

· 高校生物学教学 ·

基于学科前沿案例的“食品酶学和酶工程”教学改革与实践

陈启佳^{1,2*}, 李雪梅¹, 赵丹丹¹, 宁亚维¹, 郝建雄^{1,2*}

1 河北科技大学食品与生物学院, 河北 石家庄 050018

2 河北省功能食品技术创新中心, 河北 石家庄 050018

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 Qijia, LI Xuemei, ZHAO Dandan, NING Yawei, HAO Jianxiong. 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.

摘要: 食品酶学与酶工程是食品类专业的一门重要专业课程, 内容涵盖酶学基础理论、酶工程技术以及酶在食品工业中的应用。针对当前教学内容与学科前沿存在知识差距, 本课程精心挖掘学科前沿案例, 不断调整优化课程内容, 让学生所学能够与时俱进。以学科前沿案例的主题讨论为切入点, 探索了成果导向教学(outcome-based education, OBE)理念下的问题导向学习(problem-based learning, PBL)教学模式, 强化师生互动和生生互动, 提高学生的积极性和参与度。构建多元化考核方式, 侧重评价学生的学习过程中的表现。课程教学改革实现夯实基础知识和拓展学科前沿的双管齐下, 培养了学生分析问题、设计解决方案、团队协作等方面能力, 可为食品酶学与酶工程及相关课程的教学改革提供启发与思考。

关键词: 食品酶学与酶工程; 教学改革; 学科前沿案例; 成果导向教学; 问题导向学习

资助项目: 国家自然科学基金(22001056); 河北省自然科学基金(B2020208050); 河北省高等教育教学改革研究与实践项目(2021GJJG186)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (22001056), the Natural Science Foundation of Hebei Province (B2020208050), and the Higher Education Teaching Reform Research and Practice Project of Hebei Province (2021GJJG186).

*Corresponding authors. E-mail: CHEN Qijia, qijia1126@hotmail.com; HAO Jianxiong, cauhjx@163.com

Received: 2023-01-15; Accepted: 2023-06-06

Teaching reform and practice of “food enzymology and enzyme engineering” based on cutting-edge researches

CHEN Qijia^{1,2*}, LI Xuemei¹, ZHAO Dandan¹, NING Yawei¹, HAO Jianxiong^{1,2*}

1 College of Food and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China

2 Functional Food Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050018, Hebei, China

Abstract: Food enzymology and enzyme engineering is an important professional course of food science. The course includes the basic theory of enzymology, enzyme engineering technology and the application of enzymes in food industry. Considering the knowledge gap between the teaching contents and the cutting-edge researches, the team constantly adjusted and optimized the course contents to enable students to keep up with state-of-the-art progress by carefully mining the cutting-edge researches. Taking cutting-edge researches as the breakthrough point, we explored the problem-based learning (PBL) teaching model under the guidance of outcome-based education (OBE) concept, and highlighted the importance of the teacher-student and student-student interactions to improve students' enthusiasm and participation. A diversified assessment system was established to evaluate the performance of students in the learning process. The teaching reform consolidated the basic knowledge and expanded the academic frontiers, and fostered students' ability in analyzing problems, designing solutions and achieving team communication. The course may give new insights into the teaching reform of food enzymology and enzyme engineering and other related courses.

Keywords: food enzymology and enzyme engineering; teaching reform; academic frontiers; outcome-based education; problem-based learning

酶学(enzymology)旨在研究酶的理化特性、结构与功能、催化性质与机理,酶学与工程学相结合发展形成酶工程(enzyme engineering),后者是借助工程手段对特定反应器中具有催化功能的酶、细胞或细胞器等进行修饰、改造以达到生产特定目标产物而发展起来的一个新的学科领域。食品酶学和酶工程聚焦食品酶的基础研究和工业应用,是酶学基本理论在食品工业中的应用学科。

以酶学和酶工程为核心的生物催化先后经历3次发展浪潮^[1],随着定向进化、计算机辅助模拟、高通量筛选、基因合成与基因编辑等新兴技术在酶学和酶工程领域的融合发展,在

新颖酶基因挖掘、结构与功能解析、新酶设计、分子改造和复杂酶催化体系构建等方面实现了前所未有的突破。受限于教材编撰速度,学科前沿动态难以及时呈现在课程教学内容中,导致学生所学内容与学科前沿存在知识差距。针对上述问题,笔者所在的教学团队积极开展教学改革,挖掘学科前沿案例,将其与课程经典内容有机融合,探索在成果导向教学(outcome-based education, OBE)理念下的问题导向学习(problem-based learning, PBL)教学模式,强化师生与生生互动,旨在夯实学生基础知识和拓展学科前沿视野,培养学生的创新能力和科研素养,致力于为食品酶学和酶工程领域培养创新型人才。

1 “食品酶学和酶工程”课程现状

食品酶学课程最早由都柏林大学 J. Whitaker 教授开设, 1984 年国内高校首次开设该课程, 目前已有 300 余所高校开设相关课程。河北科技大学的“食品酶学和酶工程”设立将近 30 年, 对国家级一流本科专业建设点“食品科学与工程”专业起到有力支撑。本课程包括酶学基础理论与酶工程技术、食品酶及其在食品工业中应用两大方面, 内容涉及食品酶资源的挖掘、功能筛选和分子改造, 酶的高效表达, 酶催化反应过程的优化与控制等方面。基于此, 课程目标设定为: 让学生扎实掌握酶学基础概念和理论, 掌握酶的基因挖掘、分子改造、纯化制备、固定化和催化反应工程等技术及其在食品工业中的应用, 能运用基本原理与技术方法来完成工艺开发, 培养学生解决复杂工程问题的能力。近年来课程教学经过一系列改革探索, 仍面临部分困难和挑战。

首先, 新方法和新技术层出不穷, 而教科书的更新相对滞后, 教学内容不能有效呈现学科前沿动态, 难以给学生提供创新设计、自主探索和团队协作等空间, 不利于培养学生的创新思维、分析和解决问题等能力。

其次, 现有教学手段不够丰富, 不利于学生参与到教学中。学科前沿案例的融入, 不是教学资料的简单堆叠, 而是通过教学内容的拓展提升, 着重培养学生的科学视野以及利用先进技术手段解决复杂工程问题的能力, 着力打通从专业与行业的“最后一公里”。传统的灌输式教学难以调动学生的积极性和参与度, 导致学生仅是识记知识内容, 缺少独立自主思考和创新设计, 尚未到达有效锻炼综合素质的目的。

最后, 考核方式尚未充分体现学生在学习过程中的表现, 不利于调动学生的积极性。学

科前沿案例的融入以案例讲解与主题讨论的方式呈现, 涉及多个环节, 包括文献资料的调研与整理、问题分析与解决方式设计、团队协作和沟通交流等方面, 因此考核方式应涵盖上述环节, 注重过程性评价和结果评价相结合。

2 教学内容的设计与更新

2.1 课程内容设置

为了突出“食品酶学与酶工程”课程中的高阶性、创新性和挑战度, 以“重视基础知识, 紧跟学科前沿”的教学理念, 更新优化教学案例, 重塑教学内容体系。国内出版的“酶学”或“酶工程”类教材较多, 参考兄弟院校的教材版本, 并调研 2010–2020 年出版的近 20 种教材。通过章节内容的比较分析发现, 何国庆等主编的《食品酶学》(化学工业出版社, 2016 年)更加侧重食品酶制剂以及酶在食品工业中的应用; 江正强等主编的《食品酶学与酶工程原理》(中国轻工业出版社, 2018 年)系统性地阐述了酶学和酶工程的基础理论和先进技术, 紧密结合了基础研究和应用研究。两本教材互补性较强, 结合本校实际授课情况, 本课程选用上述两本教材作为主要参考教材。同时, 也选取 Mohammed Kuddus 主编的 *Enzymes in Food Technology, Improvement and Innovations* (Springer, 2018 年) 和 *Enzymes in Food Biotechnology: Production, Applications, and Future Prospects* (Academic Press, 2018 年) 两本英文出版物作为拓展内容。

结合参考教材的部分章节, 糅合构建课程教学内容体系。将教学内容梳理为 4 个模块, 分别为: “酶学基础”模块, 包括酶学与酶工程简史、分类和命名、结构和功能、催化反应机制和催化反应动力学等; “酶的制备”模块, 包括食品酶资源的挖掘、产酶微生物底盘细胞、

重组表达、发酵调控、分离和纯化等；“酶的修饰和改造”模块，包括化学修饰、固定化酶和固定化细胞、定向进化、半理性设计和理性设计等；“酶在食品工业中的应用”模块，包括酶在食品配料与添加剂、制糖工业、焙烤食品、果蔬制品、动物性制品、功能食品等的应用。经过4轮教学实践，不断调整和优化课程内容，形成当前教学内容体系。

2.2 基于课程内容的学科前沿案例挖掘

高质量教材的编撰需要时间的积累，编撰速度难以呈现当前学科前沿，为了弥补教材在时效性方面的欠缺，选取在 *Nature*、*Science*、*Chemical Reviews*、*Nature Nanotechnology*、*Nature Chemical Biology*、*Nature Communications*、*Journal of the American Chemical Society*、*Angewandte Chemie International Edition*、*Biotechnology Advances* 和 *ACS Catalysis* 等高水平期刊中发表的研究论文，挖掘学科前沿案例，引导学生了解学科前沿动态和先进科学技术(表1)。选取的案例兼具理论研究意义和工业应用前景，对教学内容进行补充和拓展，通过授课教师的有效引导，可激发学生学习兴趣，调动学生的积极性和主动性。

第一章侧重介绍2018年诺贝尔化学奖得主 Frances H. Arnold 教授开发的酶定向进化技术，该项技术可显著改善酶在催化效率、底物特异性、立体/区域选择性和底物耐受性等，实现在实验室短时间内模拟自然界中成千上万年的进化历程^[2]。阎锡蕴教授首次报道新一代人工模拟酶——纳米酶，能在温和条件下高效催化反应，展现出类似天然酶的催化效率，即使在强酸/强碱或较大温度范围仍能保持较高活性^[3]。基于纳米酶开发的传感器，可用于食品中农药和兽药残留、真菌毒素、食源性病原体和违禁添加物等检测^[22]。在课程中融入上述

研究案例，与学生共同探讨交流酶学与酶工程领域的先进技术和方法，激发学生产生浓厚的科研兴趣。

第三章引入计算机辅助设计的新颖酶基因挖掘方法，针对特定分子底物，采用基于结构指导的分子对接和计算分析，缩小候选序列的筛选范围，减少酶基因序列选择的盲目性^[7]。利用合成生物学工程化的策略，将数据库中的蛋白序列行聚类分析和优先化排序，提高功能筛选成功率，达到用最少实验资源来进行实验表征的目的^[8]。讲述案例的同时，也介绍了相关的酶资源数据库，如 NCBI (www.ncbi.nlm.nih.gov)、BREBDA (www.brenda-enzymes.org)、KEGG (www.genome.jp/kegg)、RCSB-PDB (www.rcsb.org)和 AlphaFold PSD (www.alphafold.ebi.ac.uk)等。前沿创新技术颠覆传统的酶基因发现方式，显著加速食品酶资源的挖掘，让学生耳目一新，提高了学生学习的积极性和参与度。

第四章介绍 CRISPR-Cas9 基因编辑技术和合成生物学“设计-构建-测试-学习”策略及其在食品酶表达宿主中的开发应用，讲述了通常认为是安全的(generally regarded as safe, GRAS)谷氨酸棒状杆菌(*Corynebacterium glutamicum*)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)和酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)等食品酶表达宿主的优化改造^[8-9]。这些技术使食品酶表达体系与重构宿主的适配性持续提升，不断突破酶的表达效率，实现多种食品配料与添加剂的生物制造，让学生了解食品工业领域的“食品智造”。

第六章介绍 Manfred T. Reetz 教授开发的半理性设计方法——活性位点组合饱和突变(combinatorial active-site saturation test, CAST)和迭代饱和突变(iterative saturation mutagenesis, ISM)，通过组合突变和迭代突变位于底物结合区域附近且影响酶活性和选择性的氨基酸位点，

表 1 课程内容设计

Table 1 The design of teaching content

章节名称 Chapters	核心授课内容 Contents	学科前沿和热点案例 Academic frontiers and hot cases
第一章 酶学与酶工程简史 Chapter 1. A brief history of enzymology and enzyme engineering	基本概念、主要研究内容和发展历程 The basic concept, main contents and short history of enzymology and enzyme engineering	酶的定向进化技术 ^[2] ; 纳米酶 ^[3] Directed evolution technology ^[2] ; Nano-enzyme ^[3]
第二章 酶学基本原理 Chapter 2. Basic theory of enzymology	分类、命名、结构特点、作用机制、反应动力学和抑制作用 Classification, nomenclature, structural characteristics, chemical mechanism, enzyme reaction kinetics and inhibition	第 7 类酶-易位酶 ^[4] ; 机器学习助力构建酶动力学模型 ^[5] Class VII translocase ^[4] ; Enzyme dynamics model constructed by machine learning ^[5]
第三章 食品酶资源的挖掘 Chapter 3. Exploitation of food enzyme resources	食品酶的筛选和基因挖掘方式以及相关数据库 Screening and gene mining method of food enzyme, and related databases	计算机辅助设计酶基因挖掘 ^[6] ; 基于合成生物学策略的基因挖掘 ^[7] Gene mining via computer aided design ^[6] or synthetic biology ^[7]
第四章 酶的生物合成与发酵生产 Chapter 4. Biosynthesis and fermentation production of enzymes	酶合成调控机制; 天然微生物和基因工程菌产酶; 发酵过程优化与控制 Mechanism for regulating enzyme synthesis; enzyme produced by natural and genetically engineered microorganisms; Optimization and control of fermentation processes	基因编辑技术和合成生物学在食品酶表达宿主中的开发和应用 ^[8-9] Development and application of gene editing technology and synthetic biotechnology in hosts expressing food enzymes ^[8-9]
第五章 酶的分离和纯化 Chapter 5. Separation and purification of enzyme	酶液的粗分离; 分离和纯化方法 Primary separation of enzyme solution; Separation and purification method	磁性亲和分离 ^[10] ; 新型标签蛋白纯化 ^[11] Magnetic affinity separation ^[10] ; Novel-tagged protein purification ^[11]
第六章 酶的化学修饰和分子改造 Chapter 6. Chemical modification and enzyme engineering	化学修饰; 亲和标记修饰; 定向进化; 半理性设计和理性设计 Chemical modification; Affinity labeling modification; Directed evolution; Semi-rational design and rational design	活性位点组合饱和突变 ^[12-13] ; 蛋白质从头设计 ^[14] Combinatorial active-site saturation test ^[12-13] ; De novo protein design ^[14]
第七章 固定化酶与固定化细胞 Chapter 7. Immobilized enzyme and immobilized cell	酶和细胞的固定化技术; 固定化酶和细胞的性质与表征 Immobilization of enzymes and cells; Properties and characterization of immobilized enzymes and cells	酶-无机杂化固定化酶 ^[15] ; 金属-有机框架材料固定化酶 ^[16] Enzyme-inorganic hybrid immobilized enzyme ^[15] ; Metal-organic frameworks immobilized enzyme ^[16]
第八章 食品工业常用酶制剂 Chapter 8. Enzymes in food industry	糖酶、蛋白酶、酯酶、多酚氧化酶、过氧化物酶和脂肪氧合酶 Carbohydrase, protease, polyphenol oxidase, peroxidase and lipoxigenase	多酚氧化酶的酶促褐变机制 ^[17] ; 脂氧合酶作用机制 ^[18] Enzymatic browning mechanism of polyphenol oxidase ^[17] ; Mechanism of lipoxigenase ^[18]
第九章 酶在食品工业中的应用 Chapter 9. Application of enzymes in food industry	酶在食品工业中的应用领域及相应案例 Application fields and corresponding cases of enzymes in food industry	CO ₂ 到淀粉的人工酶法合成 ^[19] ; 未来食品 ^[20] ; 酶法合成稀少糖 ^[21] Artificial enzymatic synthesis of starch from CO ₂ ^[19] ; Future food ^[20] ; Enzymatic synthesis of rare sugars ^[21]

来提高酶的活性、选择性和热稳定性等^[12-13]。也讲解了基于 CAST 和 ISM 等方法分子改造木聚糖酶、米根霉脂肪酶、葡萄糖苷酶等案例,通过上述案例,使学生认识到分子改造“量身定制”提升酶催化性能不是遥不可及的,开发具有自主知识产权的食品酶,并应用于工业化生产中已成为重要发展趋势。

第九章引入热点案例——二氧化碳到淀粉的人工酶法全合成,从头设计 11 步酶-化学法反应路径,通过类似“搭积木”方式,催化二氧化碳合成 C1 化合物,之后再依次聚合成 C3 和 C6 化合物,进一步合成直链和支链淀粉^[19]。学生对人工合成淀粉充满好奇和兴趣,课堂在活跃氛围中将酶在传统食品工业中的应用拓展到科学前沿。

受学时所限,课堂上不能详细讲述每一个案例,将学科前沿案例所涉及的文献原文、新闻报道、微信公众号文章、科普视频等相关资料上传至相关学习平台,方便学生课后查阅学习。

2.3 学科前沿案例与经典课程内容的有机融合

学科前沿案例的呈现是以酶学基础理论作为铺垫,确保学生掌握一定专业知识的基础上,实现前沿动态的拓展延伸。章节设计和案例挖掘过程中,既要体现科学前沿,又要结合酶学基础理论,并且实现两者的有机融合。一方面,采用“基础知识+拓展延伸”的方式融合学科前沿案例。例如,新增国际生物化学与分子生物学联盟公布易位酶为第 7 大类酶,及时更新教学内容,做到与时俱进;传统亲和层析纯化基础上,拓展讲述新型标签蛋白纯化,达到举一反三、触类旁通的教学效果。另一方面,采用“基础知识+提升进阶”的方式融合学科前沿案例。例如,传统酶固定化方法基础上,新增

酶-无机杂化固定化酶和金属-有机框架材料固定化酶的讲授,紧跟科学前沿,实现教学内容与科研的同步接轨;果蔬加工和贮藏中酶促褐变控制基础上,将深度提升到多酚氧化酶的酶促褐变机制,让学生做到“知其然知其所以然”。

对于同一章中增加的多个学科前沿案例,尽量覆盖每一小节。如第六章,在定向进化一节中引入序列饱和突变技术,半理性设计一节中增加 CAST 和 ISM 技术,理性设计一节中介绍蛋白质从头设计技术,让学科前沿案例与经典课程内容的融合充分体现在各个章节设计和课堂教学中。另一方面,对于某些重要章节、理论或技术,会引入多个热点案例,这些案例并不是简单地堆砌,而是从不同的角度去介绍学科的前沿动态,如第五章和第七章分别介绍了不同的酶纯化方式和酶固定化方式。

3 教学模式的设计与实施

3.1 基于 OBE 理念的 PBL 教学模式的探索

教学团队探索了在 OBE 教学理念下的 PBL 教学模式,OBE 教学理念以学生为中心,强调以提升知识和能力等成果目标为导向,侧重成果目标的达成程度;PBL 教学模式强调以解决问题为主线的教学过程,两者可以很好地契合^[23-24]。教师通过启发式引导提升学生学习的积极性和参与度,学生运用多种方法和措施来解决核心问题,夯实经典课程内容与学科前沿案例的掌握程度,实现学生在基础知识、前沿视野、创新思维和解决复杂工程问题能力等方面的提升,从而提高食品类创新型人才的培养质量。

3.2 基于 OBE 理念的 PBL 教学模式的实施

根据培养目标和成果目标,教学团队首先确立教学目标,再根据教学目标设计学科前沿案例主题。教师通过能产生共鸣或认知冲突的

引导性问题，激发学生的学习兴趣，学生对提出的问题进行分析讨论，以解决问题为导向，团队协作查阅文献资料、整合资料、分析讨论、制定方案和展示汇报。主题讨论中，教师引导学生积极参与师生互动和生生互动，掌握学生对知识点的学习情况和学习进度，及时讲授学生的掌握欠佳的共性问题(图 1)。

以“酶在制糖工业中的应用”为例，采用经典课程内容的讲授和基于 PBL 教学模式的学科前沿案例主题讨论相结合的方式。教师首先讲解淀粉酶的性质与作用方式、葡萄糖和果葡糖浆等的酶法制备等经典课程内容。在此基础上，教师联系日常生活中常见的饮料，提出针对控制糖类摄入人群如何选择添加甜味剂？教师以酶促催化合成 D-阿洛酮糖为例进行讲解，同时启发学生思考如何提高 D-阿洛酮糖等稀少糖类化合物在生物合成过程中的选择性或转化率，进而引导展开“稀少糖的生物合成”主题讨论。学生以团队形式开展文献资料的调研与整理、问题分析与解决方案设计、PPT 制作和课堂汇报等工作。主题讨论环节，学生从新颖酶

基因的挖掘、酶的分子改造、酶催化反应条件优化和固定化等多个角度汇报相应的解决方案，教师和其他团队学生提出疑问，相互提问交流。在师生互动和生生互动过程中，教师可快速掌握学生暴露出的难点和共性问题，再次引导学生讨论上述糖类在结构上有哪些差异？酶促催化反应有何共性之处？酶法合成中如何克服同分异构化和差向异构化等化学平衡？最后由教师讲授 Izumori 稀少糖酶法转化策略^[21]，包括醛糖-酮糖异构化、酮糖 C-3 异构化和单糖氧化还原等，总结梳理本节课程的知识内容，并引申出相关的复杂工程问题，注重学生知识的内化和应用。

4 考核方式和教学效果

考核方式是检验学生学习效果的重要依据，不仅要重视学生对知识的掌握程度，也要体现学生在学习过程中的学习能力和综合素质，教学团队构建“期末考试+学科前沿案例主题讨论”的考核方式(表 2)。期末考试全面考查学生的基础知识、创新能力和解决复杂工程问

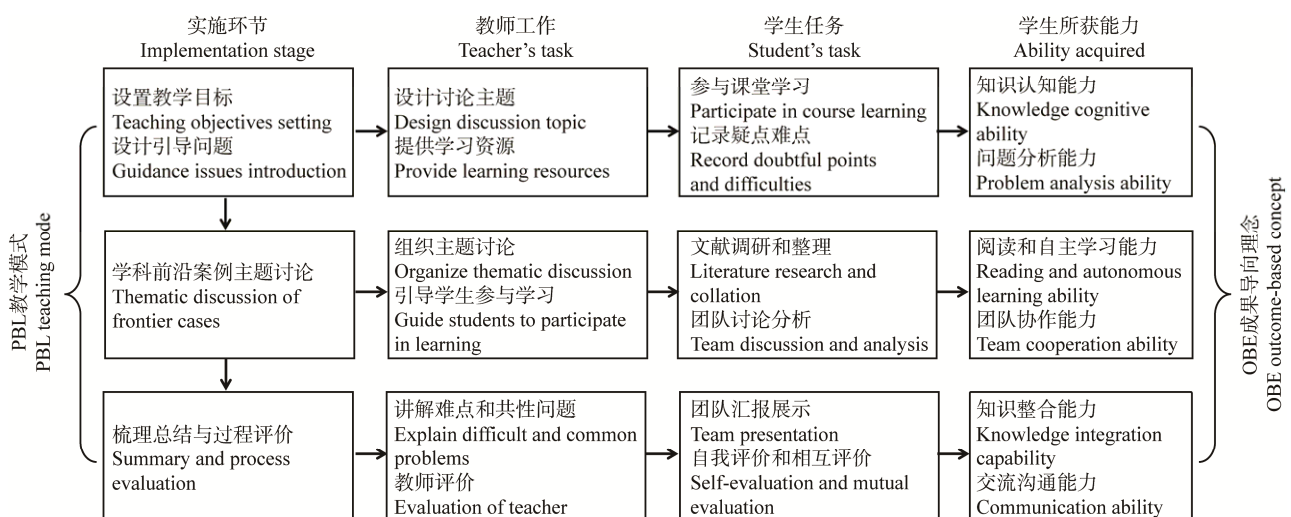


图 1 基于 OBE 理念的 PBL 教学模式

Figure 1 PBL teaching mode based on OBE concept.

表 2 课程评价方式改革

Table 2 Reform of the evaluation method

考核方式 Assessment methods	考核项目 Types	考核内容与成绩权重 Assessment content and assessment percentage (%)	评价方式 Evaluation methods
期末考试 Final examination	基础知识 Basic knowledge	酶学基础理论和酶工程技术(40%) Basic knowledge of enzymology and enzyme engineering technology (40%)	教师评价 Teacher evaluation
	创新能力 Innovation ability	学科前沿理论和技术及其在食品酶学中的应用(10%) Frontier theory and technology, and its application in food enzymology (10%)	教师评价 Teacher evaluation
	解决复杂工程问题的综合能力 Comprehensive ability to solve complex engineering problems	食品酶在食品工业中的高阶应用(10%) Advanced application of food enzymes in food industry (10%)	教师评价 Teacher evaluation
前沿案例主题 讨论 Thematic discussion of academic frontiers cases	课堂汇报 Classroom report	PPT 制作、课堂汇报和答辩效果(25%) Production of power point, classroom report and effect of class defense (25%)	教师评价 Teacher evaluation
	团队协作 Teamwork	文献调研与整理, 解决方案设计(10%) Literature research and collation, solution design (10%)	学生互评 Students' mutual evaluation
	个人参与 Individual participation	个人贡献程度(5%) Individual contribution (5%)	自我评价 Personal evaluation

题的综合能力, 侧重结果性评价。主题讨论则侧重评价学生在解决问题过程中的表现, 将其在总成绩的比例提升至 40%, 涵盖教师评价、学生互评和学生自评等 3 方面。学生团队以课堂汇报的方式呈现团队学习成果, 教师综合资料整理、课堂汇报、回答问题等几方面给出评价; 学生之间相互提问并给出评价; 同时, 团队内部就资料整理和课堂汇报中所作的贡献而相互评价。过程性评价着重学生学习过程中学习状态和阶段性学习成果, 能较好地地区分学生是真正参与到课堂学习中还是敷衍地参与, 将阶段性结果和学习过程相联系可以公正地评价学生学习状态, 有效促进学生真学习和真思考。

得益于学科前沿案例主题讨论和过程性评价考核方式, 学生的学习积极性和参与度得到了有效提升, 2020–2022 年的平均成绩逐年提高, 教学改革取得了较好成效。另一方面, 学

生在食品酶学与酶工程领域的科研能力有所增强, 申报大学生创新创业项目、“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛和全国大学生生命科学竞赛的比例明显增加。在笔者所在的教学团队指导下, 学生团队能够运用所学知识完成实验方案设计、实验过程实施和结题报告撰写等工作, 获得了全国大学生生命科学竞赛国家二等奖等多项奖项。

课程仍有部分方面需要不断改进, 由于学生的英语水平、专业知识基础、学习能力等方面不尽相同, 导致学生在部分内容上掌握欠佳。为此, 十分注重学情调研, 充分掌握学生的学习情况, 根据学情分析及时调整教学进度, 做到因材施教, 有的放矢地讲授课程内容。

5 总结与展望

新兴技术在酶学和酶工程领域的融合发展

给课程带来了新的机遇和挑战, 积极转变教学思路, 创新教学模式。有机融合学科前沿案例与经典课程内容, 让学生所学能够与时俱进, 激发学生的学习兴趣和积极性。教学方式的设计与实施上, 探索了基于 OBE 理念的 PBL 教学模式, 强化师生互动和生生互动。构建侧重过程性评价的考核方式, 激发学生的学习兴趣和积极性, 大幅提高学生的课堂参与度和积极性。综上所述, 基于学科前沿案例的“食品酶学与酶工程”课程教学模式的改革与实践, 学生在基础知识、前沿动态、创新能力和团队合作等方面得到有效提升, 有效地培养学生的创新能力和科研素养, 为创新型食品专业人才的培养奠定基础。

科技进步和行业发展对授课教师提出了更高要求, 将持续改进和完善课程内容, 新增近年来取得突破性进展的 AI 辅助酶设计等前沿案例, 使课程内容紧跟学科前沿; 将前沿案例与工业生产情况相结合, 提升学生解决复杂工程问题的实践能力; 融合行业内争议性案例, 促进学生的思辨能力等。教学改革是一项任重道远的工作, 需要不断完善教学内容和创新教学模式, 希望本文能为此提供一定的借鉴。

REFERENCES

- [1] BORNSCHEUER UT, HUISMAN GW, KAZLAUSKAS RJ, LUTZ S, MOORE JC, ROBINS K. Engineering the third wave of biocatalysis[J]. *Nature*, 2012, 485(7397): 185-194.
- [2] WANG YJ, XUE P, CAO MF, YU TH, LANE ST, ZHAO HM. Directed evolution: methodologies and applications[J]. *Chemical Reviews*, 2021, 121(20): 12384-12444.
- [3] GAO LZ, ZHUANG J, NIE L, ZHANG JB, ZHANG Y, GU N, WANG TH, FENG J, YANG DL, PERRETT S, YAN XY. Intrinsic peroxidase-like activity of ferromagnetic nanoparticles[J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, 2(9): 577-583.
- [4] 李刚, 昌增益. 国际生物化学与分子生物学联盟增订第七大类酶: 易位酶[J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2018, 34(12): 1-2.
- LI G, CHANG ZY. The International Union of Biochemistry and Molecular Biology added the seventh category of enzymes: translocation enzymes[J]. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 2018, 34(12): 1-2 (in Chinese).
- [5] HECKMANN D, LLOYD CJ, MIH N, HA YC, ZIELINSKI DC, HAIMAN ZB, DESOUKI AA, LERCHER MJ, PALSSON BO. Machine learning applied to enzyme turnover numbers reveals protein structural correlates and improves metabolic models[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 5252.
- [6] MAK WS, TRAN S, MARCHESCHI R, BERTOLANI S, THOMPSON J, BAKER D, LIAO JC, SIEGEL JB. Integrative genomic mining for enzyme function to enable engineering of a non-natural biosynthetic pathway[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 10005.
- [7] 张建志, 付立豪, 唐婷, 张嵩亚, 朱静, 李拓, 王子宁, 司同. 基于合成生物学策略的酶蛋白元件规模化挖掘[J]. *合成生物学*, 2020, 1(3): 319-336.
- ZHANG JZ, FU LH, TANG T, ZHANG SY, ZHU J, LI T, WANG ZN, SI T. Scalable mining of proteins for biocatalysis via synthetic biology[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2020, 1(3): 319-336 (in Chinese).
- [8] JIANG Y, QIAN FH, YANG JJ, LIU YM, DONG F, XU CM, SUN BB, CHEN B, XU XS, LI Y, WANG RX, YANG S. CRISPR-Cpf1 assisted genome editing of *Corynebacterium glutamicum*[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15179.
- [9] LU ZH, YANG SH, YUAN X, SHI YY, OUYANG L, JIANG SJ, YI L, ZHANG GM. CRISPR-assisted multi-dimensional regulation for fine-tuning gene expression in *Bacillus subtilis*[J]. *Nucleic Acids Research*, 2019, 47(7): e40.
- [10] CAO M, LI ZH, WANG JL, GE WP, YUE TL, LI RH, COLVIN VL, YU WW. Food related applications of magnetic iron oxide nanoparticles: enzyme immobilization, protein purification, and food analysis[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2012, 27(1): 47-56.
- [11] 崔超, 呼延霆, 尹大川. 重组标签蛋白在蛋白质纯化中的研究进展[J]. *现代生物医学进展*, 2014, 14(32): 6372-6378, 6359.
- CUI C, HU YT, YIN DC. Research progress of recombinant tag protein in purification of protein[J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2014, 14(32): 6372-6378, 6359 (in Chinese).

- [12] ACEVEDO-ROCHA CG, HOLLMANN F, SANCHIS J, SUN ZT. A pioneering career in catalysis: Manfred T. Reetz[J]. *ACS Catalysis*, 2020, 10(24): 15123-15139.
- [13] REETZ MT. Laboratory evolution of stereoselective enzymes: a prolific source of catalysts for asymmetric reactions[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(1): 138-174.
- [14] LIU H, CHEN Q. Computational protein design for given backbone: recent progresses in general method-related aspects[J]. *Current Opinion in Structural Biology*, 2016, 39: 89-95.
- [15] GE J, LEI JD, ZARE RN. Protein-inorganic hybrid nanoflowers[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(7): 428-432.
- [16] LIANG WB, WIED P, CARRARO F, SUMBY CJ, NIDETZKY B, TSUNG CK, FALCARO P, DOONAN CJ. Metal-organic framework-based enzyme biocomposites[J]. *Chemical Reviews*, 2021, 121(3): 1077-1129.
- [17] 潘永贵, 黎寿英. 采后果实内部酶促褐变机制研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(12): 3803-3808.
PAN YG, LI SY. Research progress on enzymatic browning mechanism in postharvest fruits[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(12): 3803-3808 (in Chinese).
- [18] 曲清莉, 傅茂润, 代红飞. 脂氧合酶(LOX)在脂肪酸氧化中的作用研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(10): 137-142.
QU QL, FU MR, DAI HF. Research progress of effect of lipoxygenase (LOX) on fatty acid oxidation[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(10): 137-142 (in Chinese).
- [19] 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, et al. Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide[J]. *Science*, 2021, 373(6562): 1523-1527.
- [20] 周景文, 张国强, 赵鑫锐, 李雪良, 堵国成, 陈坚. 未来食品的发展: 植物蛋白肉与细胞培养肉[J]. *食品与生物技术学报*, 2020, 39(10): 1-8.
ZHOU JW, ZHANG GQ, ZHAO XR, LI XL, DU GC, CHEN J. Future of food: plant-based and cell-cultured meat[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2020, 39(10): 1-8 (in Chinese).
- [21] ZHANG WL, ZHANG T, JIANG B, MU WM. Enzymatic approaches to rare sugar production[J]. *Biotechnology Advances*, 2017, 35(2): 267-274.
- [22] 李芙蓉, 向发椿, 曹丽萍, 邵勇, 余永新, 郑鹭飞, 金茂俊, 金芬, 王静, 李崇瑛, 王珊珊. 纳米酶在食品检测中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(1): 285-297.
LI FR, XIANG FC, CAO LP, SHAO Y, SHE YX, ZHENG LF, JIN MJ, JIN F, WANG J, LI CY, WANG SS. Recent advances in applications of nanozymes in food detection[J]. *Food Science*, 2022, 43(1): 285-297 (in Chinese).
- [23] 施晓秋. 遵循专业认证 OBE 理念的课程教学设计与实施[J]. *高等工程教育研究*, 2018(5): 154-160.
SHI XQ. Teaching design and implementation of the course following the concept of professional certification OBE[J]. *Research in Higher Education of Engineering*, 2018(5): 154-160 (in Chinese).
- [24] 李璐, 肖南, 解新安, 李雁. 问题导向/翻转课堂教学在生物工程专业“化工原理”课程中的应用探索[J]. *生物工程学报*, 2020, 36(9): 1939-1946.
LI L, XIAO N, XIE XA, LI Y. Intergrating problem-based-learning with flipped classroom teaching in “Principles of chemical engineering” for biological engineering undergraduates[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(9): 1939-1946 (in Chinese).

(本文责编 陈宏宇)