-54.
DONG X H, LIU H Q, HUANG S J, et al. Reflections on the teaching reform of energy majors in colleges and universities

under the background of carbon neutrality—Taking petroleum engineering as an example[J]. Education and Teaching Forum, 2022(10): 51-54.

[10] 饶中浩, 郑喜颖, 卢晓萍, 等. 储能科学与工程专业人才培养现状调研与思考[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(1): 417-426.
RAO Z H, ZHENG X Y, LU X P, et al. Research and reflection on the current status of talent cultivation in Energy Storage Science and Engineering[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(1): 417-426.

[11] 张胜杰, 林水静. 培养高水平"双碳"人才,助推能源高质量发展[N]. 中国能源报, 2025-01-27(002).
ZHANG S J, LIN S J. Cultivating high-level "dual carbon" talents to promote high-quality energy development[N]. China Energy News, 2025-01-27(002).

[12] 张贤, 杨晓亮,鲁玺,等. 中国碳捕集利用与封存年度报告(2023)[R]. 北京:中国 21 世纪议程管理中心、全球碳捕集与封存研究院、清华大学,2023.
ZHANG X, YANG X L, LU X, et al. Annual Report on Carbon Capture, Utilization and Storage in China (2023) [R]. Beijing: China Agenda 21 Management Center, Global Carbon Capture and Storage Institute, Tsinghua University, 2023.

[13] 李巾锭, 樊林浩, 张寿行, 等. "1+N+X"产教融合协同育人模式在储能专业人才培养中的探索与实践[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 2099-2106. DOI:10.3969/j.issn.1008-0686.2025.01.052.
LI J D, FAN L H, ZHANG S H, et al. Exploration and practice of "1+N+X" model of industryeducation integration and collaborative education in training talents for energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(6): 2099-2106. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0686.2025.01.052.

[14] 冯云珠, 钱庆荣, 孙晓丽, 等. "双碳"背景下基于科研成果转化导向的产教融合协同育人模式探索与实践——以福建师范大学资源循环科学与工程专业为例[J]. 再生资源与循环经济, 2024, 17(8): 11-14.
FENG Y Z, QIAN Q R, SUN X L, et al. Exploration and practice of the collaborative education model of industry education integration based on the transformation of scientific research achievements under the "Dual Carbon" background—Taking the Resource Recycling Science and Engineering Major[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2024, 17(8): 11-14.

[15] 张政, 华中生. 学科交叉赋能人才培养的整体性思维及其实施策略[J]. 中国大学教学, 2024(7): 4-10, 58. DOI:10.3969/j.issn.1005-0450.2024.07.002.
ZHANG Z, HUA Z S. Holistic thinking and implementation strategy of interdisciplinary empowerment talents training[J]. China University Teaching, 2024(7): 4-10, 58. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0450.2024.07.002.

[16] SHAH R, GILLEN A L. A systematic literature review of university-industry partnerships in engineering education[J]. European Journal of Engineering Education, 2024, 49(3): 577-603. DOI: 10.1080/03043797.2023.2253741.

[17] OLSON H C, BRYANT T L, OLSON J E, et al. CO_2 injection for geological storage: A series of activities for training professionals and educating students in geological carbon storage[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 7257-7264. DOI: 10.1016/j. egypro. 2013. 06.663.

[18] 祝智庭, 张博, 戴岭. 数智赋能智慧教育的变与不变之道[J]. 中国教育信息化, 2024, 30(3): 3-14.
ZHU Z T, ZHANG B, DAI L. The change and the unchanged in education empowered by digital intelligence technology[J]. Chinese Journal of ICT in Education, 2024, 30(3): 3-14.

[19] 马宁, 洪心语, 李如妍. 数智时代课程资源开发与利用: 挑战、变革与实践路径[J]. 福建教育, 2025(4): 13-17.

[20] 王超, 张晓颖. 从职责异构到职责同构: 校企双导师制改革路径探寻[J]. 教育学展望, 2025(4): 58-67.
WANG C, ZHANG X Y. From duty heterogeneity to duty homogeneity: An analysis of the reform path of school-enterprise dual tutorial system[J]. Education Prospects, 2025(4): 58-67.

[21] 梁婧. 双导师制在产教联合培养新质工匠中的作用机理[N]. 中国工业报,2026-03-02(019).
LIANG J. Mechanism of dual-tutor system in industry-education joint cultivation of new-type craftsmen[N]. China Industry News, 2026-03-02(19).

[22] 焦波,张杰,孙洪源,等. 产教融合背景下专业学位研究生培养模式的探索与实践[J]. 进展, 2024(1): 3-6.
JIAO B, ZHANG J, SUN H Y, et al. Exploration and practice of professional degree postgraduate training mode under the background of industry-education integration[J]. Progress, 2024(1): 3-6.