

农业合成生物学研究生课程内容体系建设

都浩^{1,2*}

- 1 浙江大学农业与生物技术学院, 浙江 杭州 310058
- 2 浙江大学杭州国际科创中心 合成生物研究所, 浙江 杭州 311215

都浩. 农业合成生物学研究生课程内容体系建设[J]. 生物工程学报, 2024, 40(4): 1251-1260.

DU Hao. Development the agricultural synthesis biology course for postgraduates[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2024, 40(4): 1251-1260.

摘要: 为了满足国家在农业领域高质量发展的战略需求, 教育部把握经济社会和农业高质量发展趋势, 在涉农优势高校布局建设生物育种工程硕博专业。该专业将首次开设农业合成生物学课程, 培养研究生解决生物育种的关键科学与技术问题, 引领国家农业创新发展, 服务现代农业强国建设。农业合成生物学研究生课程将注重多学科交叉、创新引领、产学研协同发展, 培养具有扎实的多学科基础、自主的创新能力及务实的产业化理念的研究生, 满足国内外未来农业发展需求, 深入开展现代农业科学研究和产业化的未来农业科技人才。

关键词: 合成生物学; 学科交叉; 未来农业; 研究生教育

Development the agricultural synthesis biology course for postgraduates

DU Hao^{1,2*}

- 1 College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China
- 2 Institute of Synthetic Biology, ZJU-Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center, Zhejiang University, Hangzhou 311215, Zhejiang, China

Abstract: To attain the aims of high-quality agricultural development, the Ministry of Education is in the process of establishing master's and doctoral programs in biological breeding engineering at universities with a strong agricultural focus. These programs will incorporate a dedicated course on agricultural synthetic biology, aiming to equip graduate

资助项目: 教育部工程硕博士生物育种关键领域核心课程建设项目(117000-194212307)

This work was supported by the Ministry of Education's Core Curriculum Development in Key Areas of Biological Breeding for Graduate Students in Engineering (117000-194212307).

*Corresponding author. E-mail: du_hao@zju.edu.cn

Received: 2023-07-31; Accepted: 2023-10-10; Published online: 2023-10-18

students with the ability to tackle critical scientific and technological challenges in biological breeding while fostering innovations in agriculture. The course places emphasis on interdisciplinary collaboration, innovation, and the practical application of new advancement, ensuring compatibility with both domestic and international agricultural standards in the future.

Keywords: synthesis biology; interdisciplinary; future agriculture; postgraduate education

农业科技人才的培养是支撑现代农业高质量发展的关键。随着国家经济的不断发展和人民生活水平的日益提高, 农业产业已经成为国家经济的重要支柱之一。然而, 受制于传统生产方式和技术手段的限制, 农业产能和农产品质量还难以满足国家高质量发展的需求^[1]。因此, 提升涉农高校生物育种研究生培养质量, 协同涉农优势企业推动农业科技研发, 成为国家农业高质量发展的一项重要战略。农业合成生物学是未来农业科技的前沿领域, 该课程的建设正是在新一轮农业科技革命背景下应运而生。

合成生物学是伴随着基因工程、信息科学、化学、系统生物学和工程学多学科交叉融合发展的一门新兴交叉学科。经过 20 多年的快速发展, 合成生物学作为核心驱动力, 正在推动生物产业的高质量发展, 在能源、材料、医药、环保、农业以及探索生命规律等诸多领域取得了令人瞩目的成就。当前, 为了推动合成生物学学科的发展和人才培养, 全国很多高校均面向生物工程类研究生开设了“合成生物学”专业课程, 合成生物学专业教材也陆续出版, 这也促进了合成生物学这一新兴学科的课程建设日益成熟^[2]。迄今为止, 合成生物学已经在细菌、酵母和哺乳动物细胞中建立了一系列成熟的底盘和技术体系, 形成了一套完备的“设计-构建-测试-改进”(design-build-test-learning, DBTL)科学研究和研究生培养体系。但是, 由于农业动

植物基因组较大且结构复杂、转基因技术少、繁殖周期较长等问题, 以高等动植物尤其是农作物为底盘的合成生物学依然处于起步阶段, 研究生培养体系也尚未建立, 为了课程的系统性, 农业合成生物学课程的内容需要引入利用微生物底盘、无细胞体系生产食品、饲料、农药和微生物制剂等的相关研究案例。

农业生产中农作物是人类生存的基础, 比起微生物有着特殊的优势。例如, 农作物是光合自养型生物, 其生产过程不需要无菌的环境和有机养分的添加; 植物是天然的高价值次生代谢物宝库, 为医药及化工原料的合成提供独特的细胞环境; 农作物经过漫长的人类驯化过程合成的很多营养物质可以直接食用, 不用耗能的提取过程。农作物作为底盘合成高价值物质更低碳、更安全, 是未来农业的重要组成部分。目前, 人类正面临的健康、粮食、能源和环境等问题也迫切需要农业合成生物学的突破来提供解决方案。因此, 开设农业合成生物学研究生课程为未来农业的高质量发展培养科技人才非常重要。该课程的设置主要面向作物科学、园艺学、植物保护学、生态学、食品科学、生物科学和生物工程等领域的研究生开展的多学科交叉课程, 该课程的建设需要面向未来农业科技的产业化, 实现理论知识与行业前沿、技术创新、工程化实践深度融合, 探索形成关键领域工程硕博士核心课程内容, 为农业的高质量发展培养拔尖创新人才。

1 课程建设应体现农业合成生物学的多学科汇聚融合特色

合成生物学是一门多学科综合交叉的新学科，农业合成生物学课程需要涵盖微生物学、生物化学、细胞生物学、分子生物学、遗传学、生理学、组学、酶工程、生物信息学、食品科学，以及计算科学、化学、数学和机械工程等多种基础与前沿学科^[3]。浙江大学要在该课程的设置中充分发挥综合型大学的优势，邀请农业相关的合成生物学不同领域的一线科学家，通过科研进展经典案例讲述该学科成长于多学科的交叉融合，也应用于很多领域问题的解决。教学过程中要让研究生们深刻认识到农业合成生物学作为面向未来的生物育种核心课程，与农业、食品、医药、能源、化工和文旅等多个行业联系紧密，可以创造性地解决其他产业面临的瓶颈性问题。课程中需要针对现在农业中面临的问题，引导研究生思考如何通过对农业动植物复杂性状的改良和未来生物育种中面临的问题提出系统性的解决方案，大幅度改变农作物的目标性状和产值。

伴随着基因组和代谢组测定成本的下降，基因编辑和转基因技术为代表的生物技术不断优化，Alpha Fold 和 ChatGPT 为代表的人工智能算法也在快速迭代，农业合成生物学虽然刚刚起步，但在多领域新技术的推动下展现出快速发展的趋势。因此，农业合成生物学课程要从多学科交叉的角度，结合最新的研究进展向研究生展示农业合成生物学在农业变革中的潜力。相关教学案例如 2017 年与 2018 年，华南农业大学科研团队通过在水稻胚乳特异表达花青素和虾青素合成途径的多个基因，分别创制了胚乳富含花青素的“紫晶米”与胚乳富含虾

青素的“赤晶米”水稻新种质，显著提高了水稻的营养和外观品质^[4-5]。2021 年中国科学院天津工业生物技术研究所科研团队利用电化学和酶工程技术把空气中 CO₂ 转化成淀粉，在国际上首次实现了二氧化碳到淀粉的从头合成^[6]，该研究向研究生展现出依赖于细胞的合成生物学技术可以直接生产人类需要的粮食。同年，中国农业科学院科研团队首次实现从一氧化碳到蛋白质的生物合成，创造了得率最高达 85% 的一步法生物合成蛋白质的世界奇迹。该研究突破了天然蛋白质植物合成的时空限制，弥补了我国饲用蛋白对外依存度过高的问题，同时对促进国家“双碳”目标实现具有重要意义^[7]。2021 年来自加拿大和美国的科学家报道了利用烟草生产几款进入临床的植物源性治疗性蛋白质和疫苗取得重要进展，该研究可以向研究生展示农业合成生物学还可以提供个性化医疗方案^[8]。2023 年浙江大学科研团队筛选鉴定了促进植物内源发光底物合成基因，在真菌发光系统中引入植物源基因，首次制造出可以用于低亮度照明的发光植物^[9]，开创了生物能利用的新途径。该课程建设通过系列最新的研究案例向研究生展示多学科的研究方法和技术，为农业外多领域的瓶颈性问题提供创新性解决思路。引导研究生打开思路展开想象，利用农业合成生物技术推动粮食安全、人类健康、能源和环境可持续等领域的科技革命，提高农业的产值，造福人类。

2 课程内容应体现农业合成生物学的发展历程和趋势

合成生物学的发展是建立在多学科交叉的基础上，其发展经历了几个重要时期。主要体现在创建时期、扩张和发展期、快速创新和应

用转化期。尤其是在 21 世纪 30 年代合成生物学领域飞速发展,基因组编辑技术快速迭代,人工智能及自动化设施日渐成熟,全面促进了合成生物学快速发展^[10]。但是,以高等动植物为底盘的合成生物学在基础研究及产业化方面相对滞后,因此,农业合成生物学研究生课程的内容既要全面展现该学科的发展历程,也要结合农业的特点,拓展农业合成生物学的范围,把为人类及动物提供食物、营养的微生物、动物细胞等相关研究纳入农业合成生物学课程的讲解范围,让研究生能从该课程中系统了解到关于生物合成的基础理论和前沿研究技术,为此挖掘合适的“合成生物学”课程资源至关重要。因此,笔者认为农业合成生物学课程要注重前沿性,不能照本宣科,农业合成生物学课程主要以讲义为主。鉴于大多数农业领域研究生本身对合成生物学基础理论的理解尚且不够,为此,选择合适的参考教材有助于加深学生对该课程的理解。但是,目前农业合成生物学领域的专用教材还没有,基础教材方面可以参考 Christopher T. Walsh 主编的《天然产物生物合成:化学原理与酶学机制》^[11]和李春主编的《合成生物学》^[12],这些教材内容虽然以微生物为研究底盘,但对农业领域研究生了解合成生物学的基本内容非常必要。

鉴于该课程为面向硕博的研究生专业核心课程,该课程的主要目的在于拓宽研究生的知识面,启发学生综合多学科前沿技术解决未来农业中面临的问题,因此授课教师需要是有多学科科研经历的一线研究人员,需要结合国家的重大需求、国际国内的热点问题、行业难点问题和政府政策导向等,把合成生物学领域最新的研究成果和未来的应用价值引入课堂,激发学生对未来农业科技发展的兴趣和信心。建

议课时安排 28 个学时,具体核心授课内容和学时分配如表 1 所示。在授课中,课程前 24 个学时以理论教学为主,每次课后向学生推荐 1-2 篇农业合成生物学代表性前沿论文,并在课堂中针对目前亟待解决但进展缓慢的农业合成生物学研究领域,采用启发式教学展开自由讨论,如“人造肉的发展趋势”“非固氮作物是否可能进行生物固氮”“C₃ 作物的光合效率能否提高到 C₄ 作物的水平”“如何快速高效地利用植物秸秆生产能源及高价值化工产品”等开展互动研讨,让研究生结合自身研究领域在自由讨论中提出问题并提出可能的解决思路,达到激荡梦想、追求卓越的农业高科技人才培养目标。

3 课程设置应体现产学研贯通的建设体系

因为农业合成生物学最终要服务于国家的生物育种和生物经济的战略发展,要面向经济主战场、国家的重大需求和人民生命健康,该课程中产学研的贯通培养非常重要。当前,合成生物学也已经进入快速发展阶段,突破性成果不断涌现,技术转化与产业应用也初见成效。世界多国相继出台政策支持农业合成生物学的高速发展,这些利好进一步推动农业产业及生物经济的发展。在新一轮产业变革与减少碳排放的背景下,中国更加注重未来农业产业的可持续发展和高质量发展。因此,该课程的内容设置需要体现世界主要国家在该领域的战略规划、研发投入和产业发展等方面的进展。目前,农业合成生物学相关领域企业相继成立并快速成长,已经成为资本市场的新宠,授课老师通过农业合成生物相关市场动态的讲解激励研究生善于利用好的技术成果,抓住技术变革趋势和市场机遇,提升农业产值,服务社会。

表 1 农业合成生物学课程内容

Table 1 The key components of synthesis biology in agriculture

章节 Chapters	教学内容 Teaching components	学时 Credit hours
合成生物学的发展 历程 The development history of synthetic biology	合成生物学的概念、发展历程、现状及代表性成果；农业合成生物学研究和应用 底盘的选择与改造；农业合成生物学在低碳、可持续发展中的作用与意义；农业 合成生物学的发展历程与现状等 The concept, development history, current status, and representative achievements in synthetic biology; The selection and modification of chassis for research and applications in agricultural synthetic biology; The role and significance of agricultural synthetic biology in low-carbon and sustainable development; And the development history, as well as the current status of agricultural synthetic biology, among others	4
农业领域合成生物 技术进展 Advancements in synthetic biology in the field of agriculture	DNA 合成与组装；高效遗传转化体系的建立；基因编辑及多基因表达调控； 代谢路径优化；蛋白酶定向进化；模块库及元件库建设；技术瓶颈及挑战等 DNA synthesis and assembly; Establishing efficient genetic transformation systems; Gene editing and regulation of multi-gene expression; Metabolic pathway optimization; Directed evolution of proteases; Construction of module and component libraries; Technological bottlenecks and challenges, among others	4
农业合成生物学 代表性案例解读 Interpretation of representative examples in agricultural synthetic biology	植物次生代谢物的异源合成；种子生物反应器的应用；疫苗的设计与生物合成； 主要淀粉、蛋白质及脂类的异源合成；植物高光效及生物固氮的设计与改造；生 物能源的利用与探索；作物复杂性状的设计育种；农业生物传感器案例等；组织 文献讨论 Heterologous synthesis of plant secondary metabolites; Applications of seed bioreactors; Design and biofabrication of vaccines; Heterologous synthesis of major starch, protein, and lipid compounds; Design and modification of plants for enhanced photosynthetic efficiency and biological nitrogen fixation; Exploration and utilization of bioenergy; Breeding design for complex traits in crops; Examples of agricultural biosensors, among others; Additionally, organizing literature discussions	8
生物安全与科学家 的责任 Biosafety and the responsibility of scientists	中国、美国等代表性国家的生物安全立法情况简述；基因编辑及转基因动植物管 理规定；生物安全与国家安全；转基因动植物产业化的案例分析；科学家责任与 义务等 A concise overview of the biosafety legislation in representative countries such as China and the United States; Regulations pertaining to gene editing and genetically modified animals and plants; The interplay between biosafety and national security; Case studies on the industrialization of genetically modified animals and plants; Scientists' responsibilities and obligations, among others	4
农业生物制造的 产业机遇与挑战 The industrial opportunities and challenges in agricultural biomanufacturing	邀请产业及投资机构专家介绍政策导向、企业管理及经营；中国农业生物制造企 业的机遇与挑战等 Invite industry and investment experts to engage in discussions on policy orientation, enterprise management, and operations; Explore the opportunities and challenges encountered by Chinese agricultural biomanufacturing companies	4
农业生物制造 公司参观 Visiting agricultural biomanufacturing companies	参观代表性生物制造公司新型研发机构和创新中心；探讨农业合成生物的前景与 生物经济的未来；可以结合 VR、AR 形式开展相关教学内容 Visit innovative research institutions and innovation centers within bio-manufacturing companies; Discuss the prospects of agricultural synthetic biology and the future of the bioeconomy; Integrate relevant teaching content using VR and AR technology	4

因此, 笔者建议在课程的设置方面安排 4 个课时邀请农业合成生物学产业界的专家授课。目前, 农业食品营养领域的合成生物企业在逐年增加, 可食用微生物合成蛋白、赤藓糖醇、食用益生菌、母乳低聚糖、细胞培养肉、合成人参皂苷和水稻种子造人血清白蛋白等产品开始逐步走进人们的视野。农业相关合成生物技术业界企业家可以从产业的发展 and 市场需求角度来讲授具体产品的研发和生产、知识产权的保护与转化、企业的机遇和责任等, 让研究生切身感受到科技和人才是产业变革的核心要素, 技术要通过企业来实现改善人们生活的价值。利用案例讲解农业合成生物学成果的产业化, 如武汉禾元生物科技股份有限公司用水稻种子生产人血清白蛋白、南京周子未来食品科技有限公司开发细胞培养肉、山东舜丰生物科技有限公司研发的高油酸大豆和高维 C 生菜等, 建议安排研究生到农业合成生物学领域相关的高科技企业去实地参观交流, 实践教学可以让农业领域研究生在参观学习中体会高科技企业在国家科技自立自强中的使命担当, 激发农业领域研究生创新创业的激情与梦想。

4 课程建设应充分利用现代信息技术

现代信息技术在智能化、系统化、微型化和云端化的基础上不断融合创新, 新一代信息技术如云计算、大数据、区块链、人工智能和虚拟现实等快速迭代发展^[13]。这些新技术正在走进人类生活和生产中, 当今高等教育和科学研究发展也正在进入一个以信息技术应用为核心的崭新阶段, 在这样的背景下, 农业合成生物学的课程建设需要主动适应信息时代的发展需要, 将信息作为教育系统的一种基本构成要素,

要体现未来教学、科研、生产的新模式和新趋势。

大规模开放在线课程(massive open online courses, MOOC), 即慕课, 是“互联网+教育”的产物。农业合成生物学课程首先要建设成智慧教育平台, 作为互联互通、共建共享的数字教育资源体系, 充分体现出以学生为中心, 以提高研究生培养质量为核心的教育教学建设体系^[14]。虚拟现实(virtual reality, VR)是一种可以模拟真实场景的技术, 通过虚拟现实设备, 可以为学生提供更加生动、直观的学习体验。传统的教学方式往往是通过文字、图片和视频等方式来传达知识, 而虚拟现实技术可以让研究生身临其境地感受到学习内容, 从而更加深入地理解和掌握知识。合成生物学相关的操作技术、智能化装置、产业化设备非常适合通过 VR 技术来生动展示, 该技术还可以提供更加安全、便捷的学习环境。没有相关条件的高校, 也可以通过 VR 技术为学生模拟特殊实验操作或者设备场景等, 让学生在虚拟环境中进行沉浸式学习, 既可以保证安全, 又可以节省时间和成本^[15]。VR 技术还可以根据学生的不同需求和兴趣提供更加个性化、多样化的学习方式, 让学生更加自主地学习。增强现实(augmented reality, AR)技术是一种将虚拟信息与真实世界巧妙融合的技术, 通过创建人、物、环境数字孪生体, 可以对传统知识呈现方式进行重构, 从而实现对真实世界的“增强”, 促进现实空间与虚拟空间的交互融合, 进而形成全新的育人环境^[16]。这种临场式、沉浸式、交互式的信息技术, 能够更好地与农业合成生物学教学中需要的科研与实践内容衔接, 从而为该课程研究生提供适应未来科研和工作的创新场景。

人类知识的生产、访问与利用方式正伴随着科技的进步日新月异。人工智能技术可以快速高效地从数据海洋中提取隐含的、未知的、

潜在的和有用的信息,使人类知识的增量呈指数级上升。该课程需要让研究生了解到通过深度学习可以从人类农业进步、生物技术发展积累的大量原始数据(如农业生物基因组、转录组、代谢组和表型组等)中学习、抽象出规律。帮助研究生在农业科技大数据中了解更详细的科技知识,总结相关规律,扩大生物育种的创新图谱。通过该课程的培养,要让研究生在知识传承的基础上,促进学习者在人机交互中实现知识更新与创造,借助虚拟现实、增强现实和人工智能等技术,实现虚实融合的教学场景、使数字教育资源更好地服务于研究生的知识体系建构、技能训练、交流协作和教学质量反馈等教学活动中。

5 课程建设应注重教与学的成效

在很多课程的教学过程中,普遍存在以下问题,如研究生对知识的掌握仅处在理论阶段,缺乏将理论知识融入实际产业应用中。学生反映老师们的理论讲解比较空洞、枯燥,难以提起学习兴趣,讲义内容陈旧等。考核方式单一,只有终结性考核(即期末闭卷考试)或者简单的课程论文考核,缺少过程性考核环节。因此,传统教学、考核方式很难全面考查研究生对该课程的理解,难以达成既定课程目标。针对这些问题,通过教学模式和考核方法的改革,促进学生向应用性和实用型人才发展。授课教师需要是科研第一线研究人员,把经典的科研案例、最新的研究进展放到讲义里,图文并茂并及时更新讲义。比如,针对发光植物的创制案例,需要老师从自然界的生物发光原理、发光植物创制的代表性论文、最新的研究水平和将来待解决的问题等进行系统讲解,并描述该研究的产业化价值,最后,结合国家的“双碳”目标,引导研究生围绕该研究相关的问题,产业

化的前景集中讨论,加强研究生对专业知识的掌握及独立思考能力的培养。

教学过程中还要强化师生的及时互动,在教学活动中设置一些研究生课程基本知识及生活常识性问题,例如,在讲解水稻种子做生物反应器生产人血清白蛋白时,可以提基础性的问题,如水稻种子中的主要化学成分有哪些?也可以提一些开放性的问题,如“水稻种子可以异源合成哪些物质”“是否有更好的底盘来合成人血清白蛋白”等。在课程进行中,老师要及时提问,提高学生的课堂注意力,并积极组织学生围绕具体问题开展讨论,通过丰富教学策略,培养学生的学习兴趣和利用已有知识解决未知问题的能力。在每章课程结束后把课程涉及论文及时发给学生,供学生对自己感兴趣的领域深入学习。授课教师要通过教学互动,及时学习提高自己的认知水平和教学能力,达到教学相长的目的。

为了客观评价学习效果,该课程需要采用多元化的开放式考核方式,并加大过程考核成绩在课程总成绩中的比重,笔者建议课程成绩评价标准可以如下:日常出勤占10%、课程问题回答占25%、组织讨论占25%和课程论文占40%。课程结束时,授课教师可以让研究生以自己感兴趣的农业合成生物学某个研究进展和产业化为题,独立撰写课程论文,课程论文要包括该研究的国内外进展分析、需要进一步解决的科学问题和该研究的产业化进程与意义。通过考核方式的优化,注重学生的自主学习和独立思考,培养学生主动查阅文献、语言表达、内容组织和解决实际问题的能力,激发学生的创新思维和产业化热情。在课程结束后研究生可以登录学校的教师和课程评价系统,对教师水平和课程效果进行评价,反馈给课程教师,以便在今后的教学过程中及时调整优化课程,达到教学互促的效果。

6 课程应加强社会责任和生物安全的教育

随着科学技术对人类社会发展的影响与日俱增,而且科技工作者具有很高的专业技能和知识素养,他们一般能事先预见到由科学技术和应用所产生的各类风险和不确定性,及人类文明可持续发展的远景^[17]。因此,科学家不仅需要经常与公众沟通,向公众普及科学知识,也要具备高度的伦理和安全意识,自觉担负特殊的社会责任。

在该课程的授课中要引导研究生将来要做沟通农业科技与社会的桥梁,课程内容中要融入科学家精神教育和社会责任教育,结合国内外科技领域正面和负面的案例,让研究生深刻理解科学要服务于人类文明的进步^[18]。尤其是农业科技与人类健康、生态和安全息息相关。作为未来从事农业科技事业的高层次人才,在研究生阶段要加强与社会和媒体的沟通能力和技巧,适当保持与公众、决策者、企业,以及媒体等其他领域的联系,积极主动把自己的研究成果和价值向社会公开,及时准确回应社会关切,安全高效推动农业科技的发展与应用。

世界卫生组织(World Health Organization, WHO)一直非常重视生物实验室安全问题,早在1983年就出版了《实验室生物安全手册》^[19],在2020年又制定了第4版《实验室生物安全管理手册》^[20],作为实验室生物安全管理的指南和标准。《中华人民共和国生物安全法》自2021年4月15日起施行,该法在生物安全防控体制、防控重大新发突发传染病、人类遗传资源与生物资源安全等方面发挥重要意义^[21]。2022年11月29日,天津大学生物安全战略研究中心与中国外交部在联合国欧洲总部日内瓦万国宫内共同发布《禁止生物武器公约》与《科

学家生物安全行为准则天津指南》^[22],“天津指南”旨在促进负责任科学和加强国家和机构层面生物安全治理的指导原则和行为标准,鼓励世界各国科学家及其机构坚守生物科学规定。农业科技的发展路程也是人类与生物发展依存关系的历程,因此农业合成生物学教育要培养研究生高度的“生物安全”和“生物伦理”意识。在课程中要仔细讲解生物科学、生物技术和生物武器等领域存在的安全类概念和问题^[23]。因此,在该课程的教学要结合转基因微生物、动植物、基因编辑动植物的发展历程、技术特点和各国政府、国际组织的法规和指南等,让研究生在自由讨论中深刻理解生物安全与生物伦理的重要性,明白在生物与人的关系中,既需要从客观事实和真理的角度出发,对生物及其相关的安全类问题进行科学探索,形成客观的科学认知,同时也需要从人类生存发展和安全需要出发,对这些问题进行哲学思考,最终形成有利于人类安全和社会发展的经验。

7 展望

合成生物学的发展已进入基础研究和产业化繁荣互促的时代,农业合成生物学的基础研究与应用推广刚刚起步,未来将极大地推动生物育种的变革,针对农作物的复杂性状(如高光效、生物固氮、综合性状改良、生物质利用和高价值物质合成等)和依赖于微生物底盘的高价值农业用品制造等目标,农业合成生物学将发挥系统性解析和重构的优势,从根本上改变农业动植物的特性,提高农业的产值。农业正在与其他学科交叉汇聚,未来将在食品、医药、能源、环保和文旅等领域发挥更大的作用。因此,通过开设“农业合成生物学”课程引导研究生面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康,顺应未来

农业的变革需求, 实现理论知识和行业前沿、技术创新、工程实践的深度融合。授课老师要勤于学习, 及时更新课程内容, 利用数字化智能化赋能人才培养, 探索形成生物育种领域工程硕博士核心课程内容, 夯实研究生培养的根基, 为生物育种的基础研究和产业化造就创新型人才。

REFERENCES

- [1] 李开宇, 杨宁, 冯良山. 我国农业高质量发展过程中存在问题及发展对策[J]. 农业经济, 2023(3): 32-33.
LI KY, YANG N, FENG LS. Challenges and development strategies in the process of high-quality agricultural development in China[J]. *Agricultural Economy*, 2023(3): 32-33 (in Chinese).
- [2] 张琴, 李艳宾. 强化创新能力的研究生“合成生物学”课程教学模式探讨[J]. 高校生物学教学研究(电子版), 2019, 9(6): 29-32.
ZHANG Q, LI YB. Exploration on the teaching mode of synthetic biology course for improving the innovation ability of postgraduates[J]. *Biology Teaching in University (Electronic Edition)*, 2019, 9(6): 29-32 (in Chinese).
- [3] 刘立中, 白阳, 郑海, 傅雄飞, 刘陈立. 合成生物学在基础生命科学研究中的应用[J]. 生物工程学报, 2017, 33(3): 315-323.
LIU LZ, BAI Y, ZHENG H, FU XF, LIU CL. Fundamental aspects of synthetic biology[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2017, 33(3): 315-323 (in Chinese).
- [4] ZHU QL, YU SZ, ZENG DC, LIU HM, WANG HC, YANG ZF, XIE XR, SHEN RX, TAN JT, LI HY, ZHAO XC, ZHANG QY, CHEN YL, GUO JX, CHEN LT, LIU YG. Development of “purple endosperm rice” by engineering anthocyanin biosynthesis in the endosperm with a high-efficiency transgene stacking system[J]. *Molecular Plant*, 2017, 10(7): 918-929.
- [5] ZHU QL, ZENG DC, YU SZ, CUI CJ, LI JM, LI HY, CHEN JY, ZHANG RZ, ZHAO XC, CHEN LT, LIU YG. From golden rice to aSTARice: bioengineering astaxanthin biosynthesis in rice endosperm[J]. *Molecular Plant*, 2018, 11(12): 1440-1448.
- [6] 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.
- [7] WANG J, CHEN LM, XU J, MA SF, LIANG XF, WEI ZX, LI DM, XUE M. C1 gas protein: a potential protein substitute for advancing aquaculture sustainability[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2023, 15(3): 1179-1197.
- [8] FAUSTHER-BOVENDO H, KOBINGER G. Plant-made vaccines and therapeutics[J]. *Science*, 2021, 373(6556): 740-741.
- [9] ZHENG P, GE JY, JI JY, ZHONG JL, CHEN HY, LUO DR, LI W, BI B, MA YJ, TONG WH, HAN LQ, MA SQ, ZHANG YQ, WU JP, ZHAO YQ, PAN RH, FAN PX, LU MZ, DU H. Metabolic engineering and mechanical investigation of enhanced plant autoluminescence[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2023, 21(8): 1671-1681.
- [10] 邵洁, 刘海利, 王勇. 植物合成生物学的现在与未来[J]. 合成生物学, 2020(4): 395-412.
SHAO J, LIU HL, WANG Y. Present and future of plant synthetic biology[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2020(4): 395-412 (in Chinese).
- [11] CHRISTOPHER TW, YI T. *Natural Product Biosynthesis: Chemical Logic and Enzymatic Machinery*[Z]. London: The Royal Society of Chemistry, 2020.
- [12] 李春. 合成生物学. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [13] 王士贤. 贯彻党的二十大精神纵深推进高等教育数字化[J]. 中国教育网络, 2023(2): 8-9.
WANG SX. Deepening the digitalization of higher education in alignment with the principles of the 20th National Congress of the Communist Party of China[J]. *China Education Network*, 2023(2): 8-9 (in Chinese).
- [14] 曹若琪, 徐燊, 汪潇潇. 数字化引领全球高等教育未来: 2022 世界慕课与在线教育大会主会议综述[J]. 中国教育信息化, 2023(1): 82-95.
CAO RQ, XU S, WANG XX. Digitization for the future of higher education: main meeting review of the global MOOC and online education conference 2022[J]. *Chinese Journal of ICT in Education*, 2023(1): 82-95 (in Chinese).
- [15] 杨文阳, 徐可欣. 工业 4.0 背景下高校沉浸式虚拟学习环境设计与应用研究[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(1): 243-246, 291.
YANG WY, XU KX. Research on the design and application of immersive virtual learning environment in universities under the background of industry 4.0[J].

- Research and Exploration in Laboratory, 2023, 42(1): 243-246, 291 (in Chinese).
- [16] 《西安交通大学学报(社会科学版)》编辑部, 九位院士、校长谈“人工智能赋能高等教育”: “人工智能赋能教育”中国工程科技论坛”会议综述[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2023(15): 1-15.
Editorial Board of Journal of Xi'an Jiaotong University. Nine academicians and presidents talk about “artificial intelligence enabling higher education”: a summary of China engineering science and technology forum on AI enabling education[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2023(15): 1-15 (in Chinese).
- [17] 宋馨宇, 宋洁, 张卫文. 新工科背景下高校生物安全人才培养体系建设[J]. 生物工程学报, 2022, 38(5): 2003-2011.
SONG XY, SONG J, ZHANG WW. Developing biosecurity training program under the background of new engineering education in colleges and universities[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2022, 38(5): 2003-2011 (in Chinese).
- [18] 阎臻, 毛康珊, 刘唤唤. 课程思政在生物安全导论课程中的实践与探讨[J]. 高校生物学教学研究(电子版), 2022, 12(3): 33-36.
YAN Z, MAO KS, LIU HH. Practice and discussion of ideological and political education in the course of introduction to biosafety[J]. Biology Teaching in University (Electronic Edition), 2022, 12(3): 33-36 (in Chinese).
- [19] World Health Organization. Laboratory Biosafety Manual[Z]. Switzerland, 1983.
- [20] World Health Organization. Laboratory biosafety manual[Z]. 4th edition. Switzerland, 2020.
- [21] 吴展. 《生物安全法》正式施行: 重要意义、主要内容与未来前瞻[J]. 口岸卫生控制, 2021, 26(1): 10-14, 38.
WU Z. The entry into force of the biosafety law: significance, main contents and future prospects[J]. Port Health Control, 2021, 26(1): 10-14, 38 (in Chinese).
- [22] 宋洁. 《科学家生物安全行为准则天津指南》获得国际认可[J]. 教育国际交流, 2023(3): 77.
SONG J. Tianjin Biosecurity Guidelines for Codes of Conduct for Scientists achieved international recognition[J]. Journal of International Education, 2023(3): 77 (in Chinese).
- [23] 许建香, 李宁. 转基因动物生物安全研究与评价[J]. 生物工程学报, 2012, 28(3): 267-281.
XU JX, LI N. Biosafety assessment of genetically engineered animals: a review[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2012, 28(3): 267-281 (in Chinese).

(本文责编 陈宏宇)