

面向生物经济人才培养的酶工程课程教学思考与探索

赵安琪¹, 伊娟娟¹, 吕永坤², 王志², 张一折¹, 许敬亮^{*2}

1 郑州大学 生命科学学院, 河南 郑州 450001

2 郑州大学 化工学院, 河南 郑州 450001

赵安琪, 伊娟娟, 吕永坤, 王志, 张一折, 许敬亮. 面向生物经济人才培养的酶工程课程教学思考与探索[J]. 微生物学通报, 2025, 52(7): 3302-3313.

ZHAO Anqi, YI Juanjuan, LÜ Yongkun, WANG Zhi, ZHANG Yizhe, XU Jingliang. Teaching reform of Enzyme Engineering for cultivating talents in bioeconomy[J]. Microbiology China, 2025, 52(7): 3302-3313.

摘要: 生物经济正在成为引领新兴产业发展的重要力量, 酶工程作为生物经济的重要产业领域, 未来发展充满机遇与挑战。基于此, 本文就酶工程课程本科教学改革开展思考与探索, 旨在通过培养目标定位优化、思想内涵提升、教学内容凝练与重组、研究与应用热点内容引入、学习与考核模式多元化设计等方面的改革, 提升酶工程课程的教学质量和学生学习效果, 为培养具备丰富专业知识、扎实实践技能与正确人生价值观, 并适应国家生物经济发展需求的酶工程技术人才提供有价值的启发与思考。

关键词: 生物经济; 教学研究; 生物工程; 酶工程

Teaching reform of Enzyme Engineering for cultivating talents in bioeconomy

ZHAO Anqi¹, YI Juanjuan¹, LÜ Yongkun², WANG Zhi², ZHANG Yizhe¹, XU Jingliang^{*2}

1 School of Life Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China

2 School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract: The bioeconomy is becoming an important force leading the development of strategic emerging industries. As an important field of bioeconomy, enzyme engineering face great

资助项目: 郑州大学教育教学改革研究与实践项目(2022ZZUJG258, 2024ZZUJGXM177)

This work was supported by the Research and Practice Project of Education and Teaching Reform of Zhengzhou University (2022ZZUJG258, 2024ZZUJGXM177).

*Corresponding author. E-mail: xujl@zzu.edu.cn

Received: 2024-11-14; Accepted: 2025-02-14; Published online: 2025-03-14

opportunities and challenges in the future. We explore the teaching reform of Enzyme Engineering through the optimization of teaching target positioning, improvement of ideological connotation, condensation and reorganization of teaching contents, introduction of research and application hotspots, and design of diversified teaching and assessment modes. The teaching reform improves the teaching quality and student learning feedbacks. This paper provides valuable inspirations for cultivating enzyme engineering talents with rich professional knowledge, solid practical skills, and correct view of life values to meet the needs of national bioeconomic development.

Keywords: bioeconomy; teaching research; bioengineering; Enzyme Engineering

生物经济是以生命科学和生物技术的发展进步、普及应用为基础的新经济形态。随着生命科学和生物技术与医药、健康、农业、能源、环保、材料等产业的深度融合,生物经济正在成为促进经济和社会发展的一股新兴力量,不仅为传统产业发展提供了绿色、可持续的新动力,而且可以为人类解决日益严峻的人口激增、粮食短缺、能源危机、环境污染等难题提供了根本性思路^[1]。因此,生物经济被誉为继农业经济、工业经济和信息经济之后的“人类经济社会发展的第4次浪潮”^[2]。目前越来越多的国家将生物经济纳入国家战略,可以预见,生物经济将成为未来大国科技经济竞争的主战场之一。2022年5月10日,相关文件指出:“发展生物经济是顺应全球生物技术加速演进趋势、实现高水平科技自立自强的重要方向,是前瞻布局培育壮大生物产业、推动经济高质量发展的重要举措,是满足生命健康需求快速增长、满足人民对美好生活向往的重要内容,是加强国家生物安全风险防控、推进国家治理体系和治理能力现代化的重要保障”;不仅强调了生物经济在我国国民经济和社会发展中的重要地位,同时还开启了我国生命科学和生物技术自立自强的新篇章^[3]。

酶是由活细胞产生的具有催化功能的蛋白质或RNA,在生命活动中发挥着不可或缺的作用,是生命科学和生物技术基础研究的重要内容。酶在生命体外也可发挥其催化活性,而且具有对底物特异性高、催化效率高、反应条件温和、副产物少、能耗低、安全无毒性等优

势,被誉为“绿色”催化剂^[4]。酶工程是酶学研究与应用相结合而形成的技术领域,内容上包括了酶分子结构修饰和改造、产酶菌株挖掘与构建、酶生产与放大、提取纯化与制剂、固定化、反应器设计与应用等,并且随着酶学基础研究的深入、酶工程与邻近关联学科的相互交叉渗透以及新兴应用领域的挖掘开发,酶工程的内涵也在不断更新与扩充^[5]。随着酶工程技术和产品在食品、饲料、环保、纺织、能源、医药、农业等领域的应用越来越广泛,酶工程在推动生物经济高质量发展中所发挥的作用也越来越重要。

人才是我国生物经济发展的关键保障、核心力量与第一资源,高校是人才培养的主要阵地。在生物经济浪潮席卷全球并加速融入经济社会发展的时代背景下,本文对生物工程专业本科生培养核心课程“酶工程”的教学目标、教学内容、教学模式与考核模式进行了优化探索,以期从知识学习、能力培养和价值观塑造3个维度提升课程的教学效果和人才培养水平(图1)。

1 教学目标

在生命科学和生物技术从实验室研究向规模化生产与应用的转化过程中,生物工程专业人才发挥着承上启下的重要作用;生物经济的蓬勃发展对生物工程专业人才提出了更高的要求。郑州大学生命科学学院生物工程专业设立于2001年,旨在培养德智体美劳全面发展,适应国家社会发展需要,具备应用生物学和工程学知识的能力,具有生物技术及其产业

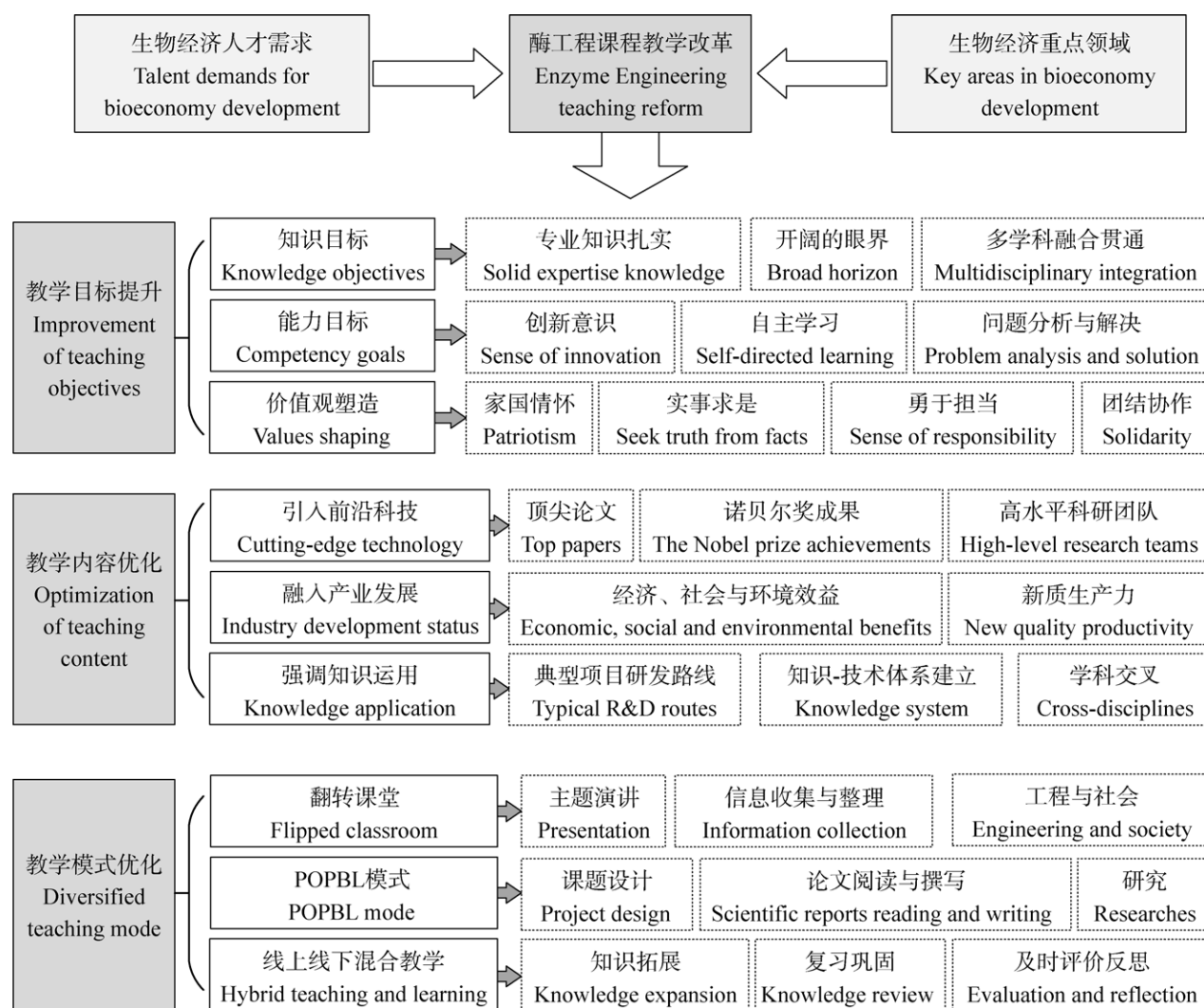


图1 面向生物经济人才培养的酶工程课程教学改革主要内容

Figure 1 The main content of the Enzyme Engineering teaching reform for cultivating talents in bioeconomy.

化的科学原理、工艺技术和工程设计等理论和技能,具有社会责任感 and 职业道德、人文素养、团队精神和健康的身心素质,具备国际视野、创新意识、经济观念、环保意识和管理能力,具备在生物工程领域从事技术开发、科学研究、工程设计及生产管理等方面工作的高级工程技术人才。酶工程是生物工程产业的重要组成部分,酶工程课程也是生物工程专业本科阶段的核心课程之一,因而面向生物经济发展方向和专业培养目标,从知识、能力和价值观3个维度对教学目标进行梳理和提升。

知识目标:掌握酶学基本原理和基础知识、酶的生产和提取纯化的工艺流程与技术关键、酶分子定向进化和理性设计改造技术原理、酶固定化技术等,理解酶工程技术和产品在国民经济发展以及生物医药、生物医学工程、生物农业、生物制造、生物能源、生物环保、生物技术服务等新兴产业中的应用价值及影响,了解酶工程的前沿技术和热门发展领域,形成酶工程技术完整的知识结构、建立对酶工程产业的整体认知。

能力目标:具有科学逻辑思维、独立思考

和思辨能力,能够运用酶工程基本理论知识和技术,为酶工程产品开发设计、生产加工、应用放大等过程中的关键节点和瓶颈问题的分析与解决提供科学方案;能够综合发酵工程、基因工程、生物化学、结构生物学、生物信息学等邻近学科相关知识,分析和解决酶工程实践中的关键问题;能够运用数据库、文献库等网络信息资源,自主学习酶工程领域的新知识和新技术。

价值观塑造:树立青年一代担当民族复兴大任的使命感与责任感,坚定科学技术造福人民群众、更好满足人民群众日益增长的美好生活追求的理想信念;恪守人与自然和谐共生、经济发展与生态文明建设互融互促理念,遵守科研道德和生命伦理;弘扬追求真理、勇于创新、实事求是、不畏困难的科学精神;自觉践行社会主义核心价值观,坚定中国特色社会主义共同理想。

2 教学内容

酶工程课程以酶工程基础理论、关键技术和应用开发为主要内容,包含酶学及酶工程理论基础、酶生产菌株选育与酶基因挖掘、酶的化学修饰与蛋白质工程、酶蛋白分离纯化与制剂、非水相酶催化、酶固定化、酶反应器等知识要点。郑州大学生物工程专业酶工程课程开设于2019年(2018–2019学年春季学期),授课对象是大三学生,学生人数约为30–40。在本课程开设之前,部分酶工程原理与技术内容长期融合穿插于发酵工程、基因工程、生物反应工程、生物分离工程等课程教学中。在开展教学改革前,教学团队收到不少“酶工程教学内容与其他课程交叉重复”“课程前沿性与应用性不足”等评价与反馈。为了改善这一问题,在酶工程课程教学内容优化中,有目的地弱化了交叉重复内容教学,强化了酶工程在产品研发及生产应用中关键路线、流程、技术等系统认知的培养。而且,在引导学生将相关课程知

识融会贯通的同时,可挖掘和引入教学内容与酶工程成果及其对经济、社会影响的有机结合点^[6],以深化学生对知识点的认识和理解,拓宽学生视野,提升学生独立思考、项目设计开发的能力,激发学生对专业的认同感和家国情怀,为未来从事酶工程产品设计、开发及生产管理等工作奠定基础(表1)。

第1章“绪论”,以酶学及酶工程发展简史、酶工程研究技术概况和酶工程研究热点等为主要内容。传统的“酶工程发展简史”列表式教学方式,存在平铺直叙、枯燥无聊、学生记忆点不突出等问题;淀粉水解酶作为工业生产上应用最早且产量最大的酶制剂产品,其开发应用是酶工程技术发展历程的缩影,在教学中穿插引入“淀粉酶的前世今生”,可以提高课堂教学效果,并且有助于学生建立酶工程产品及关联产业的认知、理解酶工程产品技术在生物经济中的巨大潜力^[15–16]。新酶挖掘、酶的人工设计与定向进化、组合生物催化是目前“酶工程研究热点”。在国际权威学术期刊 *Science* 上发表的 CO₂ 到淀粉的人工全合成研究成果,通过生物酶催化剂挖掘和组合,构建了一条11步反应的人工淀粉合成途径,相较于自然界淀粉合成需要60多个步骤,降低了合成复杂度、提高了能量转化效率,具备解决温室气体排放和粮食安全“一石二鸟”策略的重大潜力^[7];该研究是我国科研人员在组合生物催化研究领域的重大成果,引入课堂教学,有助于学生扩展前沿视野、提高学习及科研的积极性、增强对当前酶工程研究热点领域与代表性研究团队的认知,理解酶工程在解决人类重大问题和发展生物经济中的重要意义。

第2章“酶学与酶工程基础”,主要包括酶的组成与结构、酶催化特性等。在“酶的组成与结构”研究方法介绍中,引入2017年“诺贝尔化学奖”得主在“研发出冷冻电镜,用于生物分子结构的高分辨率测定”中的贡献,2024年“诺贝尔化学奖”得主在“计算蛋白质设计与蛋白质

表 1 酶工程课程教学改革举例

Table 1 Examples of the teaching reform of Enzyme Engineering

章节 Chapter	教学内容 Content	教学改革 Teaching reform	生物经济关联领域 Related field of bioeconomy
1. 绪论 1. Introduction	酶工程发展简史 Brief history of enzyme engineering	增加“淀粉酶的前世今生”专题介绍 Addition of a special introduction about the past and present of amylase	绿色生物制造 Green biomanufacturing
	酶工程研究热点 Research hotspots of enzyme engineering	增加世界首次 CO ₂ 到淀粉的无细胞全合成研究 ^[7] Addition of the research on cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide ^[7]	生物质替代 Biomass substitution
2. 酶学与酶工程基础 2. Fundamentals of enzymology and enzyme engineering	酶的组成与结构 Composition and structure of enzymes	增加 2017 年和 2024 年“诺贝尔化学奖”、介绍了我国在结构生物学领域的重要贡献 Addition of the introductions about the 2017 and 2024 Nobel prize in Chemistry, as well as the contributions of structural biology	生物医药 Biomedicine
	酶催化特性 Catalytic properties of enzymes	增加手性胺绿色生物合成研究介绍 ^[8-9] Addition of the introductions about researches on green biosynthesis of chiral amines ^[8-9]	绿色生物制造 Green biomanufacturing
	酶促反应动力学 Enzymatic reaction kinetics	MOOC 平台课程自主学习 Self-leaning MOOC platform courses	
3. 新酶的发现及酶的生产 3. Discovery of new enzymes and enzyme production	新酶的发现 Discovery of new enzymes	增加利用宏基因组测序技术挖掘新酶基因研究方法介绍 ^[10-11] Addition of the introductions about researches on the discovery of new enzymes using metagenomic sequencing ^[10-11]	生物医药 Biomedicine
		“纤维素酶/淀粉酶/蛋白酶生产菌株的筛选”课题设计; MOOC 平台自主学习产酶微生物筛选方法 Topic design on the screening of cellulase/amylase/protease producing strains; MOOC platform courses on the methods about the screening of bacteria the producing aimed enzymes;	绿色生物制造 Green biomanufacturing
	酶基因的异源表达 Heterologous expression of enzyme genes	黄曲霉毒素 B1 分解酶异源表达文献介绍 ^[12-13] Introduction of the papers on the heterologous expression of aflatoxin B1 decomposition enzymes ^[12-13]	生物安全 Biosecurity
		“氨基酸衍生物/稀有糖酶法合成”课题设计; MOOC 平台自主学习基因异源表达方法与原理 Topic design on the enzymatic synthesis of amino acid derivatives/rare sugars; MOOC platform courses on the methods about the heterologous expression of enzyme genes	生物医药 Biomedicine
	酶的生产 Enzyme preparations	MOOC 平台自主学习微生物、动物和植物细胞培养关键技术 MOOC platform courses on the production of enzymes by microbe, animal and plant cells	

(待续)

(续表 1)

章节 Chapter	教学内容 Content	教学改革 Teaching reform	生物经济关联 领域 Related field of bioeconomy
4. 酶的分离纯化与制剂 4. Separation, purification and formulation of enzymes	酶的分离纯化 Separation and purification of enzymes	引入棉织物染整前处理关键酶(角质 酶)纯化与鉴定案例 ^[14] Addition of the introductions about the researches on the purification and identification of cutinase for the pre-dyeing treatment of cotton fabrics ^[14]	绿色生物制造 Green biomanufacturing
5. 酶的化学修饰与蛋白质工程 5. Chemical modification of enzymes and protein engineering	酶的定向进化 Directed evolution of enzymes	介绍 2018 年“诺贝尔化学奖”: 驾驭进 化的力量 Introduction of the 2018 Nobel prize in Chemistry: harnessing the power of evolution	绿色生物制造、 生物医药 Green biomanufacturing and biomedicine
6. 非水相酶催化 6. Non-aqueous enzyme catalysis	非水相酶催化应用 Non-aqueous enzyme catalytic applications	强化生物柴油介绍 Emphasis on the introduction of biodiesel	生物能源 Bioenergy
7. 酶的固定化 7. Immobilization of enzymes	酶固定化方法 Enzyme immobilization methods	融入葡萄糖生物传感器实例 Introduction of glucose biosensors as the example	生物医药 Biomedicine
8. 酶反应器 8. Enzyme reactor	酶电极 Enzyme electrodes		
9. 酶的应用 9. Application of enzymes		引入翻转课堂教学模式 Application of the flipped classroom teaching mode	

结构预测方面”的贡献, 以及我国在结构生物学与蛋白质三维结构解析中的重要成就, 有助于提高学生的课堂专注度及教学的前沿性, 并借此鼓励学生勇于投身科学前沿探索、挖掘生命的奥秘, 以及帮助学生理解多学科交叉赋能酶研究与开发的重要意义。在“酶催化的特点”教学中, 引入英国曼切斯特大学 Mutti 等^[8]及华东理工大学 Chen 等^[9]发表的手性胺绿色合成研究, 并通过生物催化路线与化学催化路线的比较, 加深学生对酶反应条件温和、专一性高、催化效率高特点的认知, 理解酶催化在化学品绿色合成中的巨大开发与应用前景, 提高学生学习酶工程课程和从事酶工程研究、生产的积极性。

第 3 章“新酶的发现及酶的生产”, 主要包括新酶的发现、酶基因的异源表达及酶的生产 3 部分。这些内容与发酵工程和基因工程等课程存在部分交叉重复, 通过梳理优化, 可适当缩短重复内容和经典技术方法的教学时长。在“新酶的发现”部分中强化利用数据库检索比对挖掘酶的内容, 介绍 NCBI、BRENDA、UniProt 等酶学数据库的特点及使用方法, 以及生物信息学在新酶挖掘及序列-结构-功能研究中的重要作用, 并增加从宏基因组中发现新酶内容, 引入哈佛大学和麻省理工学院的研究人员 2017 年发表在 *Science* 上的利用宏基因组测序技术挖掘肠道菌群中新酶基因的研究, 以帮助学生了解发现新酶的研究模式, 增加学生对

生命科学研究的新工具、新技术的了解^[10-11]。在“酶的异源表达”部分强化微生物、动物细胞和植物细胞作为酶合成宿主的特点、适用场景及发展趋势介绍,并增加酶工程异源表达中常用的大肠杆菌(*Escherichia coli*)、毕赤酵母(*Pichia pastoris*)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、乳酸乳球菌(*Lactococcus lactis*)微生物表达系统特点及应用相关内容;引入获得全国发明专利博览会发明专利银奖的成果“黄曲霉毒素 B1 分解酶添加剂”,引导学生阅读黄曲霉毒素解毒酶(6-甲氧基双呋喃香豆素氧化酶)在大肠杆菌、毕赤酵母重组表达的相关论文^[12-13],通过论文结构、实验思路设计、实验路线、关键技术等的梳理与讲解,了解开展此类研究的基本流程、思路与关键技术,使学生进一步理解开展酶工程异源表达的目的与意义。

第 4 章“酶的分离纯化与制剂”,教学上主要包括酶提取、纯化与保存相关技术与原理。可弱化细胞破碎、发酵液预处理等与生物分离工程课程重复的内容,强化酶纯化的原理与方法、酶的剂型与保护剂开发等内容。为改善以往教学中知识点零散、学生对酶纯化过程整体性认知不足等问题,可引入国家科技进步奖二等奖成果“棉织物染整前处理关键酶制剂发酵生产和应用”,通过介绍纺织用耐热角质酶纯化与蛋白及基因序列鉴定工作^[14],增强学生对酶纯化典型过程和关键技术的掌握,以及对酶在传统行业和绿色发展中重要作用的认知。

第 5 章“酶的化学修饰与蛋白质工程”中“酶的定向进化”是重要内容之一。采用从研究意义、原理、方法“自上而下”逐步展开的常规授课模式时,学生往往对“酶的定向进化——试管里演示达尔文进化论”理解困难,因而在教学中引入 2018 年诺贝尔化学奖得主在这一领域的重要贡献,介绍相关研究思路设计、技术原理与关键,并在此基础上引发学生对“开展酶定向进化研究的基础、原理、目的和意义”“高通量筛选与酶定向进化研究的关联”等问题

的思考与讨论,增强学生对知识的理解,为未来开展此类研究提供重要的可实践性的参考,并激励学生突破思维定式、潜心研究的科研精神。

第 6 章“非水相酶催化”,主要包括非水相酶催化研究概况、反应介质与体系、应用等内容。在“非水相酶催化研究概况”中,介绍美国科学院院士研究在改变酶只有在水环境中才能发挥催化功能的传统观念、发展酶学理论体系、拓展酶的应用领域的重要价值,借此鼓励学生在科研和工作中发扬求是创新的精神,敢于发现问题和提出不同观点,并能够科学地探究问题,从而取得颠覆性成果。在“非水相酶催化应用”部分,增加非水相中脂肪酶催化制备生物柴油内容比重,引导学生了解酶工程技术在绿色能源领域的重要价值,思考生物柴油开发和替代的意义、机遇与挑战,增强对国家绿色发展、可持续发展的认知。

第 7 章“酶的固定化”主要介绍固定化材料、技术及应用,第 8 章“酶反应器”主要介绍酶反应器类型、应用及生物传感器。在这两章的教学过程中,可以将葡萄糖生物传感器的实例贯穿 2 个章节,通过葡萄糖氧化酶催化机制、固定化材料与方法、传感器设计及工作原理等引入,使学生对酶固定化及酶传感器中相对零散的知识概念形成较好的整体性认知;并且可将实验室中用于葡萄糖含量测定的生物传感分析仪带入课堂,通过仪器使用方法、组成构件、工作原理等的讲解与操作实践,增强课堂的互动性、调动学生的学习热情,提升课堂效果。

3 教学模式

酶工程是一门紧贴生命科学前沿与生产应用的学科,要求从事酶工程相关领域的专业人才不仅要具备扎实的理论知识与技术技能,还要具备多渠道自主学习能力、综合分析问题与方案设计能力、团队意识与沟通表达能力,并对酶工程技术发展现状、基础与应用研

究的前沿动向、从事研发及生产的代表性团队与企业等有所认知。因此,本课程教学在强化知识有效传递的基础上,还引入多元化教学模式,以提升课堂效果、拓宽学生视野、强化学生能力培养。

翻转课堂不同于教师课堂上传授知识、学生课后复习巩固的传统教学模式,而是引导学生在课前开展自习、并在课堂上强调师生互动,从而加强学生对知识点的理解并培养自主学习的能力。比如,“酶的应用”是酶工程课程的最后一个章节,主要是介绍酶在食品、饲料、医药、环保、农业、轻化工、生物技术研究工具等领域中的代表性产品及应用,并分析展望酶工程的发展趋势。传统教学模式是逐一介绍酶的应用,往往内容枯燥乏味、学生专注度下降、能力培养功能不足;借鉴翻转课堂模式,引导学生以小组为单位选择感兴趣的酶工程应用领域,自主搜集相关资料、提炼关键信息,将酶的应用产品、功能、原理、特点、国内外代表性研究单位与生产企业等内容进行整理,并在此基础上形成对酶工程产品、技术、应用等发展趋势的展望与思考,进而在课堂上进行展示和交流,可以很好改善这些问题。

项目和问题导向的学习(problem oriented and project based learning, POPBL)模式不同于以教师为主体、以知识传递为主要功能的传统课堂教学,该模式通过问题引导与项目设计将课堂教学与工程项目问题有机地结合起来,强调学生的中心地位,并以知识挖掘和分析为目标^[6]。在酶工程本科教学中,引导学生以小组的形式针对选定课题,开展课题背景意义、研究路线、关键技术资料的搜集整理工作,进而形成“开题报告”,以提高学生对复杂技术原理与流程形成系统性认知,并培养学生的自主学习、撰写与表达等能力。例如,自然筛选和基因工程构建是产酶菌株获取的重要方式,但考虑到相关内容与微生物、发酵工程、基因工程课程存在交叉重复,所以在课堂教学中弱化处

理,通过开展“纤维素酶/淀粉酶/蛋白酶生产菌株的筛选”“氨基酸衍生物/稀有糖酶法合成”课题设计,巩固学生对相关研究流程和思路、技术关键、技术体系的认知,为开展此类酶工程项目研发奠定基础。

线上线下混合教学模式是通过课堂教学与线上学习资源、智慧教学工具进行有机结合,引导学生巩固课堂教学知识点、开展自主学习、拓展学生知识面。“雨课堂”是一款支持多种教学模式和互动方式的在线教学平台,课堂上利用该软件设置答题环节,以提高学生的课堂参与度和帮助教师了解评估学生对知识的掌握情况;课后利用雨课堂平台推送习题,引导学生阅读课本,巩固知识点和明确学习重点。“中国大学MOOC”平台上有大量精品开放课程资源,针对酶工程课堂教学中采取跳过或者弱化处理的一些内容,如质粒元件组成、微生物筛选和培养、动植物细胞培养、酶促反应动力学等,可结合课堂教学进度精选 MOOC 课程资源,并通过“雨课堂”发布小测试,引导和督促学生自主学习。此外,针对课堂教学中提及的数据库、软件、论文和人物等,利用微信群推送相关数据库及软件使用方法、代表性论文原文、人物故事和热点事件网页等,以帮助学生开阔视野、提高学习兴趣、启迪思考感悟等。

4 考核模式

考核作为评价学生知识掌握情况的重要依据,涵盖了激发学生学习动力、引导学生学习方向、测试学生对知识的掌握程度、评价学生综合能力和素质等功能。在开展教学改革前,酶工程课程考核采用“70%期末考试+30%平时成绩”的传统模式,其中平时成绩由考勤和平时作业组成。由于在实施中期末考试和平时作业中基础知识占比偏高,使得学生成绩分布区段集中,并且收到课程内容和形式枯燥乏味、学习过程中挑战感不足等反馈。因此,为了引导和强化学生分析问题、

解决问题的能力, 调动学生学习积极性, 培养学生自主学习的意识与习惯, 以及基于酶工程课程教学内容与教学模式优化改革综合评价的教学效果, 设计了“期末考试+主题演讲+课题设计+课后习题”的多元化考核模式(表 2)。

期末考试部分权重为 50%, 旨在全面考查学生的专业知识掌握情况和综合分析问题、解决问题的能力。其中, 基础知识部分用以考查学生对酶工程的专业术语、基本原理、关键技术、方法流程等的掌握和理解情况, 相关题目以填空和简答形式呈现, 卷面分数占比为 40%左右; 综合能力部分旨在考查学生综合运用酶工程技术、方法与原理分析问题、解决问题的能力, 相关题目以情景分析题目形式呈现, 卷

面分数占比为 60%左右。

主题演讲部分权重为 10%, 旨在评价学生资料搜集与整理能力沟通能力、协作及创新意识等。主要根据各小组在“翻转课堂”环节的表现综合打分评价, 其中 PPT 制作水准部分占比 40%, 主要基于 PPT 内容(广度、深度和先进性), 逻辑(结构清晰度和条理性)、呈现效果(图文并茂、设计精美程度)综合评价; 演讲及答辩占比 40%, 主要基于口头表达效果(演讲流畅度、内容丰满程度)、精神面貌(自信、声音洪亮)、问题回答情况(能否正确回答或给予合理预测)评价; 组织分工情况占比 20%, 主要基于小组分工和组内互评打分, 用于评价学生团队协作、团队沟通意识。

表 2 酶工程课程考核方式改革

Table 2 Reform of the evaluation method of Enzyme Engineering

考核项目与权重 Assessment items and weights	考核目的 Assessment purposes	评价内容与权重 Evaluation contents and weights	评价方式 Evaluation methods
期末考试(50%) Final exam (50%)	知识基础 Knowledge base	填空与简答题(40%) Fill-in-the-blank and short-answer questions (40%)	试卷评分 Exam scores
主题演讲(10%) Presentation (10%)	问题分析能力 Problem analysis skills	综合题(60%) Comprehensive questions (60%)	试卷评分 Exam scores
	资料搜集与整理能力, 创新意识 Message collection and organize skills, and sense of innovation	PPT 制作水准(40%) PPT creation levels (40%)	教师打分 Teacher evaluation
	表达与沟通能力 Oral expression	演讲与答辩(40%) Presentation and question answering (40%)	教师打分 Teacher evaluation
	团队意识 Team awareness	分工与协调(20%) Division and coordination of duties (20%)	组内互评 Student evaluation
课题设计(30%) Project design (30%)	文献阅读与问题分析能力 Literature reading and problem analysis skills	背景意义部分(40%) Background and significant (40%)	教师打分 Teacher evaluation
课后习题(10%) After-class exercises (10%)	研究与解决方案设计能力, 创新意识 Research and solutions design abilities, and sense of innovation	方案设计(40%) Scheme design (40%)	教师打分 Teacher evaluation
	科技报告写作能力 Scientific report writing skills	报告格式与语言(20%) Format and language of report (20%)	教师打分 Teacher evaluation
	学习的积极性 Motivation to learn	作业提交情况(50%) Exercise submissions (50%)	作业评分 Exercise scores
	知识基础 Knowledge base	作业答题情况(50%) Answers to the questions (50%)	作业评分 Exercise scores

课题设计部分总权重为 30%，旨在评价学生专业文献阅读及撰写、问题分析及方案设计等能力。主要根据各小组“POPBL 模式”环节中的课题报告完成情况打分评价，其中课题背景意义部分占比 40%，主要基于内容(广度、深度和先进性)及逻辑(结构清晰度和条理性)综合评价；方案设计部分占比 40%，主要基于研究路线设计和技术方案的科学性和创新意识，综合评价学生运用酶工程专业知识分析问题和解决问题的能力；报告撰写部分占比 20%，主要基于格式、专业术语运用、语句表达等综合评价。

课后习题部分总权重为 10%，主要根据学生在课后作业题及 MOOC 课程小测试综合打分，其中作业提交及完成情况分别各 50%，用以评价学生的线上线下的学习情况及学习的主观能动性和积极性。

5 教学反馈与效果

针对教学内容与其他课程存在较多交叉重复且前沿性和应用性不足、学生学习积极性调动不足等亟待解决与提升的问题，酶工程教学团队从 2022–2023 年春季学期开始开展了一系列教学改革与探索。得益于教学内容的优化调整 and 教学模式、考核模式的多元化设计，开展教学改革以来生物工程专业酶工程课程 2022–2023、2023–2024、2024–2025 学年春季学期的学生对课程评分分别达到了 94.19、95.69 和 97.75 分，与教学改革前(2021–2022 学年)相比分别提高了 3.05%、4.69%和 6.95% (图 2A)。学生对课程目标清晰度、课程内容前沿性、课程内容挑战度、课程资源、学习热情激发、知识掌握、能力提升、素养提升等方面给予高分(图 2B)。学生评价“老师很负责很细心，课上的讲解能够让学生专心地听课，及时地查漏补缺。老师的答疑解惑也特别清楚，逻辑清晰，让人真的喜欢这门课程，能感受到一章一章之间的关联，循序渐进”“老师教学认真，课堂效率高，授课资料详细，我们学生大

部分都能跟着老师思路学习，气氛活跃，整节课学下来有收获欣喜，使人对此门课程兴趣浓厚。教学资料丰富有效，教学过程中尊重学生，有时还有些洋幽默，很受学生欢迎”“讲课耐心详细，课程安排设计合理”。此外，在与学生的跟踪与交流中，显示本课程改革的实施有助于提高学生参与大学生创新创业项目、全国大学生生命科学竞赛等的积极性，并对学生在开展创新创业项目及毕业设计中专业文献阅读、实验方案设计、报告撰写等能力水平的提升均有帮助；其中本教学团队指导下的大学生创新团队在 2023 年和 2024 年分别获得了全国大学生生命科学竞赛国家一等奖及三等奖。

由于考核环节中弱化基础知识记背的比重，更强调对学生综合素质和运用知识分析问题、解决问题能力的考察，因而考核难度相较于改革前有所增加，生物工程专业酶工程课程 2022–2023、2023–2024、2024–2025 学年春季学期的学生平均成绩较改革前有所下降，同时成绩区间适当拉开。近 2 学年的学生总评成绩均集中在 80–89 分数段，2022–2023、2023–2024 和 2024–2025 学年全班学生的平均分数分别为 83.4、81.5 和 81.83 分，得分在 80 分以上学生比例分别为 74.46%、80.76%和 65.71%，说明大部分学生达成了既定教学目标，而且随着教学实践过程不断地调整与优化，学生的学习效果也得到了进一步加强(图 2C)。

6 总结

生物经济是推动我国高质量发展的强劲动力，生物经济发展离不开生物工程等专业人才，生物工程专业人才未来大有可为。酶工程作为生物经济的重要产业领域，其未来发展充满着机遇与挑战，因此在生物经济的时代背景下，开展酶工程课程本科教学改革是应时之举。通过近 2 年课程教学目标、教学内容、教学模式和考核方式的优化改革，不仅夯实了学生理论知识、拓宽了学生视野、提升了学生对酶工程

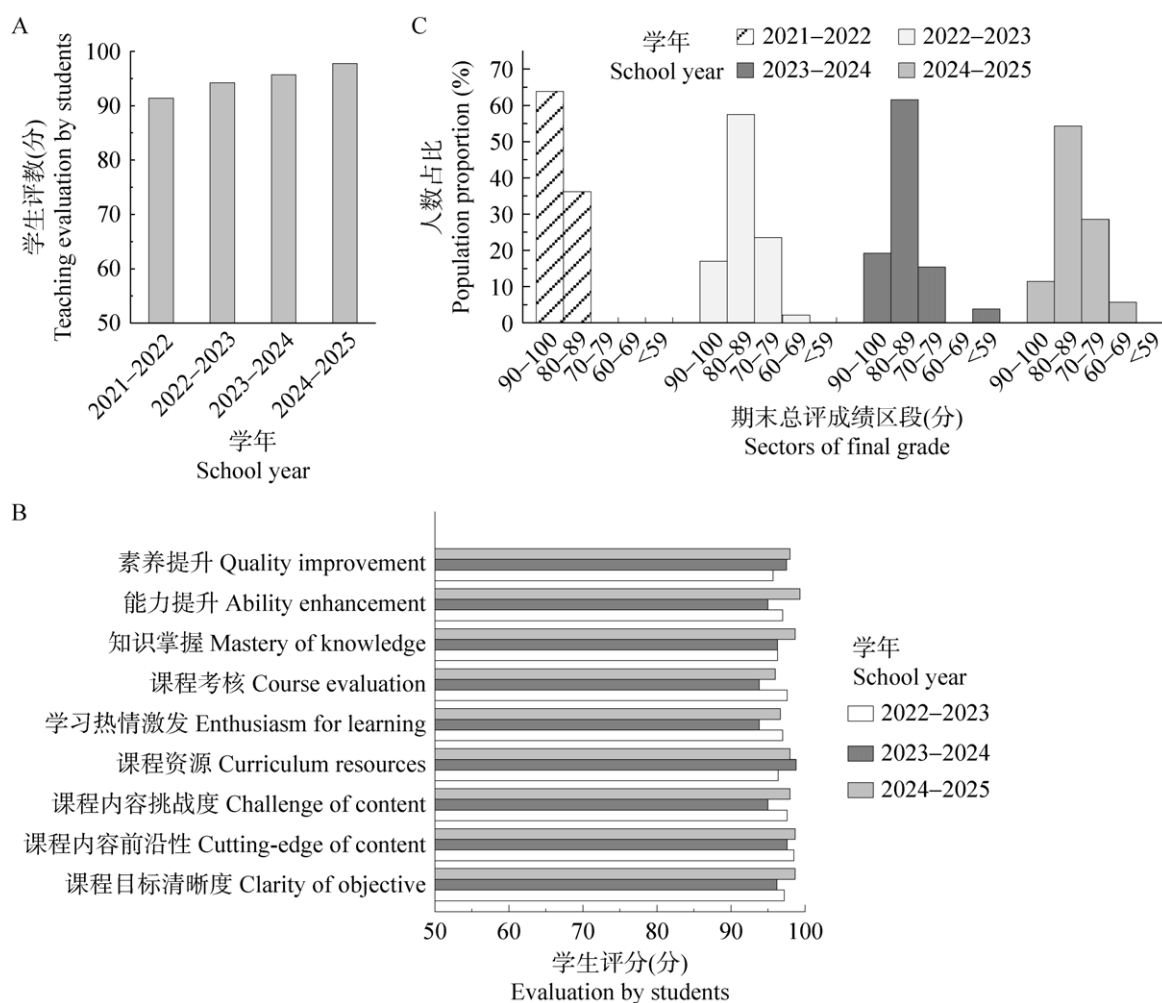


图2 酶工程课程教学改革效果评价 A: 课程的学生评教分数; B: 课程指标点的学生评分; C: 学生期末总分成绩分布。

Figure 2 Evaluation of the teaching reform of Enzyme Engineering. A: Teaching evaluation of Enzyme Engineering scored by students; B: Evaluation of indicator points by students; C: Distribution of student's final grades.

行业发展的认知,而且激发了生物工程专业学生专业认同感和发展生物经济报效国家的使命感,强化了学生的酶工程科学思维方式和求是创新的科研精神,锻炼了自主学习、分析问题、解决问题、表达及沟通等能力。同时,教学团队也认识到课程教学改革工作任重道远,具有长期性和系统性,需要在教学实践秉承与时俱进、立德树人的理念,通过不断总结、调整与优化提升教学水平和质量,为生物经济人才培养和生物经济发展壮大贡献力量。

作者贡献声明

赵安琪:论文文稿撰写;伊娟娟:数据分析、资料分析与汇总、论文修改;吕永坤:论文图片设计与绘制;王志:论文表格设计与绘制;张一折:执行调研与论文修改;许敬亮:论文概念提出、框架设计与撰写指导。

作者利益冲突公开声明

作者声明绝无任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

REFERENCES

- [1] 徐涛. 强化国家战略科技力量在生物经济高质量发展中的骨干引领作用[J]. 中国生物工程杂志, 2022, 42(5): 1-3.
XU T. Strengthening the backbone leading role of national strategic scientific and technological forces in the high-quality development of the bioeconomy[J]. China Biotechnology, 2022, 42(5): 1-3 (in Chinese).
- [2] 吴晓燕, 陈方, 丁陈君, 郑颖, 宋琪. 全球生物制造产业市场与融资现状分析[J]. 中国生物工程杂志, 2020, 40(5): 117-124.
WU XY, CHEN F, DING CJ, ZHENG Y, SONG Q. Analysis of the global biomanufacturing industry market and financing status[J]. China Biotechnology, 2020, 40(5): 117-124 (in Chinese).
- [3] “十四五”生物经济发展规划[EB/OL]. 2022-05-10. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/10/content_5689556.htm
The 14th Five-Year Plan for bioeconomic development[EB/OL]. 2022-05-10. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/10/content_5689556.htm (in Chinese).
- [4] 金城. 微生物酶工程: 绿色生物制造的基石[J]. 微生物学通报, 2020, 47(7): 2001-2002.
JIN C. Microbial Enzyme Engineering: cornerstone of biological manufacturing[J]. Microbiology China, 2020, 47(7): 2001-2002 (in Chinese).
- [5] 赵安琪, 吕永坤, 王志, 刘金乐, 熊文龙, 阿拉牧, 伊娟娟, 许敬亮. 绿色生物制造背景下《酶工程》教学的探索与思考[J]. 广东化工, 2021, 48(24): 224-225.
ZHAO AQ, LV YK, WANG Z, LIU JL, XIONG WL, Mohammad Asraful Alam; YI JJ, XU JL. Exploration and thinking on the enzyme engineering course under the background of green bio-manufacturing[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(24): 224-225 (in Chinese).
- [6] 陈启佳, 李雪梅, 赵丹丹, 宁亚维, 郝建雄. 基于学科前沿案例的“食品酶学和酶工程”教学改革与实践[J]. 生物工程学报, 2023, 39(8): 3530-3539.
CHEN QJ, LI XM, ZHAO DD, NING YW, HAO JX. Teaching reform and practice of “Food Enzymology and Enzyme Engineering” based on cutting-edge researches[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(8): 3530-3539 (in Chinese).
- [7] CAI T, SUN HB, QIAO J, ZHU LL, ZHANG F, ZHANG J, TANG ZJ, WEI XL, YANG JG, YUAN QQ, WANG WY, YANG X, CHU HY, WANG Q, YOU C, MA HW, SUN YX, LI Y, LI C, JIANG HF, WANG QH, MA YH. Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide[J]. Science, 2021, 373(6562): 1523-1527.
- [8] MUTTI FG, KNAUS T, SCRUTTON NS, BREUER M, TURNER NJ. Conversion of alcohols to enantiopure amines through dual-enzyme hydrogen-borrowing cascades[J]. Science, 2015, 349(6255): 1525-1529.
- [9] CHEN FF, LIU YY, ZHENG GW, XU JH. Asymmetric amination of secondary alcohols by using a redox-neutral two-enzyme cascade[J]. ChemCatChem, 2015, 7(23): 3838-3841.
- [10] GLASNER ME. Finding enzymes in the gut metagenome[J]. Science, 2017, 355(6325): 577-578.
- [11] LEVIN BJ, HUANG YY, PECK SC, WEI Y, CAMPO AM, MARKS JA, FRANZOSA EA, HUTTENHOWER C, BALKSUS EP. A prominent glycol radical enzyme in human gut microbiomes metabolizes *trans*-4-hydroxy-L-proline[J]. Science, 2017, 355(6325): eaai8386.
- [12] 胡熔, 刘大岭, 谢春芳, 姚冬生. 黄曲霉毒素解毒酶在大肠杆菌中的可溶性表达、纯化及其圆二色谱分析[J]. 中国生物工程杂志, 2011, 31(4): 71-76.
HU R, LIU DL, XIE CF, YAO DS. Soluble expression, purification of recombinant aflatoxin-detoxifzyme in *E.coli* and analysis of circular dichroism spectrum[J]. China Biotechnology, 2011, 31(4): 71-76 (in Chinese).
- [13] 左振宇, 刘大岭, 胡亚冬, 胡熔, 姚冬生. 密码子优化的重组黄曲霉毒素解毒酶(rADTZ)在毕氏酵母中组成型分泌表达的研究[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(5): 87-94.
ZUO ZY, LIU DL, HU YD, HU R, YAO DS. Studies on constitutive and secretive expression of Codon-optimized recombinant aflatoxin-detoxifzyme (rADTZ) in *Pichia pastoris*[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2007, 9(5): 87-94 (in Chinese).
- [14] CHEN S, TONG X, WOODARD RW, DU GC, WU J, CHEN J. Identification and characterization of bacterial cutinase[J]. Journal of Biological Chemistry, 2008, 283(38): 25854-25862.
- [15] 孙万儒. 我国酶与酶工程及其相关产业发展的回顾[J]. 微生物学通报, 2014, 41(3): 466-475.
SUN WR. Review the development history of enzyme and enzyme technology as well as related industrials in China[J]. Microbiology China, 2014, 41(3): 466-475 (in Chinese).
- [16] HECKMANN CM, PARADISI F. Looking back: a short history of the discovery of enzymes and how they became powerful chemical tools[J]. ChemCatChem, 2020, 12(24): 6082-6102.