

# 基于通识教育理念的合成生物学课程设计与实践

杨帆<sup>1,2</sup>, 杨劲树<sup>2</sup>

1 浙江大学 生物学国家级实验教学示范中心, 浙江 杭州 310058

2 浙江大学 生命科学学院, 浙江 杭州 310058

杨帆, 杨劲树. 基于通识教育理念的合成生物学课程设计与实践. 生物工程学报, 2022, 38(4): 1631-1639.

YANG F, YANG JS. Design and implementation of the course on Synthetic Biology based on the concept of general education. Chin J Biotech, 2022, 38(4): 1631-1639.

**摘 要:** 合成生物学作为生物学中新的分支学科, 发展迅速, 理论研究和应用潜力巨大, 在带来了很多新的研究理念和研究方法的同时, 给高校教学也带来了新的挑战。目前就合成生物学课程而言, 国内可供参考的教学经验不多。文中以浙江大学“博雅技艺”类通识课程——“合成生物学”为例, 从课程背景、课程设计、课程实施情况、课程成果与存在问题等方面, 全方位地阐述和讨论了基于通识教育理念的合成生物学课程的构建和实施。希望在为课程自身进一步地优化做好分析总结的同时, 抛砖引玉, 为国内其他高校类似课程提供有益的借鉴和参考。

**关键词:** 通识课程; 合成生物学; 国际基因工程大赛

## Design and implementation of the course on Synthetic Biology based on the concept of general education

YANG Fan<sup>1,2</sup>, YANG Jinshu<sup>2</sup>

1 National Demonstration Centre for Experimental Biology Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China

2 College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China

**Abstract:** As an emerging branch of biology, Synthetic Biology has seen rapid development with great potential in theoretical research and application. With a lot of brand-new concepts and research methods, it brings challenges to university teachers, and little experience is available in China on the teaching of

**Received:** August 2, 2021; **Accepted:** January 7, 2022; **Published online:** January 19, 2022

**Supported by:** Research Project of Society of Laboratory in Colleges and Universities in Zhejiang Province, China (YB201934); Research Project on Undergraduate Courses in Zhejiang University, China (zjdg21086)

**Corresponding author:** YANG Fan. Tel: +86-571-88206134-8413; E-mail: fan\_yang@zju.edu.cn

**基金项目:** 浙江省高校实验室工作研究项目 (YB201934); 浙江大学本科教学研究项目 (zjdg21086)

Synthetic Biology. In this study, we discussed the general education-based development and application of the course on Synthetic Biology (a discipline in “liberal arts” in Zhejiang University) from the background, design, implementation, outcome, and problems of the course, hoping to provide a reference for the optimization of the course and the design of similar courses in other universities in China.

**Keywords:** general education; Synthetic Biology; iGEM

通识教育 (general education) 是当今高等教育领域关注的热点之一。通识教育的目标在于打破不同学科专业间的壁垒, 帮助学生构建一个跨学科交叉融合的综合知识体系, 培养学生对自然科学、社会科学、人文科学等不同领域知识的学习与整合能力, 提升学生的综合素质<sup>[1]</sup>。合成生物学的概念在 20 世纪 80 年代提出, 发展于 21 世纪初, 目前已经是生物学领域最前沿、最活跃的学科之一, 在天然产物合成、医疗研究、生物燃料以及工业化学品生产等领域都有广泛的应用。随着合成生物学研究的日益兴起和迅速发展, 在全国高校中逐渐开设了一些与合成生物学相关的课程, 但总体数量不多, 而且基本集中在以生物学相关专业高年级学生为主体的专业必修/选修课类, 尚无相关通识课程的报道<sup>[2-3]</sup>。本文以浙江大学全校性通识选修课程——“合成生物学”为例, 阐述和讨论了基于通识教育理念的合成生物学课程设计和实施。

## 1 课程概况

### 1.1 课程背景

合成生物学 (Synthetic biology) 是在现代生物学、化学、进化系统学、数学、物理学、计算机和工程学、信息学等学科基础上, 以工程化的设计理念, 采用标准化的生物元件和基因线路, 对生物系统进行有目标的设计、改造乃至重新合成, 使其拥有满足人类需求的生物

功能, 甚至创造新的生物系统的学科。合成生物学突破了生命发展与进化的自然法则, 被誉为“第三次生物技术革命”<sup>[4]</sup>。

在我国, 合成生物学作为一门新兴学科, 起步较早, 发展势头非常好。2009 年由中国科学院出版的《创新 2050: 科学技术与中国的未来》系列丛书中指出: “合成生物学是可能出现革命性突破的 4 个基本科学问题之一”<sup>[5]</sup>。2018 年 8 月, 国际顶级学术期刊 *Nature* 刊登了中国科学院植物生理生态研究所研究员覃重军团队的研究论文, 他们在国际上首次人工创建了自然界中本不存在的简约生命——仅含单条染色体的酵母真核细胞, 即将酿酒酵母原有的 16 条天然染色体人工合成为一条。这种具有单条巨大染色体的酿酒酵母, 细胞生长与天然酵母一模一样, 功能也几乎完全一致<sup>[6]</sup>。从基础研究的角度而言, 这是通过合成生物学技术人工造出的一个简约化的生命体, 是科学发展史上里程碑式的事件。

基于合成生物学的发展态势以及对于人类生活影响的日益增加, 同时针对合成生物学这门跨专业、跨领域的“汇聚型”新兴学科的学科特点, 在综合性大学开设基础合成生物学通识课程, 在来自不同学科专业的学生当中普及和推广合成生物学的基础知识和基本理念, 引领学生了解和掌握合成生物学的基础实验技术和实验技能, 吸引更多的不同学科背景的优秀人才投身于合成生物学研究, 对于推动我国合成

生物学的发展、进一步地提高我国合成生物学的研究水平有着非常积极的作用。

## 1.2 课程设计

浙江大学从 2020 年春夏学期开始, 在全校通识课程“博雅技艺”类中, 开设面向全校各专业本科生的合成生物学课程。课程设置的目標是: 通过课程的学习, 使学生了解合成生物学的相关基础知识; 掌握合成生物学实验的基本方法和技能; 建立“标准化、工程化”的理念来设计和操作生物学实验。学生通过小组协作, 利用教师提供的 BioBricks parts (组件), 自主设计和构建一个新的小型生物系统。在这个过程中, 引导学生从各自的专业角度去思考和探索不同学科领域与合成生物学之间的关联, 促进学科交叉, 与此同时培养和锻炼学生检索科技资料、阅读科技文献以及团队分工协作能力。

根据学校的总体课程设置, 1 学分课程总计为 24 学时。合成生物学通识课程安排在每年的春季学期进行, 时长 8 周, 每周 3 个课时。课程总体设计为理论加实验课程, 其中以实验课程为主, 在实验教学中穿插理论教学。具体课时安排见表 1。

值得一提的是, 在最后的课程总结汇报环

节, 特别设计了要求学生在 iGEM (<https://igem.org/>) 历年作品中选择一个进行分析和讲解。iGEM 是国际基因工程大赛 (international genetically engineered machine, iGEM) 的简称, 是全球范围内水平最高的大学生合成生物学竞赛。参赛者可以充分发挥自己的创意, 以创造新的生物系统为最终目的。课程通过对 iGEM 作品的分析和讲解, 完善和巩固学生对整体课程所学知识的理解并加以联系应用, 与合成生物学最新前沿研究内容接轨。

## 2 课程实施

### 2.1 教学组织

考虑到全校性通识课程学生来源的复杂性, 为保障教学效果, 课程设置限选人数 20 人。在已开设的两轮课程中, 2020 年春季学期, 共有 19 位学生选课, 来自校内文、理、工、医等多个学部, 其中超过半数来自工科大类的多个专业, 如电气与自动化、化工与高分子、能源、信息、计算机、控制工程等; 其余学生来源专业有经济学、新闻学、统计学、医学等。2021 年春季学期, 共有 17 位学生选课, 学生专业分布与 2020 年基本一致。

表 1 课程教学日历

Table 1 Teaching schedule

周次 Week	内容 Topic	课时 Periods
1	生物学和分子生物学简介; 实验室安全指导 Introduction to Biology and Molecular Biology; safety guide to the lab	3
2	合成生物学简介 1; 实验训练 1 分子生物学 Introduction to Synthetic Biology I; lab training I Molecular Biology	3
3	合成生物学简介 2; 实验训练 2 微生物学/分子生物学 Introduction to Synthetic Biology II; lab training II Microbiology, Molecular Biology	3
4	自主实验 1 头脑风暴 Self-directed experiments I brain storm	3
5	自主实验 2 组件制备 Self-directed experiments II part preparation	3
6	自主实验 3 装置组装 Self-directed experiments III device assembly	3
7	自主实验 4 系统搭建 Self-directed experiments IV system establishment	3
8	总结 Summary	3

在课程教学过程中,学生每2人为一组,共同完成课程的课内实验、课外文献检索及项目调研、总结汇报等内容。教师在分组时有意识地将工、理、文等大类的学生分开组合,例如在2021春季课程中,不同专业组别的搭配有“工科试验班(信息)+生物科学”“港口航道与海岸工程+基础医学”“建筑学+药学”“生物医学工程+社会科学实验班”等。这样的跨大类组合,一方面可以弥补不同专业学生在前期知识储备和实验技能上的不平衡,保持各组之间总体水平基本平齐,有利于教师在课程实施过程中对总体进度的统一把握;另一方面,来自跨大类学科背景的两名学生通过一个短学期的合作、沟通和交流,共同了解和学习基础合成生物学的知识理念和实验技能,对于促进学科之间的交叉融合、增加学生的思维宽度,也是非常有益的尝试。

## 2.2 教学案例

### 2.2.1 一个简单的合成生物学系统搭建——显色报告基因系统

本教学环节旨在通过具体的实验过程,帮助学生建立合成生物学中组件(part)、装置(device)、系统(system)、底盘等知识框架,掌握合成生物学的基础技能、简单设计和实验实施。

整体教学设计围绕充分调动学生自身的主动性和积极性开展。通过前期的合成生物学基础知识理论学习,在学生掌握分子生物学基本概念(如启动子(promoter)、终止子(terminator)和报告基因(reporter)等)后,以大肠杆菌

(*Escherichia coli*)为底盘生物,每组学生从教师提供的3组BioBricks标准组件(表2)中自主选择相关组件、参照相应的实验流程(图1)<sup>[7]</sup>,通过质粒提取、酶切、纯化、组件连接以及最后的转化培养等实验技术和实验手段,体外构建一个小型的新生物系统。最后每组学生提交一份实验报告,包括实验原始记录 and 数据分析,并分析讨论实验过程中出现的各种现象及发生的可能原因。

### 2.2.2 调研和讲解小型合成生物学项目——以iGEM为例

为了让学生在了解和学习合成生物学基本原理和知识的基础上,充分了解当今合成生物学的发展方向及应用前景,课程特别设计了一个课外调研环节。教师在介绍了iGEM基本情况以后,要求每组学生选取一个iGEM历年的参赛项目,从项目背景、方案设计、实施结果等方面进行学习和分析。这个教学环节的实施贯穿整个课程的始末,由学生利用课外时间进行。在此期间,就项目调研中遇到的各种问题,通过学在浙大(<https://courses.zju.edu.cn>)和钉钉平台(浙大钉),学生进行组内沟通,教师及时就相关问题进行解答。最后在课程总结环节,各小组将调研结果汇总成课堂PPT讲解材料,阐述学习收获,并进行相关讨论。

在2021年春学期的课程中,某实验小组的3位学生选择了德国凯撒斯劳滕工业大学的2019 iGEM项目Chlamy Yummy([https://2019.igem.org/Team:TU\\_Kaiserslautern](https://2019.igem.org/Team:TU_Kaiserslautern))作为调研对

表2 课程中使用的BioBricks标准组件

Table 2 BioBricks parts used for the course (<https://parts.igem.org/>)

组件名称 Name of the parts	组件序列号 Code of the parts
启动子 Promoter	BBa_J23101, BBa_J23119
报告基因 Reporter	BBa_K1033925 (粉色/pink), BBa_K1033929 (蓝色/blue) BBa_K1033931 (黄色/yellow), BBa_K1033915 (绿色/green)
骨架组件 Backbone	BBa_J61002, BBa_J04450

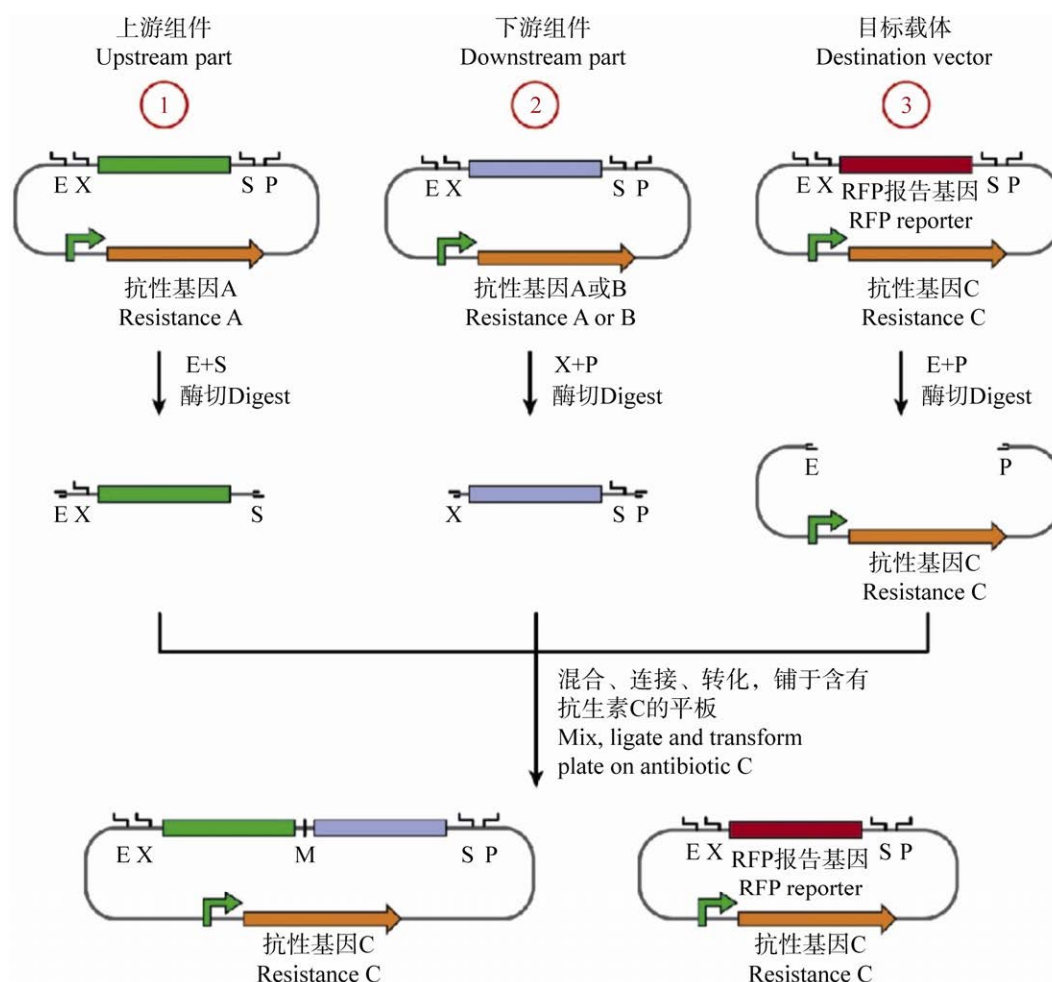


图1 体外构建一个小型生物系统实验策略<sup>[7]</sup>

Figure 1 Construction of a small synthetic biology system<sup>[7]</sup>.

象，从“项目背景”“生物原理”“生物设计”和“实验结果”等几个方面进行了阐述和分享。该项目的选题是微生物塑料降解系统，这既是当下环境治理的主要问题之一，也属于 iGEM 涉及的主要范畴。学生花了大量课内外时间去学习、推敲项目的方方面面，最终把学习结果呈现出来。输出是最好的学习方式，学生在查阅、理解、整理和演讲过程中，不仅强化了合成生物学基础理论和实验方法的学习，更对合成生物学的前沿方向和解决思路有了更为直观的体会。

### 3 成果体会及课程的后期建设思路

#### 3.1 教学体会

##### 3.1.1 合成生物学基本概念的建立：基础理论知识及基本技能的掌握

通识课程的学生来自全校各个跨大类专业，学科背景和基础知识纷繁多样，尤其是对于来自非理科大类的学生，其生物学知识基本还停留在高中阶段。因此在进行课程设计的时候，教学团队在理论教学内容上着重加强了与后期课程内容相关的生物学基础知识的介绍和讲授。以信号通路的“中心法则”为例，教师着

重对原核生物中 DNA 转录的启动子、增强子、阻遏子等转录调控元件进行了阐述和分析,以帮助学生更好地理解和掌握在后续的合成生物学理论教学中的“基因线路”“基因开关”等概念。这样有针对性的课程内容设计,配合有意识的跨大类学生分组组合,经过两轮课程的检验,在课程结束时,各个专业方向的学生的合成生物学基础理论知识有了较大幅度的提升。例如,在 2021 年春季课程中,有一组的两名学生分别来自工科试验班(信息)和生物科学专业。他们在课程总结环节,展示的内容是 2016 年华南农业大学的 iGEM 项目“asTARice biosynthesizes astaxanthin in rice”(利用水稻合成虾青素),展示陈述由来自工科试验班信息专业的学生独立完成,该学生条理清晰、概念明确地讲述了项目组如何将合成虾青素的 4 个基因通过一个改良的多基因载体系统导入到水稻胚乳生物反应器中,显示了良好的基础理论知识素养。相比于课程初期,通过本课程的学习,学生自身的生物学基础理论知识,尤其是合成生物学基础理论知识水平有了明显的提升。

与此同时,本课程作为“博雅技艺”类通识课程,重在培养学生的实践动手能力,因此在前 3 次课程中,教学团队分段设计了相应的生物学基础实验操作技能培训,要求每位学生不论专业背景都必须动手参与实验。由于课程设置的个性化教学,在助教的协助下,通过“点对点”的实操指导,对于生物学实验中的一些基本操作技能,如微量移液器的使用、小型台式离心机/振荡器的使用、超净台无菌操作等内容,所有学生基本可以做到“熟练掌握,个个过关”。即使是来自工科、文科等大类的学生,在课程后半程的自主实验部分,也可以参照相应的实验设计和实验流程,独立进行实验操作,获得预期结果(图 2)。



图 2 学生构建的 4 种 chromoprotein 体外表达系统

Figure 2 Four *in vitro* expression systems for chromoprotein developed by students.

我们这门课程设置的目的是,希望学生能充分理解和掌握合成生物学的主旨思想——即通过“自下而上”的设想,由“组件”到“装置”再到“系统”来设计、合成自然界不存在的人工生物系统,或对已有自然生物系统进行改造和重建。由此在教学内容上,教学团队避免了深奥的生物学理论和复杂的实验操作设计,而是以帮助学生了解、建立合成生物学的基本概念为教学重点,课程的实验部分内容是一个非常简单的体外表达系统的构建,但是通过利用带有“标准化接口”的 iGEM BioBricks (组件) 来构建这个体外表达系统,可以很好地帮助学生去理解合成生物学中的系统设计理念和工程学思想。在课程总结中,来自工科自动化专业的学生写到“第一次了解到生物体原来可以像电子线路板一样,由一些标准元件组装而成”;来自计算机专业的学生则总结到“生物系统中原来也可以实现 0 或者 1,不是通过电路或者代码,是通过基因开关”。

### 3.1.2 打破学科壁垒,促进学科交叉融合

通识教育的根本目标是打破专业间的壁垒,培养学生对不同学科领域的学习和整合能力。在课程设计中的课外项目调研环节,通过

对 iGEM 历年项目的学习和调研,一方面可以进一步加深学生对当代合成生物学的最新发展和应用的认识;另一方面,使学生在系统地学习了合成生物学项目的设计原理、实施过程以及展示方式的同时,从不同专业角度出发去思考不同学科和合成生物学之间的交叉和融合。在 2021 年春季课程中有一名来自建筑专业的学生,其所在小组在课程总结展示中选择了 2019 年 iGEM 高中生组金奖项目“Spidroin engineering with chromoprotein and natural dye”(天然染色蜘蛛丝的体外表达及小型工程化自动纺线)项目。该学生从自己专业出发,对这个项目进行了更进一步的思考和展望:在建筑工程领域,需要使用许多高强度的抗拉材料,相比现在使用的钢材料,从单位截面积/抗拉强度比值而言,蜘蛛丝是非常理想的替代产品。但是目前已知的各种体外表达系统生产的蜘蛛丝,在达到真正大规模的应用之前,还需要进一步地优化生产系统,在大规模提高蜘蛛丝产量的同时可以对生产的蜘蛛丝进行修饰和改造,使其在体外自然环境下能长期保持其强度。

### 3.2 存在的问题及课程的后期建设思路

#### 3.2.1 聚焦当前课程建设热点,加强课程思政建设

课程思政建设是当今高等教育课程建设中的聚焦点之一,而科技伦理的教育和讨论则是生命科学类课程思政建设的重点之一。在本课程的现有教学设计中,受限于有限的课时,这部分内容是有所欠缺的。在 2021 年春季课程总结讨论环节,即有学生提出了一个问题“合成生物学的核心理念是按照人类的需求设计和改造生物系统,那是不是如果以后技术水平允许,我们就可以随心所欲地去制造一种新生命呢?”这也给教学团队一个提醒和启示:在通过课程的学习帮助学生了解生命机制、掌握合成生物

学的概念和发展前景后,如何引导学生去深入理解生命的意义,进而尊重和珍惜生命的价值,是课程后续的建设中需要重点关注的内容。

#### 3.2.2 优化课程结构,完善授课内容的系统性

根据浙江大学对于通识课程的总体设计,1 学分的课程安排在一个短学期内完成,共计 24 学时,每周 3 学时。经过两轮的教学实践,我们发现在 24 学时内完成课程设计的所有内容是非常紧张的。通识课程的学生来自全校,专业背景差异非常大,而合成生物学基础概念的接受和理解需要有一定程度的生物学基础知识的铺垫,需要有足够的理论课时给学生讲解相关理论知识。但是本课程属于科学实践类课程,又必须保证学生有足够的实验动手时间完成一个系统实验设计。事实上,在已经完成的两轮教学实践中,教学团队发现 3 次理论授课无法完成预期内容,临场应变,在课程后期,将理论知识的讲解合理、高效地与实验部分内容穿插起来,完成了预期的教学计划内容。但这种分散式、片段式的理论教学,对于学生理论知识学习的系统性和完整性是不利的。在后续的课程教学过程中,教学团队一方面将在目前的 24 学时体系内,更好地优化课程结构,例如将前期的集中理论授课改为 2 次,重点在生物学相关基础知识的介绍和讲解,而把合成生物学的理论课程分成几个模块单元,配合后半段的实验课程流程,有计划分步骤地讲授,以尽量保证授课内容的系统性;另一方面,在经过总共 3—4 轮的课程教学后,教学团队拟申请将课程升级为 1.5 学分课程,即 32 学时课程。课时的增加,将给课程的教学内容安排和教学方式多样化提供更多的空间。

与此同时,我们注意到,合成生物学作为一门重要的应用基础研究学科,已经在医药、化工、能源、环保等诸多领域的工业生产中有



着广阔的应用。在后期课程的课外文献阅读以及课程总结汇报等教学环节中,除去 iGEM 相关内容外,教学团队将利用通识课程的学生来自全校各专业的这一特点,有意识地引导学生发现和追踪本专业中合成生物学应用的最新进展和成果,并进行陈述和分析,以弥补现有教学体系重基础轻应用的瑕疵,进一步地完善课程教学内容。

### 3.2.3 均衡各教学环节,细化课程过程性评价

课程教学过程性评价是指在课程教学中,对学生学习状况和学业成果进行全方位、多形式、分阶段的考核评价。本课程在设计之初,即确定了以过程性评价作为课程评价的主要方式,拟定的评分规则为:签到 10%,课外文献阅读 10%,实验操作 40%,实验报告 20%,总结汇报 20%。这样的评价体系,基本可以全面、客观地对学生的课程学业进行评价。然而在具体的教学过程中,我们也发现了一些问题。例如,在课程的实验部分环节,为了让学生更好地了解和学习相关的实验技术和实验内容,参照课程的整体实验流程,在每周上课前教师会将本周的实验计划和相关实验操作视频上传到“学在浙大”网站,要求学生提前预习。但是从课程的实际情况来看,这个部分学生完成程度差别非常大。进行了认真预习的学生在课堂上可以很快地进入角色,自主地完成预期的实验;而没有进行预习的学生在课程上则非常被动,实验过程频频受阻。又比如,为了平衡各个专业背景学生基础知识和实验基本技能的差异,更好地把握课程进度,我们有意识地采用了跨大类的分组模式,将工科、文科等大类学生与生物相关大类专业学生搭配组合。从教学过程来看,这样的组合对于组内同学互帮互助,促进学科交叉融合,起了非常积极的作用。但是少数组合也出现了“强者更强,弱者更弱”的情

况,组合内一位同学承担了大部分的实验工作以及最后的演讲展示工作。

基于以上教学过程中呈现的实际问题,为了更好地调动学生的学习主动性,尽可能客观公正地评价学生在课程中的整体表现,在后续的课程教学中,我们将进一步地理顺教学体系和教学结构,均衡各教学环节,细化课程的过程性评价,将调整课程的计分规则为:签到 10%,课后作业/课前预习 10%,随堂提问 5%,实验操作 35%,实验报告 10%,总结汇报(项目调研+课后文献阅读) 30%。首先在其中增加学生课后复习以及课前预习的权重,充分利用“学在浙大”的在线统计功能,对这部分进行量化评价;其次在教学过程中,教学团队将增加随堂提问环节,就理论课的某一知识点或者实验过程中的某些实验原理、操作步骤随机提问,此环节占比 5%;第三在实验操作评价中,增加对于学生在整体课程中主动性、参与性的考量。

## 4 总结

合成生物学作为一门新兴学科,在给生物学研究领域带来革命性变化的同时,也给高校教学带来了新的机遇和挑战。结合通识教育的特点,通过细致、巧妙的课程设计和实施,一方面可以使来自不同专业的学生学习和掌握合成生物学的核心概念和理论,了解合成生物学的最新研究动态,促进学科交叉融合;另一方面,通过新开课程的设计和实践摸索,对于教师自身的教学水平及教学理念,也是一个很好的提升。

## REFERENCES

- [1] 谢鑫,王世岳,张红霞. 哈佛大学通识教育课程实施: 历史、现状与启示. 高等教育研究, 2021, 42(3): 100-109.



- Xie X, Wang SY, Zhang HX. General education curriculum in Harvard University: the history, current situation and enlightenments. *J High Educ*, 2021, 42(3): 100-109 (in Chinese).
- [2] 路志群, 王兆慧, 邓自发, 等. 合成生物学课程的本科生教学方法改革. *安徽农业科学*, 2015, 43(30): 378-379.
- Lu ZQ, Wang ZH, Deng ZF, et al. Reform of teaching methods of undergraduate students of Synthetic Biology course. *J Anhui Agric Sci*, 2015, 43(30): 378-379 (in Chinese).
- [3] 施欣驰, 路志群, 王兆慧. 《合成生物学》“对分课堂”教学改革的研究与实践. *轻工科技*, 2020, 36(4): 154-155, 182.
- Shi XC, Lu ZQ, Wang ZH. Study and application of presentation-assimilation-discussion (PAD) class in Synthetic Biology teaching. *Light Ind Sci Technol*, 2020, 36(4): 154-155, 182 (in Chinese).
- [4] 邓子新. 合成生物学趁最好时代, 建物致知, 建物致用. *生命科学*, 2019, 31(4): 323-324.
- Deng ZX. The best era of Synthetic Biology, gain the knowledge from studying, apply the knowledge with all other technologies. *Chin Bull Life Sci*, 2019, 31(4): 323-324 (in Chinese).
- [5] 中国科学院. 科技革命与中国的现代化: 关于中国面向 2050 年科技发展战略的思考. 北京: 科学出版社, 2009: 110.
- Chinese Academy of Sciences. Revolution of Science and Technology and Modernization of China-Thoughts on the Developmental Strategy of Science and Technology in China 2050. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 2009: 110 (in Chinese).
- [6] Shao Y, Lu N, Wu Z, et al. Creating a functional single-chromosome yeast. *Nature*, 2018, 560(7718): 331-335.
- [7] Josefine L, Erik G, Anthony CF. Synthetic Biology: A Lab Manual. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2014: 55.

(本文责编 郝丽芳)