

• 高校生物学教学 •

“重组人红细胞生成素制造工艺虚拟仿真实验”课程的建设与实践

冯佳, 蒋建兰*, 冯远航, 朱宏吉, 余林玲, 赵广荣, 卢文玉, 史清洪

天津大学化工学院, 天津 300072

冯佳, 蒋建兰, 冯远航, 朱宏吉, 余林玲, 赵广荣, 卢文玉, 史清洪. “重组人红细胞生成素制造工艺虚拟仿真实验”课程的建设与实践[J]. 生物工程学报, 2024, 40(6): 1950-1962.

FENG Jia, JIANG Jianlan, FENG Yuanhang, ZHU Hongji, YU Linling, ZHAO Guangrong, LU Wenyu, SHI Qinghong. Development and implementation of the course entitled “Virtual Simulation Experiment of Recombinant Human Erythropoietin Manufacturing Process”[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2024, 40(6): 1950-1962.

摘 要: 针对生物工程类专业制造工艺学习传统模式中存在的问题, 本文阐述了“重组人红细胞生成素制造工艺虚拟仿真实验”课程的建设与实践过程。以重组人红细胞生成素药物为载体, 将现代生物制造技术与三维信息技术高度融合。阐述了课程的教学理念、教学目标、教学内容、实施方式及实验方法和实验交互性操作步骤及考核标准。以学生为中心, 创新实验方案设计、教学方法和评价体系, 培养学生分析问题、解决复杂生物医药工程实际问题的能力, 拓宽学生的思路和视野。

关键词: 重组人红细胞生成素; 虚拟仿真; 生物工程类; 教学改革

Development and implementation of the course entitled “Virtual Simulation Experiment of Recombinant Human Erythropoietin Manufacturing Process”

FENG Jia, JIANG Jianlan*, FENG Yuanhang, ZHU Hongji, YU Linling, ZHAO Guangrong, LU Wenyu, SHI Qinghong

School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Considering the issues present in traditional learning methods of manufacturing

资助项目: 第二批国家级一流本科课程(教高函[2023] 7 号); 天津市虚拟仿真实验教学建设项目(津教政办[2019] 69 号); 生物工程国家级一流专业建设(2019 年); 制药工程国家级一流专业建设(2020 年)

This work was supported by the Second Batch of National First-class Undergraduate Courses (Ministry of Education Letter [2023] No. 7), the Virtual Simulation Experiment Teaching Construction Project of Tianjin (Tianjin Educational Official Letter [2019] No. 69), the Construction of National First-class Major in Bioengineering (2019), and the Construction of National First-class Major in Pharmaceutical Engineering (2020).

*Corresponding author. E-mail: jljiang@tju.edu.cn

Received: 2023-09-14; Accepted: 2024-01-13; Published online: 2024-01-23

process for biotechnology majors, this paper presents the development and implementation process of the course entitled “Virtual Simulation Experiment of Recombinant Human Erythropoiesis Manufacturing Process”. The experiment combines modern biological manufacturing technology and three-dimensional information technology, with recombinant human erythropoiesis drug serving as the focal point. This paper elaborates on the teaching concepts, objectives, contents, implementation methods, experimental procedures, interactive steps, and assessment criteria used in the experiment. Through innovative experimental scheme design, teaching methodologies, and evaluation systems, this course aims to cultivate students’ analytical and problem-solving skills in the field of biopharmaceutical engineering, while also broadening students’ perspective and expanding their vision.

Keywords: recombinant human erythropoietin; virtual simulation; bioengineering; teaching reform

生物工程相关的医药、食品和健康产业发展迅猛,对生物医药人才的需求逐年增加,生物医药作为国家新兴战略产业,其中蛋白质产品占生物技术产值的80%以上,掌握蛋白质生产过程对培养生物医药新工科人才的实践能力至关重要^[1]。然而生物制造工艺学习传统模式一般是通过教师讲授和工厂参观进行,学生停留在对知识的理解和设备外观及工艺步骤的感性认知,工艺参数的实操控制能力训练不足^[2]。特别是蛋白质药品,其研发及生产环境洁净度要求高、单位空间内人数受限,且生产周期长、工程细胞和血清等符合法规要求的材料成本极高,使得生物工程、生物制药、制药工程等专业本科人才培养普遍存在与工业生产环境相一致的实践教学平台的缺失,学生又不能进入企业生产一线进行实习,不能满足新时代创新驱动产业转型和技术升级对工程人才的迫切需求。

为了解决不具备真实实验条件或实际运行困难,涉及高危或极端环境、高成本、高消耗、不可逆操作和大型综合训练等问题,教育部开展国家虚拟仿真实验一流本科课程建设^[3-5],以适应新时代高等教育新工科人才的工程技术创新创业能力、工程实践能力和跨界融合能力的培

养^[6]。本实验课程突破传统实践教学的限制性,将现代生物制造技术与互联网三维信息技术高度融合,以重组人红细胞生成素为载体,将“重组人红细胞生成素制造工艺”转化为符合现代教育的虚拟仿真实验内容,开发“重组人红细胞生成素制造工艺虚拟仿真实验”课程。通过虚拟仿真实验一流课程的建设,将生产环境、生产流程和生产设备构造及操作整合在一起,通过人机交互式操作,使学生身临其境,模拟工程技术人员在车间生产一线的操作过程,进行体验式学习,拓展传统实验教学的广度和深度,延伸实验教学的时间和空间^[7],其中优质实验教学资源可对全国高校生物工程、生物制药、生物科学和制药工程等相关专业的学生和社会学习者实现有效开放共享。

1 虚拟仿真实验的设计与建设

1.1 虚拟仿真实验课程建设教学理念和设计

结合国际工程教育认证“以学生为中心、成果导向、持续改进”的理念^[8],本虚拟仿真实验课程以一流课程建设要求^[9]为核心,在课程内容上体现高阶性、创新性和挑战度,建设具有原创性和鲜明特色的实验内容;在课程形式上体现新技术与教育教学的深度融合,改革传统

教学方法,线上、线下相结合,坚持“能实不虚、虚实结合”,解决实际教学中难以实现的教学功能,按照由浅入深的原则开展实验教学。

“重组人红细胞生成素制造生产工艺”是国家精品资源共享课程“制药工艺学”^[10]和天津市精品课程“生物分离工程”^[11]中生物制药的经典案例,代表着现代生物制药领域的主流技术方向和产业前沿。其中,重组人红细胞生成素在医学治疗上能够以非输血治疗形式促进红细胞的生成,从而降低患者对异体输血的需求^[12],也可在一定程度上显著改善患者的神经功能^[13]。课程结合现代生物技术产品化的核心动物细胞培养技术、分离纯化技术和冷冻干燥技术,将生产环境、生产流程和生产设备构造及操作整合在一起,采用模块化设计,在模块内容和模块结构的设计上既注重夯实学生的知识基础,更注重拓展学生的知识领域和思维方式,构建高度仿真的虚拟实验环境和实验对象,构建了“二层次四模块”的递进式虚拟仿真实验教学内容体系,增强学生对生物制造工艺的感性认知和系统了解,使学生理解并遵守职业规范,履行工程科技人员职责,培养学生的工程实践能力和设计创新能力。

1.2 虚拟仿真实验建设内容

1.2.1 虚拟仿真实验课程目标

本实验课程设置了4个模块:生产环境认知、细胞培养及分离纯化、冻干制剂3个基础操作模块及生物反应器放大设计工艺拓展模块,构建了“二层次四模块”的递进式虚拟仿真实验教学内容体系。课程的目标一般包括知识巩固、能力训练和素质拓展,其中能力的训练是核心^[14]。通过开展重组人红细胞生成素制造生产工艺虚拟仿真实验教学,使学生从2个层次深入领会生物工艺的核心要义,培养学生的实践创新能力,达到以下能力和知识目标。

第一层次,全景虚拟仿真实操3个基础操作型模块,掌握创新蛋白质药物及其生产制造全链条的一体化工艺原理和操控过程,训练学生的生产工艺实操技能,培养其职业道德和工程伦理。

(1) 生产环境认知模块:通过仿真操作了解厂区、车间各工序的洁净度等级、人流和物流走向、人净物净处理和环境质量控制,掌握车间净化操作的生产质量管理规范(good manufacturing practice of medical products, GMP)的要求。

(2) 细胞培养及分离纯化模块:了解并掌握工程中国仓鼠卵巢(Chinese hamster ovary, CHO)细胞培养原理、工艺参数对培养过程的影响及生物反应器培养工艺操作过程。了解并掌握膜分离和层析分离的基本原理和操作及蛋白质药物分离纯化的一般工艺流程。

(3) 冻干制剂模块:了解并掌握配液生产、冷冻干燥基本原理及操作和冻干制剂生产工艺流程。

第二层次,全景虚拟仿真训练工艺拓展型模块(生物反应器放大设计模块),了解并掌握生物反应器设计要点,如反应器放大原则、反应器主体尺寸、搅拌器结构尺寸、转速与层数的计算与选定、搅拌桨的选择安装和控制系统等,培养学生应用知识和技术进行设计创新的能力。

1.2.2 虚拟仿真实验教学内容

本虚拟仿真实验采用3D仿真技术、AR、动作捕捉技术等,以Unity3d作为3D引擎,采用C#语言并通过Visual Studio、AdobeFlash工具进行程序开发。依据课程目标,构建了2个层次、4个教学模块的虚拟仿真实验教学内容体系(图1)。

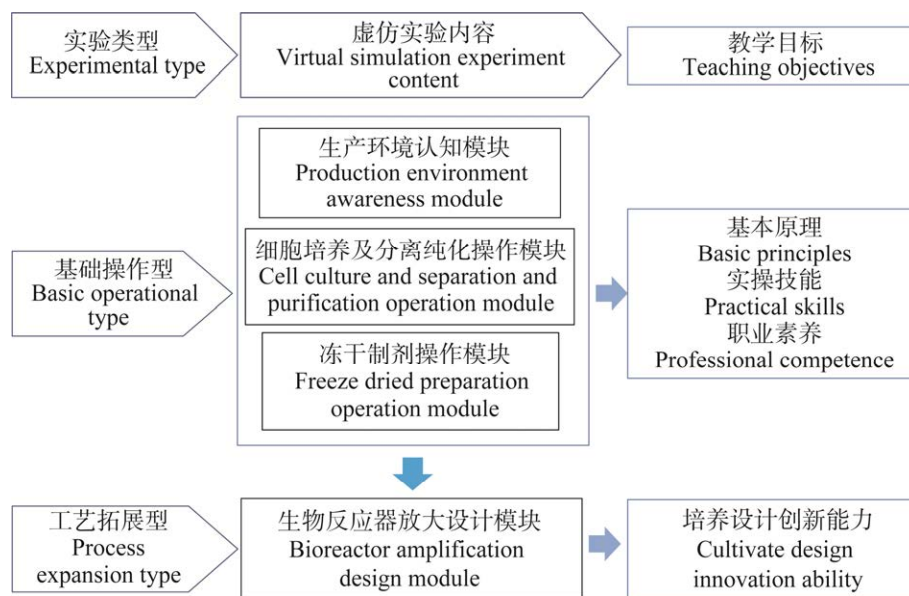


图1 二层次四模块的递进式虚拟仿真实验教学内容体系

Figure 1 Progressive virtual simulation experiment teaching content system of two levels and four modules.

第一层次是基础操作型，由蛋白质药物生产环境认知、细胞培养及分离纯化、冻干制剂3个模块组成，训练学生掌握创新蛋白质药物及其生产制造全链条的一体化工艺基本原理、实操技能和职业素养。

生产环境认知模块中，以冻干制剂车间为例，仿真车间生产环境，包括人流和物流走向、人净物净的处理以及环境质量控制，让学生进行人机交互操作，模拟生产人员在车间内走动，规范操作人净物净处理，完成符合生产质量管理规范(GMP)要求的车间内净化操作(图2)，整体认知

和感受生产车间环境和布局设计。

细胞培养及分离纯化模块中，学生在仿真生物反应器细胞培养车间进行人机交互操作，模拟操作分散控制系统(distributed control system, DCS)操控台，模拟生物反应器细胞培养操作，设定并调整生产工艺参数，以生产出合格产品(图3)。分离纯化工序包括离心、微/超滤、层析分离(亲和层析、离子交换层析、凝胶过滤层析)等操作流程的学习和生产设备的认知，人机交互模拟微滤和离子交换层析两个核心单元操作(图4)。

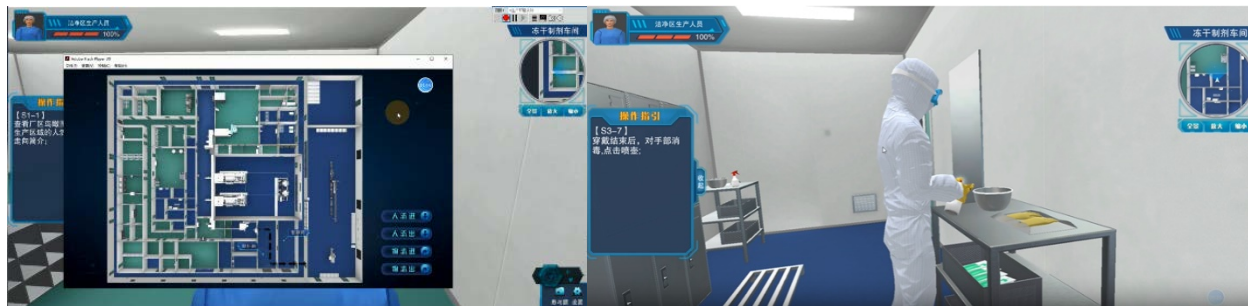


图2 生产环境认知模块操作界面

Figure 2 Operation interface of production environment cognition module.

冻干制剂模块中,学生在仿真配液工序车间进行人机交互操作,模拟浓配、稀配的生产

过程,了解冻干机设备的整体与内部结构和冻干制剂生产全过程(图 5)。



图 3 生物反应器培养操作界面

Figure 3 Operation interface of bioreactor cultivation.



图 4 微滤操作界面(左)、层析操作界面(右)

Figure 4 The operation interface of microfiltration (left) and chromatography (right).



图 5 配液操作界面

Figure 5 Operation interface of liquid preparation.

第二层次是工艺拓展型,由生物反应器放大设计模块体现,采用“任务驱动、工艺拓展”的实验教学方法,培养学生分析问题、解决复杂生物医药工程实际问题的能力,拓宽学生的思路和视野。学习本模块之前要求学生已掌握化工原理、生物工艺学(生物制药工艺学)、生物分离工程、生物反应工程、设备与工程设计等相关基础理论知识,并具有一定生物学、化学、物理学等基础实验和仪器设备的认知和操作能力。对于不具备以上理论和操作基础的学生只需要完成第一层次的基础操作型模块,或可根据自身需求选做,既保证了不同层次学生的训练效果,又能激发学生的研发和创新兴趣。

本模块主要包括学习生物反应器的结

构(图 6),依据相应的放大原则和计算公式进行反应器主体尺寸、搅拌器结构尺寸、转速与层数的计算与选定、搅拌桨的选择安装和控制系统(如温度、pH、溶解氧、泡沫、液位、气体供应等组件)的选定与安装(图 7)。要求学生线上对生物反应器结构进行学习,根据选定的任务进行放大设计和撰写设计报告,并进行线下的汇报、讨论和反馈。

1.2.3 实施方式和实验方法

该实验软件由虚拟网络平台、3D 客户端和后台数据库这 3 部分组成,通过人机交互式操作实现 3 大功能:演示功能、练习功能和考核功能。为学生在计算机系统上建立一系列与真实生产环境高度接近的操作环境,使学生感觉如身临其境一般,具有极高的画面冲击力以



图 6 生物反应器结构

Figure 6 Structure of bioreactor.



图 7 生物反应器放大计算界面

Figure 7 Interface of scaling up calculations of bioreactor.

及强烈的沉浸感、真实感,使学生在整个学习过程中犹如在实际操作一般。在互联网技术支持下学生在此3D仿真生产环境中按照生产工艺进行操作,从而掌握重组人红细胞生成素工业生产操作以及设备的使用方法。

(1) 实施方式

教师通过仿真程序教师端,管理学员和试题,对仿真系统进行部署和维护。教师和学生可以访问管理平台,进行基础信息(应用统计、访问统计、考试成绩等)的数据访问。

仿真程序学生端部署在学生所在电脑,同时实现在线和离线运行两种方式,不固定时间,实现随时随地进行虚拟仿真实验学习。学生端的应用管理程序负责提供智能评分和运行管理等服务,仿真平台提供仿真运算的实时结果。

(2) 实验方法

教师发布学习任务后,要求学生在该实验预习理解的基础上,首先完成3个基础操作型模块,才能够进入下一层次工艺拓展型模块的学习(图8)。

学生可借助网络、电脑等网络终端设备,登录后选择需要学习的实验模块进行自主学习、操作和考核。实验前学生可以对在线教学指导资源和实验指导资源进行预习。实验后学生可以查看个人学习记录和仿真操作成绩,随时随地自主选择多次观看学习,多次操作训练,以最高得分记录成绩。最后编辑填写实验报告内容提交后由教师进行评分。

1.2.4 考核方式及标准

本实验项目评分包括仿真操作评分(70%)和教师评分(30%),包括预习成绩、操作成绩、实验报告和教师评价报告,仿真操作包括12个交互性操作步骤评分(表1)。学生学习并完成不同层次、不同类型的实验操作模块,并完成相应模块小测验,由在线系统自动完成评分。基础操作型包括模块1-3,按教学质量国家标准,考查学生的基础理论和实践能力,学生可自主选择多次观看学习,多次操作,系统自动采集分数,以最高得分记录成绩。工艺拓展型由模块4体现,按国际工程教育认证标准,考查学生分析和解决复杂工程问题的能力,学生

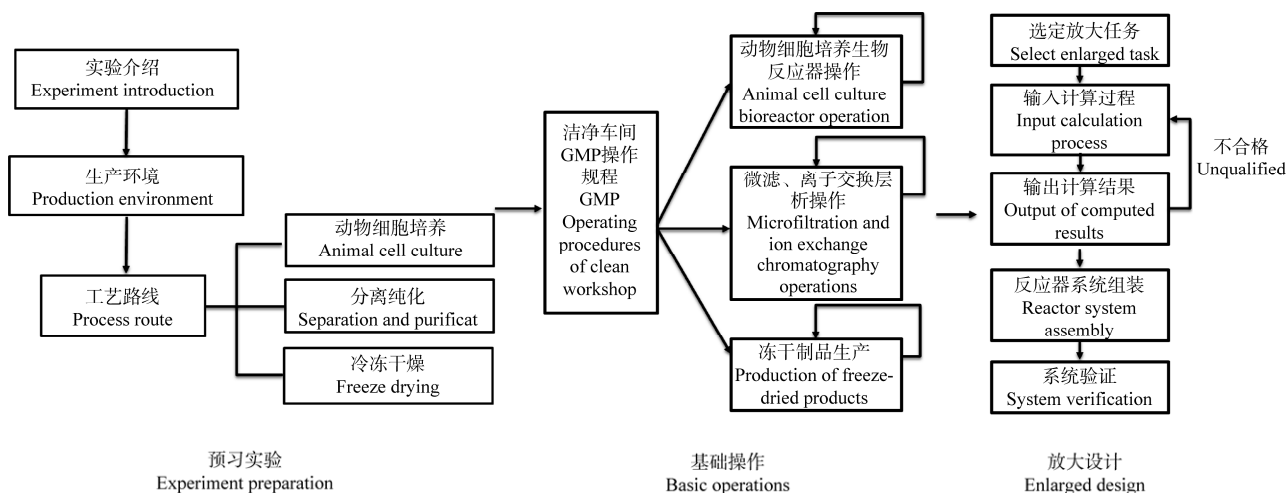


图8 虚拟仿真实验学习模式

Figure 8 Learning mode of virtual simulation experiment.

表 1 交互性操作步骤及评分

Table 1 Interactive operation steps and scoring

编号 No.	交互性操作步骤 Interactive operation steps	目标达成度赋分模型 Scoring model for goal achievement degree	步骤满分 Full score of steps
1	进入配液间(C级),按照C级洁净区要求进行换鞋、更衣和消毒等操作 Enter the liquid preparation room (class C) and change shoes, change clothes, and perform disinfection operations according to the requirements of the class C clean area	对错定性评分法 Qualitative scoring method for right and wrong	10
2	进入灌装间(A/B级),按照A/B级洁净区要求进行换鞋、更衣和消毒等操作 Enter the filling room (class A/B) and change shoes, change clothes, and perform disinfection operations according to the requirements of the class A/B clean area	对错定性评分法 Qualitative scoring method for right and wrong	10
3	按要求依次退出A/B级洁净区和C/D级洁净区 Exit the class A/B clean area and class C/D clean area in sequence as required	对错定性评分法 Qualitative scoring method for right and wrong	5
4	生物反应器的灭菌 Sterilization of bioreactors	对错定性评分法/偏离程度正态分布定量评分法 Qualitative scoring method for right and wrong/Quantitative scoring method for deviation degree distribution	9
5	动物细胞接种培养 Animal cell inoculation culture	对错定性评分法/偏离程度正态分布定量评分法 Qualitative scoring method for right and wrong/quantitative scoring method for deviation degree distribution	10
6	微滤、离子交换层析操作 Microfiltration and ion exchange chromatography operations	对错定性评分法 Qualitative scoring method for right and wrong	6
7	生产前检查 Pre-production inspection	对错定性评分法 Qualitative scoring method for right and wrong	5
8	浓配、稀配操作 Concentrated and diluted blending operations	对错定性评分法 Qualitative scoring method for right and wrong	15
9	清场操作 Clearance operation	对错定性评分法 Qualitative scoring method for right and wrong	5
10	按生产任务,计算放大后反应器及其搅拌桨的主要结构尺寸,选择适宜放大原则,计算搅拌转速 Calculate the main structural dimensions of the enlarged reactor and its stirring paddle according to the production task, select the appropriate amplification principle, and calculate the stirring speed	对错定性评分法/偏离程度正态分布定量评分法 Qualitative scoring method for right and wrong/quantitative scoring method for deviation degree distribution	10
11	合理选定搅拌桨型式与层数,选取组建温度、pH计等控制系统 Reasonably select the type and number of mixing paddles, and select and establish control systems such as temperature and pH meters	对错定性评分法 Qualitative scoring method for right and wrong	10
12	选择或设计反应器操作方式 Select or design reactor operation mode	对错定性评分法 Qualitative scoring method for right and wrong	5

线上计算、设计、组件选定与安装,由系统自动完成评分,占比 70%。教师评分占比 30%,教师可以登录系统查看学生学习记录、仿真操作成绩、实验报告内容,可组织线下汇报和讨论,完成课程实验考核。

2 实验教学特色

2.1 实验内容和教学方法创新

本虚拟仿真实验中,整个生产流程在不同洁净等级无菌生产环境下进行,是利用动物细胞培养技术制备生物制品的具有示范意义的生产工艺。但由于洁净等级要求极高、生产过程管理严格、实验材料成本高及周期长,学生不能进行实操学习,结合“生物分离工程”和“制药工艺学”这 2 门精品课程及企业生产工艺,建立此虚拟仿真实验课程,将万物联网与现有的课堂教学、实体实验教学有机结合,将生物学理论、生物技术和生物工程一体化集成,起到“以虚补实、虚实结合”的作用,精准培养学生的实践和创新能力。

在教学内容安排上,采用了从单一工序到复杂工艺流程,从单元设备到系统集成工程装置,从基础操作到工艺拓展,从实物认知到全生产实际仿真训练的阶梯式、渐进式的安排。利用“自主学习、开车操作”和“任务驱动、工艺拓展”2 种教学方法,让学生从认识实验开始,再根据自己的学习能力和知识水平开始后续虚拟实验模块的学习。使不同层次、不同类型的学生都能在本课程中找到适合自己的教学内容,满足更大范围、不同层次学生学习的需求,很大程度上调动学生学习的自主性和创造性。

2.2 评价体系特色

一流课程建设要求强调了课程评价标准的多样性创新和因地制宜,需要根据课程本身的

内容和特点制定科学合理的教学评价体系,从而推动课程质量不断提升,达到实验教学目标^[15]。天津大学对于生物工程及制药工程专业学生的培养始终坚持工程教育专业认证的成果导向教育(outcomes-based education, OBE)理念设计课程教学,将课程目标从单一的知识传授转变为“知识传授+能力培养”。实验评价体系一般包括阶段性评价和综合性评价^[16]。本虚拟仿真实验课程根据实验特色创新评价体系,建立了以学生为中心的包括“实验过程”“实验报告”和“课程反馈”三位一体的实验评价体系(图 9),形成了“实验-反馈-改进”闭环的教学过程,将专业技术能力与非技术性能力评价相结合^[17],将过程性评价和综合性评价相结合,利用信息技术将过程性评价可视化和自动化,可时刻监督线上操作过程,并开展线下汇报,融入更多调控元素和管理环节,自始至终进行教学效果跟踪,建立完整的评价体系,增强学生动手能力和创新意识,培养综合型、创新型人才。

2.3 对传统教学的延伸与拓展

本实验针对实践教学过程中不具备实际运行条件的教学内容,在虚拟仿真实验中进行了重点展开,让学生了解实际工厂中的车间布局、生产环境和工艺流程,模拟工程技术人员在车间生产一线的操作过程,进行体验式学习,以重组人红细胞生成素的制造工艺流程为主线进行展开,学习动物细胞连续培养、分离纯化、冷冻干燥的理论知识及基础操作和相关设备结构及原理。虚拟仿真实验作为实体实验教学难以开展部分的有效补充具有重要的作用,具有克服空间和时间障碍、缩短实验时间、学生能够多次高效学习的优点^[18],但是虚拟仿真教学方式不能代替传统实验教学方式,与线下课程结合,取长补短,将会很大程度提升虚拟仿真实验的学习效果和线下课程的教学效果^[19-20]。

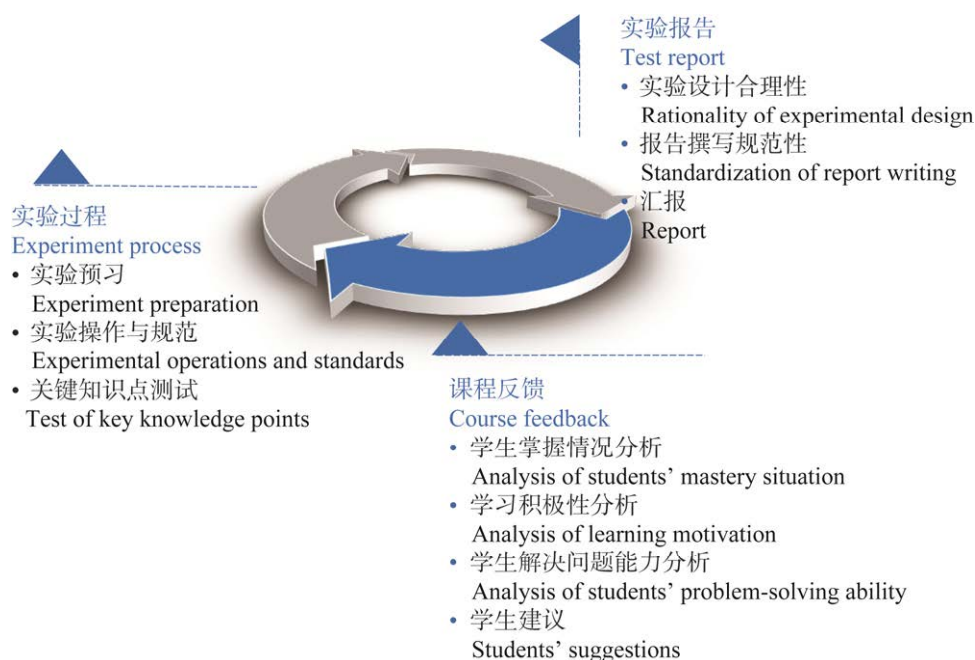


图9 “三位一体”的虚拟仿真实验评价体系

Figure 9 A “trinity” virtual simulation experiment evaluation system.

目前“重组人红细胞生成素制造生产工艺虚拟仿真实验”已经结合天津大学2016–2019级制药工程、生物工程、合成生物学三个专业的“专业实验”“专业综合设计”“生产实习”课程开展。项目式的专业实验“基因工程菌发酵及其蛋白药物的表达检测”，要求学生根据实验任务进行方案设计和实验实施，通过虚拟仿真实验的学习，可以帮助学生初步建立生物制药工艺流程的概念，了解生物反应器的结构和原理，不仅可以辅助指导学生进行实体实验的方案设计，还可以提前学习生物发酵实验操作规范，对线下实体实验起到了很好的补充作用。“专业综合设计”要求学生根据课程设计任务进行产品工艺流程及厂房间的设计，通过结合虚拟仿真实验的内容，能够帮助学生可视化并具体了解到实际生产中的厂房间的布局要求和规范、设备内部结构、生产工艺流程等，为课程设计提供了具体的思路。“生产实习”由于生产

环境洁净度要求高、单位空间内人数受限，学生仅停留在对知识的理解和设备外观及工艺步骤的感性认知，无法近距离进行工艺参数的实操作控制，结合虚拟仿真实验可以有效提升生产实习的效果，填补实际实习中高洁净区无法近距离操作的空白，完整地培养学生的工程实践能力。

3 虚拟仿真实验的应用与效果

“重组人红细胞生成素制造工艺虚拟仿真实验”开设于2019年，通过4年的教学实践和反馈不断改进，于2023年6月，被认定为第二批国家级一流本科课程(虚拟仿真实验教学课程)。课程已在国家实验空间(<https://www.ilab-x.com/details/page?id=6622&isView=true>)对社会开放，截至2023年8月，实验浏览量达到了20 717次，实验人次8 122次，实验人数1 896人。通过分析实验空间后台使用数据显示，从人数

上来看, 92.31%的使用者成绩达到优秀, 4.28%达标, 3.41%不达标; 从个人使用次数上来看, 平均使用次数达到2.5次, 使用者都主动进行了重复训练; 综合评分4.8分(满分5分), 可见使用者对课程的总体满意度较高。目前已有河北工业大学、青海民族大学、沈阳化工大学、沈阳大学、哈尔滨理工大学、西北师范大学、太原工业学院和天津仁爱学院等多所高校使用, 受到了兄弟院校的一致好评, 支持了中西部高校实验教学改革, 实现了实验教学新资源、新技术的共享。

目前实验课程已在天津大学 2016–2019 级制药工程、生物工程、合成生物学等专业学生中教学使用, 以天津大学 2019 级生物工程、制药工程和合成生物学 3 个专业的学生(116 人)成绩为例, 72%的学生分数集中在 90–100 分, 24%的学生在 80–89.9 分, 少数学生(3%)分数在

60–79.9 分。学生可以较好地掌握实验内容, 达到课程目标的要求, 培养学生的工程技术能力和综合能力。从后台数据也可以看到学生曾多次学习, 不断提高分数, 巩固知识, 这也是虚拟仿真实验区别于实体实验的优势, 可以实现随时随地、多次练习, 在无法开展线下生产实习和实验时, 也起到了至关重要的作用, 充分调动了学生的积极性, 提升了学生自主学习的能力。

为了深入了解虚拟仿真实验课程的教学效果, 我们以问卷星的形式对学生进行了问卷调查, 设计了包含课程目标、实验内容、教学方法、软件使用满意度、能力培养和建议等方面的问题(表 2), 得到了学生们的高度认可, 显示出了较好的教学效果, 其中 2018 级学生评价“线上的虚拟仿真实验, 通过这门新技术, 工程中的实际问题得以全面展示, 同学们利用学到

表 2 虚拟仿真实验教学效果调查结果

Table 2 Survey results of virtual simulation experiment teaching effectiveness

编号 Number	问题 Problem	满分分值 Full score	平均分 Average score
1	课程目标明确, 符合学生实际需求 The course objectives are clear and meets the actual needs of students	10	10.0
2	实验内容充实, 条理清楚, 具有高阶性、创新性和挑战性, 注重锻炼学生的实践能力 The experimental content is rich, organized, and highly advanced, innovative, and challenging, emphasizing the exercise of students' practical abilities	20	19.5
3	教学方法新颖, 容易实施, 提升学习主动性 Innovative and easy to implement teaching methods, enhancing learning initiative	20	19.0
4	软件操作方便, 界面美观, 运行平稳 The software is easy to operate, with a beautiful interface and smooth operation	10	9.3
5	有助于提高学生分析问题、解决复杂生物医药工程实际问题的能力 Helps to improve students' ability to analyze problems and solve complex biopharmaceutical engineering practical problems	20	18.8
6	有助于培养学生综合、设计能力、创新能力 Helps to cultivate students' comprehensive design and innovation abilities	20	18.3
7	其他建议 Other recommendations		
	总分 Total score	100	94.9

的知识在全国大学生制药工程设计竞赛中屡创佳绩”。基于虚拟仿真系统的重组人红细胞生成素的制造工艺课程有效解决了时间、成本和单位空间受限等问题,通过本实验的学习,学生可对重组人红细胞生成素生产的车间整体构成与重点设备有较深入的了解,并掌握产品的全流程制造工艺,强化理论知识学习的同时,可培养学生解决生产实际问题的能力,进而极大提升学生的就业竞争力,培养学生的工程实践能力和工程技术创新能力。

4 结论

本实验课程构建了二层次四模块的递进式实验教学内容体系,解决了生物工程专业学生无法到蛋白质产品高洁净生产单位实习的难题。以学生的发展和需求为中心,实现“学中做、做中学”的实践教学模式,学生通过直观的仿真环境和仿真操作过程,从基础操作到工艺拓展设计,培养分析问题、解决复杂生物医药工程实际问题的能力,促进复合型生物技术人才的培养。

REFERENCES

- [1] 纳飞飞,潘翔宇,杨洋,陈雪兰,向明礼,陈崇.四川大学华西医院本科生物医药优秀人才培养模式的探索与实践[J]. 华西医学, 2023, 38(10): 1549-1552.
NA FF, PAN XY, YANG Y, CHEN XL, XIANG ML, CHEN C. Exploration and practice of the cultivation model for excellent undergraduate biomedical talents in West China Hospital of Sichuan University[J]. West China Medical Journal, 2023, 38(10): 1549-1552 (in Chinese).
- [2] 吴兰,陈明华,薛喜文.生物工程专业本科生生产实习的改革与实践[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(11): 125-126, 132.
WU L, CHEN MH, XUE XW. Reforming and practice of the production for undergraduates of bioengineering specialty[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2008, 27(11): 125-126, 132 (in Chinese).
- [3] 教育部办公厅关于 2017-2020 年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知[EB/OL]. [2023-06-27]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201707/t20170721_309819.html
- [4] 教育部关于一流本科课程建设的实施意见[EB/OL]. [2023-06-27]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201910/t20191031_406269.html
- [5] 教育部办公厅关于实施一流本科专业建设“双万计划”的通知[EB/OL]. [2023-06-27]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201904/t20190409_377216.html
- [6] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动[J]. 高等工程教育研究, 2017(3): 1-6.
ZHONG DH. Connotations and actions for establishing the emerging engineering education[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2017(3): 1-6 (in Chinese).
- [7] 汤海峰,李臣亮,周毓麟,刘艳.对微生物工程类虚拟仿真实验建设与共享应用的思考[J]. 生物工程学报, 2021, 37(12): 4439-4445.
TANG HF, LI CL, ZHOU YL, LIU Y. Development of the virtual simulation experiments for Microbial Engineering and perspectives on its shared application[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(12): 4439-4445 (in Chinese).
- [8] 李红,马壮,石素君,赵修臣,霍永隽.金丝球焊引线键合虚拟仿真实验的设计与实践[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(S1): 1-5.
LI H, MA Z, SHI SJ, ZHAO XC, HUO YJ. Design and practice of virtual simulation experiment for gold-based wire bonding[J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(S1): 1-5 (in Chinese).
- [9] 刘华斌.“教产研竞评”模式的风景区园林设计课程改革研究:基于一流课程的目标[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(20): 280-282.
LIU HB. Curriculum reform of landscape architecture design based on the model of ‘teaching, production, research, competition and evaluation’: based on the goal of first-class courses[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(20): 280-282 (in Chinese).
- [10] 元英进. 制药工艺学[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2017.
YUAN YJ. Pharmaceutical Technology[M]. 2nd Ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2017 (in Chinese).
- [11] 孙彦. 生物分离工程[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
SUN Y. Biological Separation Engineering[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2013 (in Chinese).

- [12] 储大同, 张湘茹, 李丽庆, 刘淑俊, 张阳, 张蓓, 许建萍, 钟敏, 邸立军. 重组人红细胞生成素治疗肿瘤化疗相关贫血的作用[J]. 中华医学杂志, 2001, 81(17): 1086-1088.
CHU DT, ZHANG XR, LI LQ, LIU SJ, ZHANG Y, ZHANG B, XU JP, ZHONG M, DI LJ. Effect of recombinant human erythropoietin on anemia associated with tumor chemotherapy[J]. National Medical Journal of China, 2001, 81(17): 1086-1088 (in Chinese).
- [13] 李军, 管义祥. 神经内镜超早期微创术联合重组人促红细胞生成素治疗老年重症高血压脑出血的临床研究[J]. 国际老年医学杂志, 2022, 43(2): 159-162.
LI J, GUAN YX. Neuroendoscopic minimally invasive surgery combined with rHu-EPO in the treatment of older patients with severe hypertensive cerebral hemorrhage[J]. International Journal of Geriatrics, 2022, 43(2): 159-162 (in Chinese).
- [14] 王永泉, 胡改玲, 段玉岗, 陈雪峰. 产出导向的课程教学: 设计、实施与评价[J]. 高等工程教育研究, 2019(3): 62-68, 75.
WANG YQ, HU GL, DUAN YG, CHEN XF. Course teaching under the outcome-based education framework: design, implementation and evaluation[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2019(3): 62-68, 75 (in Chinese).
- [15] 徐晓宇, 王睿, 邱立朋. 制药工程“微生物学实验”课程的项目化教学探索与实践[J]. 微生物学通报, 2023, 50(12): 5604-5613.
XU XY, WANG R, QIU LP. Exploration and practice of project-based teaching in Microbiology Experiment of pharmaceutical engineering[J]. Microbiology China, 2023, 50(12): 5604-5613 (in Chinese).
- [16] 张海军, 闫琼, 张睿, 张国辉. 虚拟仿真实验项目建设质量评价研究[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(9): 174-178.
ZHANG HJ, YAN Q, ZHANG R, ZHANG GH. Research on construction quality evaluation of virtual simulation experiment project[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(9): 174-178 (in Chinese).
- [17] 吕佳绯, 赵广荣, 宋浩, 李艳妮, 蒋建兰, 冯佳, 朱宏吉. 强化非技术性能力培养的项目式教学改革与实践[J]. 化工高等教育, 2023, 40(2): 94-100.
LÜ JF, ZHAO GR, SONG H, LI YN, JIANG JL, FENG J, ZHU HJ. Reform and practice of project-based teaching to strengthen non-technical skills training[J]. Higher Education in Chemical Engineering, 2023, 40(2): 94-100 (in Chinese).
- [18] 张飞燕, 陈婉琼, 赵东升, 苏溪淇, 薛强. 基于虚拟仿真技术的中药药理学实验课程评价[J]. 药学教育, 2023, 39(4): 79-83.
ZHANG FY, CHEN WQ, ZHAO DS, SU YQ, XUE Q. Evaluation of experimental course pharmacology of traditional Chinese medicine based on virtual simulation technology[J]. Pharmaceutical Education, 2023, 39(4): 79-83 (in Chinese).
- [19] 董彬, 吴涛, 姚志刚, 王君, 李建庆, 赵文娟, 刘龙祥, 孙春龙, 宿志伟, 刘滨. 基于虚拟仿真技术的生物工程类综合实验教学改革与实践[J]. 生物工程学报, 2022, 38(4): 1671-1684.
DONG B, WU T, YAO ZG, WANG J, LI JQ, ZHAO WJ, LIU LX, SUN CL, SU ZW, LIU B. Teaching reform and practice of bioengineering comprehensive experiment based on virtual simulation technology[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2022, 38(4): 1671-1684 (in Chinese).
- [20] 熊宏齐. 虚拟仿真实验教学助推理论教学与实验教学的融合改革与创新[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(5): 1-4, 16.
XIONG HQ. Promotion of reform and innovation on integration of theory teaching and experimental teaching by virtual simulation experiment teaching[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(5): 1-4, 16 (in Chinese).

(本文责编 陈宏宇)