

## 特约评述

DOI: 10.12211/2096-8280.2025-057

## 国际基因工程机器大赛中植物合成生物学主题的设计与实践

何杨昱<sup>1</sup>, 杨凯<sup>1</sup>, 王玮琳<sup>1</sup>, 黄茜<sup>2</sup>, 丘梓樱<sup>1</sup>, 宋涛<sup>1</sup>, 何流赏<sup>1</sup>, 姚金鑫<sup>3</sup>, 甘露<sup>3</sup>, 何玉池<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 湖北大学生命科学学院, 湖北 武汉 430062; <sup>2</sup> 湖北大学图书馆, 湖北 武汉 430062; <sup>3</sup> 汉江师范学院化学与环境工程学院, 湖北 十堰 442000)

**摘要:** 在近五年的国际基因工程机器 (International Genetically Engineered Machine, iGEM) 大赛获奖项目中, 植物底盘的研究相对较少, 主要受限于植物系统的复杂性。相较于微生物, 植物遗传操作周期长、标准化元件库匮乏、转化效率低, 使得工程化改造更具挑战性。然而, 植物合成生物学在农业可持续化、环境修复和生物医药等领域具有独特优势, 使其成为合成生物学的重要研究方向。近年来, 随着基因编辑技术、合成启动子优化和高效转化体系的进步, 植物底盘的可编程性显著提升, 为应对粮食安全、营养强化和植物源药物生产等全球性问题提供了创新解决方案。以分析往年iGEM参赛项目及分享作者团队的参赛经验作为研究方法, 本文从iGEM竞赛的评审标准出发, 探讨了植物合成生物学项目的立题策略和实施路径, 包括科学问题的精准定位、遗传回路的模块化设计, 以及实验与建模的有效整合。同时, 分析了通过跨学科协作和成果可视化来提升项目的创新性与应用价值的策略 (包括植物底盘选择策略、生物元件构建策略和精确化模型构建策略等), 旨在为相关领域的研究团队提供方法指导和策略参考, 推动这一重要研究方向的发展, 助力参赛团队在国际舞台上脱颖而出。

**关键词:** 国际基因工程机器大赛; 植物合成生物学; 植物底盘材料; 生物元件; 创新性; 基因编辑

中图分类号: Q812 文献标志码: A

## Design and practice of plant synthetic biology theme in the International Genetically Engineered Machine Competition

HE Yangyu<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>1</sup>, WANG Weilin<sup>1</sup>, HUANG Qian<sup>2</sup>, QIU Ziyang<sup>1</sup>, SONG Tao<sup>1</sup>, HE Liushang<sup>1</sup>,  
YAO Jinxin<sup>3</sup>, GAN Lu<sup>3</sup>, HE Yuchi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Life Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, Hubei, China; <sup>2</sup>Hubei University Library, Wuhan 430062, Hubei, China; <sup>3</sup>College of Chemical and Environmental Engineering, Hanjiang Normal University, Shiyan 442000, Hubei, China)

**Abstract:** As an important branch of synthetic biology, the number of research outcomes from iGEM award-winning projects is not significant, lagging behind due to the numerous challenges posed by the complex nature of plant

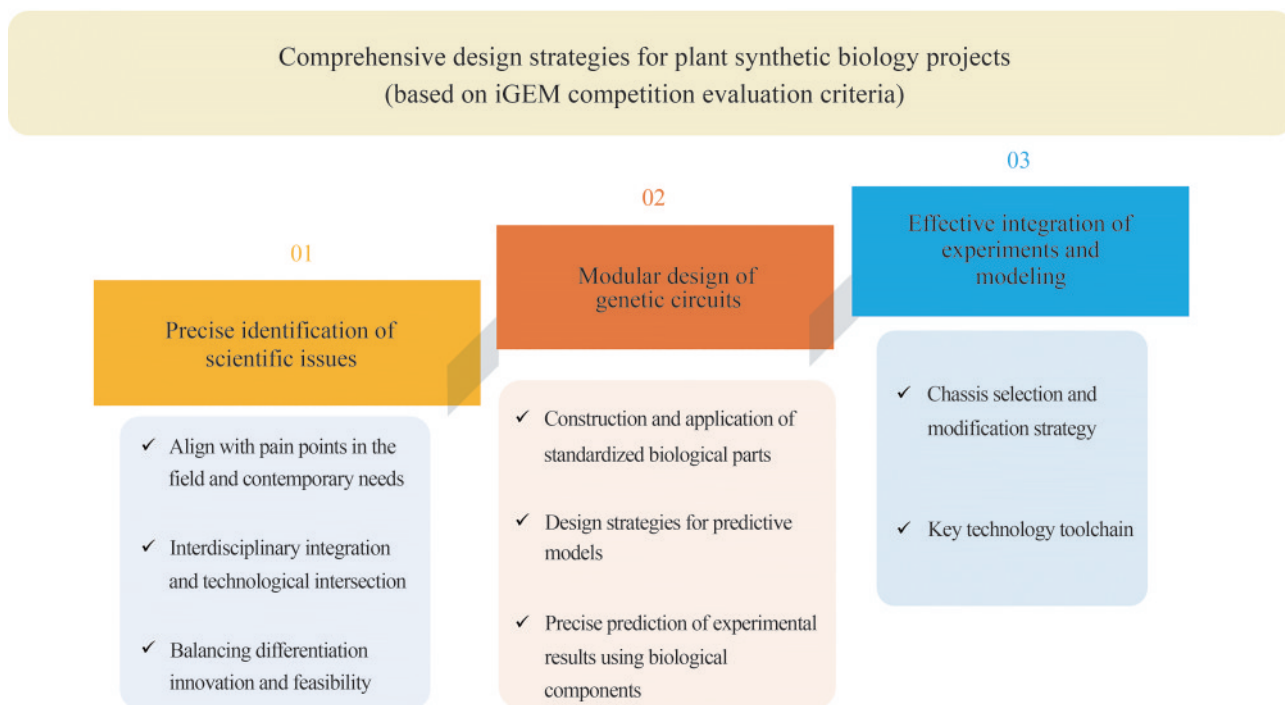
收稿日期: 2025-06-09 修回日期: 2025-08-26

基金项目: 湖北省重点研发计划 (20220BBA032); 汉江师范学院校级教学改革研究项目 (2021C09)

引用本文: 何杨昱, 杨凯, 王玮琳, 黄茜, 丘梓樱, 宋涛, 何流赏, 姚金鑫, 甘露, 何玉池. 国际基因工程机器大赛中植物合成生物学主题的设计与实践[J]. 合成生物学, 2025, 6(5): 1243-1254

Citation: HE Yangyu, YANG Kai, WANG Weilin, HUANG Qian, QIU Ziyang, SONG Tao, HE Liushang, YAO Jinxin, GAN Lu, HE Yuchi. Design and practice of plant synthetic biology theme in the International Genetically Engineered Machine Competition[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(5): 1243-1254

systems. Compared with microorganisms, the genetic operation of plants has obvious shortcomings : not only the operation cycle is long, the standardized component library available for use is very scarce, and the conversion efficiency is also at a low level. These factors are superimposed together, making the engineering transformation of plants difficult. However, even so, plant synthetic biology still occupies a non-negligible position by virtue of its unique value in many key fields such as agriculture, environment and biomedicine. Because of these unique values, it has become an important research direction in the field of synthetic biology. In recent years, with the breakthrough of a series of key technologies, plant synthetic biology has ushered in new development opportunities. Advances in gene editing technology and synthetic promoter optimization have significantly enhanced the programmability of plant chassis and the regulation efficiency of gene expression, providing a highly innovative solution to solve major problems such as food security, nutrition enhancement, and plant-derived drug production in the world. In view of the development of plant synthetic biology project, combined with the evaluation criteria of iGEM competition, there are many key links that need to be focused on. In the process of setting up the topic, it is necessary to accurately lock in scientific problems with research value and ensure the forward-looking and practical nature of the research direction ; At the design level, the modular design of genetic circuits is crucial for and enhancing efficiency and reliability, allowing for the orderly regulation of complex biological functions. At the same time, the effective integration of experimental operation and mathematical modeling can provide more solid theoretical support and more accurate result prediction for research. In addition, interdisciplinary collaboration is also an important driving force for the development of plant synthetic biology projects. The cross-integration of multidisciplinary knowledge such as biology, engineering, and computer science can collide more innovative sparks. At the same time, the visual presentation of the results can make the research value and innovation points more intuitive, and further enhance the application potential of the project. The application of these strategies is expected to promote the project of plant synthetic biology to shine on the international platform and contribute more to the development of this field.



**Keywords:** iGEM competition; plant synthetic biology; plant chassis materials; biopart; innovativeness; gene editing

## 1 iGEM主题偏好度分析

合成生物学是一门融合细胞生物学、分子生物学、生物信息学、工程学和计算机科学等学科的新兴交叉学科<sup>[1]</sup>。合成生物学的兴起为生命科学带来了新的生命力，因此受到越来越多科研工作者的关注与肯定。近十余年来，合成生物学领域经历了从微生物底盘到复杂多细胞体系的范式转变。在技术演进轨迹中，研究者们已成功构建了从基础生物元件设计、代谢通路重构到全基因组合成的技术体系。其技术上的突破，如构建基于信号转导机制的环境响应型生物传感器、开发CRISPR/Cas12i等基因编辑工具、创建萜类化合物异源合成的高效代谢通路等，不仅为解析真核生物复杂调控网络提供新范式，而且在应用层面形成了多维度技术解决方案<sup>[2]</sup>。例如在农业领域可实现抗逆作物精准设计<sup>[3]</sup>，在医药领域推动植物生物反应器产业化<sup>[4]</sup>，以及基于植物修复的碳中和策略<sup>[5]</sup>等，这种基础研究与应用开发的双向赋能模式，正在重塑生物制造领域的创新格局。iGEM竞赛由美国麻省理工学院于2003年创办，是合成生物学领域的国际顶级大学生科技赛事<sup>[6]</sup>。该赛事旨在推动合成生物学的发展并培养学生的团队协作和项目管理能力，为合成生物学的实际应用和全球合作提供了契机。参赛者尝试将最新的技术和方法如基因编辑技术、生物信息学等应用于合成生物学项目，从而推动这些技术在合成生物学领域的普及和发展。

在往年的iGEM竞赛项目中，医疗与健康领域占比最高（合计约30%~40%），其次是环境与可持续发展领域（合计约占20%~35%），工业与制造领域（15%~20%），而食品与农业领域占比仅仅只有10%左右，因此植物合成生物学在iGEM竞赛中发展空间巨大。在iGEM竞赛中，植物领域项目主要集中在作物改良（如2016年华南农业大学团队建立了一套水稻胚乳多基因转染系统，在胚乳中成功表达了虾青素，得到了富含虾青素的营养大米）、次生代谢物生产（如2024年中国农业大学团队通过合成生物学方法改造豆科植物根瘤的天然代谢过程，实现在根瘤中生产 $\omega$ -3多不饱和脂肪酸DHA和EPA）、环境修复（2024年南京大学

团队构建人-植物-微生物共生系统，处理人类排泄物并富集磷元素，磷元素作为肥料被植物吸收）和合成生物学工具开发（2024年中国科学院大学团队整合重组酶和CRISPRi技术构建了多种逻辑门，在拟南芥中设计了双重响应的抗旱通路，将保水基因表达效率提升了40%）等方向。基于对iGEM委员会关于植物合成生物学领域评审准则的系统性解读与深度剖析，该领域的参赛团队若想在竞争中脱颖而出并斩获奖项，需结合自身项目核心设计，重点考量以下关键维度：其一，项目在植物、原生质体及藻类细胞体系设计构建中的完成度与效能表现；其二，所开展的研究工作对植物合成生物学领域现存关键需求或核心科学问题的响应与解决能力；其三，所创建的功能元件及解决方案对于植物系统的适配性与宿主依赖性；其四，所开发的植物源元件及技术工具在跨团队应用中的普适性与领域推动价值。上述维度共同构成了评价植物合成生物学项目创新性与实践价值的核心框架。近些年来，CRISPR/Cas9、锌指核酸酶（ZFN）、类转录激活因子效应物核酸酶（TALEN）以及一些新的编辑技术不断迭代和优化<sup>[7]</sup>，植物合成生物学项目在经过充足的准备后，也将在iGEM竞赛中成为新的顶流。

## 2 植物合成生物学项目立项的关键考量与策略研究

### 2.1 植物合成生物学趋势及热点分析

植物合成生物学作为合成生物学的重要分支，近年来在基础研究、技术突破及产业应用方面均取得了显著进展。参与植物合成生物学竞赛项目时，研究团队需充分掌握领域前沿动态，结合自身研究方向明确创新切入点。

2025年7月北京大学生命科学学院焦雨铃教授和首都师范大学生命科学学院汪颖教授团队<sup>[8]</sup>在*Nature Reviews Bioengineering*期刊发表了题为“Genome synthesis in plants”的文章，展望了合成生物学中植物基因组学的未来发展方向。基因组测序、合成和编辑技术的快速发展使得探索植物基因组学成为一门新的研究学科，具有创新研究

植物合成生物学的发展潜力。当前该领域的发展呈现出技术驱动创新与应用场景多元化,涉及计算设计、模块化DNA组装、植物再生和表型验证等,在分析后得到的数据可驱动基因组设计,进而实现植物合成的工程化改造。基因编辑技术的成熟和AI自动化实验平台的结合显著缩短了研究周期,为植物底盘系统的高通量筛选与优化提供了技术支持。同时其应用范围正在从农业向环境保护、能源开发等方面延伸。跨学科合作与标准化底盘工具的开发不仅推动了植物底盘生物(如烟草、水稻)的标准化,还可以有效解决植物合成生物学面临的定量描述及精细控制严重不足这一关键技术瓶颈<sup>[9]</sup>,从而进一步突破传统研究的局限性,促进多学科交叉融合,推动合成生物学体系的完善与发展。

## 2.2 植物合成生物学竞赛创新性立项设计策略

团队在开展植物合成生物学立项时,需综合考量该领域的核心前沿科学问题与技术挑战。植物体系相较于微生物具有代谢网络复杂、多层次调控和环境依赖性强的特点,因此项目设计应重点关注光合效率优化、抗逆机制解析和次级代谢途径重构等关键科学问题,同时紧密结合粮食安全、生态修复和可持续能源等国家战略需求。在技术路线上,建议围绕植物底盘系统改造、代谢网络动态调控、合成基因线路设计和细胞间通信重编程等维度展开研究,优先选择遗传转化、基因编辑和多组学分析等领域具备技术积累的方向。如表1所示,项目规划应遵循“前沿性-可行性-应用性”的平衡原则,在确保实验条件支持的前提下,重点突出在基础研究深度或产业转化潜力方面的差异化创新优势,从而建立具有鲜明特色的研究体系。

在往年的iGEM竞赛中,植物项目立项从早期的基因编辑技术(CRISPR)和代谢工程为主,逐渐过渡到非转基因技术(RNAi)和植物-微生物互作。以2023年华南理工大学HUST-China团队的“蓝藻-希瓦氏菌共培养体系”项目为例,该研究通过基因工程改造集胞藻和希瓦氏菌,构建了一个高效的共生系统。在该系统中,经改造的集胞藻将CO<sub>2</sub>转化为乳酸作为希瓦氏菌的碳源,而希瓦氏菌则通过增强NAD<sup>+</sup>合成能力和优化电子传递链效率,显著提升了生物燃料电池的性能指标。这一典型案例充分体现了当前植物合成生物学研究向跨物种互作和可持续能源开发方向发展的新趋势。

## 2.3 植物合成生物学竞赛选题创新性评估

在开展植物合成生物学竞赛项目时,首先要对自身项目做创新性评估,确保符合植物合成生物学竞赛的各项要求。创新性评估需要从多维度进行考虑,如表2的四个维度中选择团队立项的侧重点,并在项目实际执行中不断完善和强调创新点,以突出项目立意的创新价值。团队在选题时要结合团队优势及创新性进行评估,优先考虑可行性高、创新性强的项目,对于可行性不足或创新性欠佳的项目方案,则需通过技术路线优化和实验设计改进等方式进行提升和完善。

# 3 植物合成生物学项目设计与底盘选择策略

## 3.1 合成生物学基础策略

团队项目进行策略设计时,要考虑系统的复杂性是否能够支撑后续实验的迭代优化。植物合

表1 选题维度矩阵

Table 1 Selection dimension matrix

创新维度	技术突破点示例	应用场景靶点
底盘系统改造	叶绿体/线粒体合成工厂构建 <sup>[10]</sup>	高附加值天然产物生产
代谢网络重构	跨物种萜类合成途径的移植 <sup>[11]</sup>	抗逆作物开发(抗旱/耐盐)
智能调控装置	光控CRISPR开关的系统设计 <sup>[12]</sup>	环境污染实时监测与修复
细胞通信工程	根系植物-微生物群体系统 <sup>[13]</sup>	智能施肥/病虫害预警
植物营养强化	多营养协同强化 <sup>[14]</sup>	复合营养作物培育

表2 选题创新性评估维度矩阵

Table 2 Matrix of dimensions for assessing the innovativeness of selected topics

维度	评估指标	验证方法
科学原创性	是否提出新机制/新理论(如植物新型信号传导路径设计等)	文献分析、专利检索等
技术独特性	是否开发新元件/新思路(如植物特异的CRISPR-Cas12f系统等)	对比现有技术(Benchling元件库比对)、元件功能实验验证等
应用颠覆性	是否开辟新模式/新场景(如海水稻可实现在盐碱地生长等)	行业需求分析(PEST分析模型)等
系统复杂性	是否实现多层次调控(如结合基因回路+代谢调控等)	计算机分析(Cobra框架建模、Cell Designer)

成生物学遵循“设计-构建-测试-学习”(DBTL)的循环范式<sup>[15]</sup>,其研究策略包括三个核心阶段:首先基于正交化设计原理,结合生命科学系统的调控逻辑,在选定的模式植物中实现遗传回路元件的模块化重构,确保每个模块功能独立且可预测。若现有的天然系统无法满足构建要求,则需要团队个性化创建非天然生物系统。其次运用基因编辑与DNA合成工具,实现目的生物模块的精准组装,即将构建好的生物模块或系统导入目标植物底盘细胞中。最后借助多维度表型组学进行分析,验证系统功能是否达到预期和建立系统性能评估体系并迭代优化设计方案<sup>[16]</sup>。此循环机制可借助标准化生物元件库与机器学习算法的协同驱动,达成可预测性生物系统设计,形成可迭代化的研究范式。

### 3.2 植物合成生物学项目底盘选择策略

在植物合成生物学研究中,底盘材料的选择是整个项目的关键,不仅影响着项目的时间周期,还关乎着项目的成功与否及成果产出率。底盘材料的选择应基于两大核心标准:一是其产业应用价值是否超越传统植物材料本身;二是能否实现高附加值产品的生物合成。在植物中重构异源代谢途径,例如将青蒿素合成基因导入烟草中,可

实现生产低成本量产高价值的青蒿素产品<sup>[17]</sup>。也可采用植物-微生物互作的策略,突破植物生长周期的限制<sup>[18]</sup>。如表3所示,常见的优质植物底盘材料包括烟草、拟南芥、水稻、浮萍。

#### 3.2.1 烟草

烟草作为植物合成生物学的理想底盘材料,受到许多植物方向团队的青睐。其具有的顺势表达系统,可通过农杆菌浸润技术,使得外源基因可在2~5天内高效表达以快速生产重组蛋白或代谢产物。选择烟草作为底盘材料,该系统的显著优势在于无需经历漫长的组织培养过程,单次实验即可在多个叶片区域测试不同基因组合,适合快速筛选和优化<sup>[28]</sup>。2024年iGEM竞赛中,四川大学SCU-China团队“Versa Tobacco”项目通过定向进化与半理性设计优化关键酶(羟基肉桂酰转移酶和白藜芦醇合酶)提升目标产物产量,以解决药用化合物来源稀缺问题。该项目不仅斩获金奖,更荣膺最佳植物合成生物学奖,充分证明了烟草底盘在合成生物学应用中的卓越价值。

#### 3.2.2 拟南芥

拟南芥作为植物生物学的经典模式生物,凭借其小型基因组(约135 Mb)和已完成的全基因组测序特征,在基础研究中具有不可替代的优势。该物种在6~8周即可完成生长周期,配合成

表3 多种植物底盘材料的横向比较

Table 3 A lateral comparison of various plant-based materials

底盘植物	生长周期	转化效率	应用场景	元件兼容性
烟草	苗床期约60天,大田期约100天 <sup>[19]</sup>	农杆菌浸润法效率达60%~80% <sup>[20]</sup>	常用于瞬时表达系统,适合重组蛋白生产	具有高度兼容性,对多种标准化载体适配良好 <sup>[21]</sup>
拟南芥	约6周	农杆菌介导浸花法效率可达30%~50% <sup>[22]</sup>	常用于基础代谢通路解析	适配多数标准化载体,对iGEM元件库有较好的适配能力 <sup>[23]</sup>
水稻	营养生长约90天,生殖生长约70天 <sup>[24]</sup>	农杆菌介导法效率为10%~20% <sup>[25]</sup>	常用于作物性状改良	在启动子等元件选择上具有一定的特异性 <sup>[26]</sup>
浮萍	约30天	因株系而异,瞬时转染效率高,而稳定转化的效率很低 <sup>[27]</sup>	常作为生物反应器生产外源蛋白	目前针对浮萍兼容性的研究相对较少,需要进一步探索其适配性

熟的农杆菌介导转化技术，为基因功能快速验证提供了理想平台。同时拟南芥拥有大量突变体库和基因表达数据库可以使用，适用于信号通路、代谢调控等。例如通过分析评估拟南芥的代谢过程实现萜烯的高效生产<sup>[29]</sup>；将荧光锌生物传感器引入拟南芥中可作为植物传感器来监测易受污染的区域<sup>[30]</sup>等。2024年上海交通大学开展的“紫外线响应基因开关”项目，通过设计环境信号触发的基因调控网络，进一步拓展了拟南芥在合成生物学中的应用维度，充分体现了这一模式生物在基础研究和应用开发中的重要作用。

### 3.2.3 水稻

水稻作为全球关键粮食作物，其产量以及营养品质等方面占据着极为关键的位置。其具有成熟的基因组和遗传工具，是首个完成全基因组测序的农作物。同时具有丰富的代谢途径，能够合成多种化合物，为代谢过程提供了广阔的平台。利用合成生物学的手段不仅可以将水稻改造成高价值的天然产物生产工厂，同时还可对水稻的产量、营养品质进行改良和优化。如2024年湖北大学 HUBU-WUCHANG-CHINA 团队项目采用“两步法”，利用秋水仙素诱导二倍体水稻加倍为四倍体<sup>[31]</sup>，然后用 CRISPR/Cas9 基因编辑技术改造蛋白质编码基因，以获得高蛋白富营养的大米产品。

### 3.2.4 浮萍

浮萍作为一种生长速度极快且生物量丰富的生物资源，在淀粉与蛋白、功能性活性成分合成、水体治理等方面都展现了良好的应用前景<sup>[32]</sup>。浮萍的基因数相对较少，且复杂度和生长控制通路

相对简单，将它作为一种新的模式植物可极大促进植物合成生物学底盘材料的进一步发展。值得注意的是，浮萍的生长速率可达微藻的3倍、玉米的30倍以上。这一特性使得浮萍成为高效合成重要蛋白的生物反应器，可利用合成生物学工具对浮萍底盘进行改造，将其打造成为植物界中的酵母，实现高价值产品的合成利用<sup>[33]</sup>。目前尚未明确在往届 iGEM 项目中发现以浮萍为底盘合成高价值产品的案例，因此参赛团队利用植物合成生物学思想在以浮萍为底盘细胞的方向上具有较大的发展前景，在竞赛中有较强的创新性。

基于国家知识产权局专利数据及中国合成生物学产业创新联盟的数据分析显示，图1说明了近五年来利用植物底盘合成高附加值产品的专利技术呈现快速增长趋势。

2020年，我国植物合成生物学处于技术积累阶段，植物底盘技术以实验室研究为核心，专利布局集中于基因编辑技术领域。2021年进入产业化萌芽期，专利技术转向产业化应用方向，逐步构建应用端技术体系，涵盖植物细胞培养、规模化生产工艺等关键环节。2022年迎来技术突破阶段，专利技术进一步细分，聚焦植物病毒风险防控、基于建模算法的代谢通路优化等细分领域。2023年迈入商业化加速期，专利技术多向“工艺-制剂”一体化模式转化，推动技术向企业级应用落地。2024年，植物合成生物学持续深化领域拓展，专利技术延伸至个性化医疗、新型材料等新兴方向。如表4所示，这些技术成果为植物合成生物学研究提供了重要的理论支撑和技术参考，充

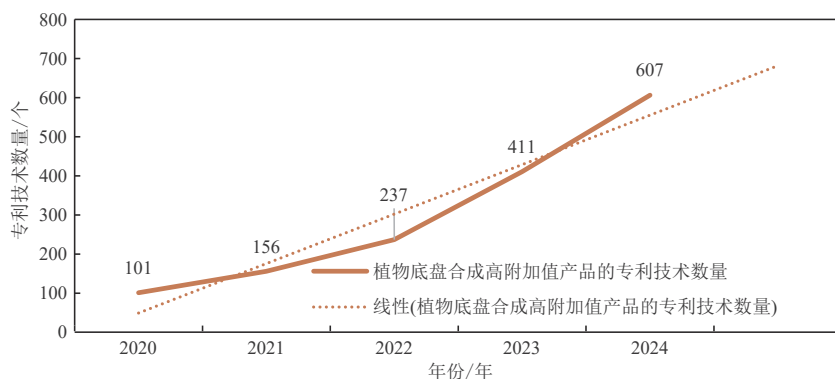


图1 近五年中国植物底盘合成高附加值产品专利数量变化

Fig. 1 The changes in the number of patents for high-value-added products synthesized using plant chassis technology in China over the past five years

表4 部分基于植物底盘申请的专利技术

Table 4 Parts of patent technology based on plant platforms

申请号	申请日期	专利名称	描述	参考文献
CN202411992792.5	2024-12-31	一种氧甲基转移酶及其在生物合成异噁皮啶和噁皮啶中的应用	基于申请的氧甲基转移酶,结合异噁皮啶的代谢途径,可以在藻类和植物底盘中实现异噁皮啶的合成	[34]
CN202310573134.1	2023-05-18	一种利用多基因共表达在植物中异源合成人参皂苷 Rg3 的方法	为利用植物底盘合成稀有人参皂苷 Rg3 提供了一种可行的技术	[35]
CN202211273337.0	2022-10-18	一种可提升广藿香醇合成量的融合基因及方法	以番茄果实为底盘,在其细胞质体的 MEP 通路中重构广藿香醇合成通路,显著提升广藿香醇的合成量	[36]
CN202210565180.2	2022-05-23	一种黄酮合酶 I /黄烷酮-3-羟化酶及在黄酮类化合物合成领域的应用	<i>PnFNS I/F3H</i> 基因可用于在大肠杆菌和植物底盘中生产黄酮和黄酮醇类化合物,具有较高的应用价值	[37]
CN202010435008.6	2020-05-21	一种高效人工根际联合固氮体系	根据合成生物学理论与方法构建的高效人工根际联合固氮体系	[38]

分展现了植物底盘在合成生物学应用领域取得的显著进展。

### 3.3 植物合成生物学项目生物元件的构建策略

植物合成生物学的核心在于通过构建标准化的生物元件来对底盘植物进行工程化改造从而获得新的生物学功能。在植物合成生物学中,植物的生物元件主要分为3类:调控元件(如启动子、终止子、增强子、沉默子、转录因子结合位点等)、催化元件(如细胞色素 P450、氧化还原酶、糖基转移酶等)以及传导元件(如光受体、激素受体、钙信号元件等)。团队可通过立题标准和项目研究方向来选择并自主构建需要的生物元件,并将其和底盘材料相结合,获得所需要的特定的生物学功能。

植物项目在合成生物学竞赛的困难之一在于生物元件的构建。在启动子设计时,植物启动子的组织特异性、诱导性难以精确调控,且缺乏标准化元件库。同时,植物转录后调控复杂,植物 mRNA 的剪接、稳定性及翻译效率受多种因素影响,难以通过简单 DNA 元件设计预测。相较之下,微生物元件的构建更为成熟,可借鉴微生物成熟的标准化元件构建思路,设计出具有植物特色的生物元件。如将大肠杆菌的高效翻译元件与叶绿体转运肽融合实现外源蛋白在叶绿体的高表达<sup>[39]</sup>。也可采用改造病毒外壳蛋白作为植物细胞穿透肽提升大分子递送效率<sup>[40]</sup>。

2024年1月30日,中国科学院分子植物科学

卓越创新中心王勇团队<sup>[41]</sup>构建了植物合成生物学元件库(PSBD),该元件库收录整合了1677个催化元件、384个调控元件、309个物种信息及850个化合物信息,可以提供BLAST、化合物相似性分析、催化元件系统发育分析和调控元件强度可视化等在线工具,可用于植物底盘材料中的遗传通路设计、代谢通路设计及基因精细定量调控设计等。

### 3.4 植物合成生物学项目精确化模型建立的策略

合成生物学的核心之一就是对生物体基因线路进行设计与改造,调控生物体的行为,以实现特定的功能。在设计生物体基因线路的过程中,实现可预测化是提高设计效率和实现功能验证的关键。可预测的基因线路设计使科学家能够更高效地调控生物体对外界刺激响应,从而动态调控其表型<sup>[42]</sup>。相较于微生物系统,植物基因线路具有显著的时空复杂性和长周期特性,导致其工程化改造面临更大挑战。

构建模型的基本原理是将生物过程抽象为信号网络,将这种信号网络转化成计算机模拟的数学模型,通过对数学模型的预测、调整、分析来反映生物体的代谢调控网络。在植物合成生物学领域,基因线路的精准优化是实现特定生物学功能与构建高效人工生物系统的核心环节。传统研究模式下,基因线路优化高度依赖迭代式试错实验,不仅需投入大量时间成本与实验资源,其优化效率亦受限于随机筛选的固有局限性。随着人

人工智能技术的突破性发展,以 AlphaFold 为代表的结构预测工具为基因线路的模型构建与理性设计提供了革命性解决方案。在输入植物蛋白的氨基酸序列后,AlphaFold 就能快速预测其三维结构<sup>[43]</sup>,并且借助 AlphaFold 预测的蛋白结构,结合分子对接等计算工具,研究人员能够在计算机上模拟蛋白与其他分子的相互作用模式<sup>[44]</sup>。通过对海量潜在互作关系的高通量虚拟筛选,可高效定位关键作用位点及功能调控区域。这种技术路径显著缩短了蛋白质结构解析与互作机制研究的周期,为全面解析基因线路网络的拓扑结构与调控逻辑提供了更为精准的分子基础。值得注意的是,2025年1月16日,清华大学药学院张数一团队<sup>[45]</sup>在 *Nature Communications* 杂志发表了关于植物基因线路可预测设计的新框架的研究论文。该研究提出了一种新型植物基因线路设计框架,通过引入相对启动子单位(RPU)概念,结合原生质体瞬时表达系统和定量建模方法,实现了遗传元件的快速表征,大幅提高了研究效率,将实验迭代周期从大于2个月缩短到了10天之内。研究团队进一步开发了正交传感器和NOT门元件库,并基于精确的数学模型预测,成功设计并构建验证了可在植物中动态调控表型的基因线路。这些研究为建立高效、精确的植物合成生物学设计体系奠定了重要基础。

然而,植物系统整体建模仍面临重大挑战,尽管对植物生长发育机制的认识不断深入,但要完全解析其复杂调控网络的每个环节仍需持续探索<sup>[46]</sup>。

### 3.5 植物合成生物学的工具和技术

#### 3.5.1 基因编辑技术

近些年基因编辑技术发展迅速,出现了归巢核酸酶技术、锌指核酸酶技术、转录激活样效应因子核酸酶技术和最新的CRISPR/Cas9技术。其中CRISPR/Cas9具有操作简便、突变效率高等优点,是目前应用最广泛的基因编辑技术,已经被广泛应用于医学、动物科学、植物科学等领域<sup>[47]</sup>。CRISPR/Cas9基因编辑技术由Cas9蛋白和gRNA组成,gRNA能引导Cas9蛋白识别并结合到目标

DNA序列上,Cas9蛋白发挥核酸酶活性,对DNA进行切割,造成双链断裂,随后细胞通过非同源末端连接或同源重组的方式修复DNA,实现基因的敲除、敲入或替换等操作,可精准改良植物的农艺性状,如提高作物产量、增强抗逆性等<sup>[48]</sup>。

湖北大学生命科学学院何玉池教授团队(作者团队)利用基因组合成生物学及定点编辑培育营养强化专用稻,获得2024年iGEM全球金奖。该项目采用了一种创新的合成生物学方法,该方法克服了传统育种技术在整合优良性状、转基因操作的复杂性以及安全性等方面的问题。战略上,该项目利用水稻基因的剂量反应和胚乳贮藏蛋白合成基因的转录组调控网络,通过建模和预测来指导水稻胚乳贮藏蛋白组分蛋白质比率的重编程。项目对贮藏蛋白进行内源性编辑,以更少的基因操作实现更多的性状改良。技术上,项目利用秋水仙素诱导二倍体水稻加倍为四倍体,然后用CRISPR/Cas9基因编辑技术突变谷蛋白B1和球蛋白编码基因*OsGluB1*和*OsGlb*。最终总蛋白质和赖氨酸含量增加,谷蛋白含量基本保持不变,球蛋白几乎消失,醇溶性蛋白质含量增加,从而实现了营养价值和乳化性能的提高,同时使食品安全得到进一步保证。为植物合成生物学应用提供了典型案例,其技术细节可在iGEM官网查阅参考(<https://2024.igem.wiki/hubu-wuchang-china/>)。

#### 3.5.2 遗传转化技术

植物的遗传转化和细胞再生技术开发对于整个植物合成生物学的发展至关重要。在早期的植物合成生物学研究中,如果需要将合成的遗传通路转入植物底盘材料时,通常采用间接遗传转化的方法,此方法的核心思想是以生物体为载体将目的基因转入靶细胞中。农杆菌介导转化法是植物基因工程中常见的遗传转化方法,该技术的分子机制在于:农杆菌侵染过程中,其Ti质粒上的T-DNA区段可被精确切割并整合至植物细胞基因组,进而实现外源基因的稳定表达,从而使植物细胞获得新的性状<sup>[49]</sup>。此方法广泛应用于双子叶植物的遗传转化,转化效率相对较高,能够将较大片段的DNA整合到植物基因组中,同时整合的T-DNA通常为单拷贝,这有利于转基因植物的遗传稳定性和表达稳定性。

在现代植物遗传转化技术中, 研究者们已经开发了多种直接遗传转化的方式, 利用外力将靶基因递送至目标植物细胞中, 包括粒子轰击法、电穿孔法、脂质体法、碳化硅法等植物遗传转化方法<sup>[50]</sup>。粒子轰击也称为基因枪, 这种方法是将靶基因涂敷在金粉或钨粉表面, 构建目的DNA包被的微型载体。接着在高压氦脉冲作用下微型载体被加速, 获得足够的动量后高速刺穿受体细胞, 而包被在外部的靶基因则保留在细胞中, 并最终整合到植物的染色体上<sup>[51]</sup>。此方法已经在多种植物中得到应用, 但与农杆菌介导的遗传转化方法相比, 基因枪法具有转化率较低、成本较高以及无法保护外源DNA等缺点<sup>[52]</sup>。脂质体介导的植物遗传转化方法的思想是通过质膜融合或原生质体内吞作用将外源DNA导入原生质体中。首先将脂质体和外源DNA融合形成DNA-脂质复合物, 接着将复合物和植物原生质体混合, 从而将目的DNA导入到目标原生质体中, 实现植物的遗传转化<sup>[53]</sup>。虽然脂质体介导的植物遗传转化方法可以将目的DNA转入原生质体中, 但尚未发现脂质体介导通过完整细胞壁的先例<sup>[54]</sup>。碳化硅介导的植物遗传转化技术是通过物理方法, 在碳化硅晶须刺穿目的细胞的细胞膜后, 膜上形成小孔, 外源DNA可以通过小孔进入靶细胞<sup>[55]</sup>。该转化方法快速便捷、对实验条件要求不高, 但其转化效率较低且材料具有致癌风险。此外还有其他直接遗传转化技术在此不作详细论述, 参赛团队可按照自身项目灵活采取合适的技术方法。

目前, 利用纳米材料递送系统是最新报道的植物遗传转化技术, 该系统展现了极高的转化效率以克服传统遗传转化技术的限制<sup>[56]</sup>。纳米颗粒是直径小于100 nm的细微颗粒, 通过选择性改造可以使得它们向细胞内递送不同的物质, 包括蛋白质、核酸、药物等<sup>[57]</sup>。由于纳米颗粒在介导基因递送的过程中, 在细胞膜附近携带与环境相同大小的电荷<sup>[58]</sup>, 借助植物细胞壁的渗透作用完成被动转运, 从而规避了基因枪法等物理手段所造成的组织损伤风险, 也无需依赖农杆菌介导转化中的宿主范围限制, 以实现植物底盘细胞的非侵入性基因递送。此外, 纳米颗粒凭借自身材料的生物相容性设计, 和其他直接遗传转化技术相

比具有较低的毒性<sup>[59]</sup>。基于上述特性, 纳米颗粒已经成为植物合成生物学中遗传转化的重要工具, 其材料体系已从早期的碳基纳米材料拓展至金属纳米材料及硅纳米材料等多元化类型<sup>[60]</sup>, 为植物合成生物学中基因的遗传转化提供了革命性解决方案。

## 4 前景及展望

植物合成生物学通过改造现有系统或构建新的生物系统, 赋予了植物新的功能或增强其天然特性, 使优化后的植物产生超越其自然状态的附加价值。例如天然植物中某些药物成分含量极低、微生物发酵难以合成复杂植物代谢物, 此时植物合成生物学将会有不可替代的作用。其合成体系成熟、能够高效表达的优势便充分展现。同样, 植物合成生物学的应用广泛, 涵盖农业、医药、工业、环境等多个领域。在农业方面, 植物合成生物学可用于开发高产和营养强化作物, 例如利用基因组合成生物学及定点编辑培育营养强化专用稻。在医药领域可将植物改造为生物反应器, 生产疫苗、抗体等高价值医药产品。

作为天然的“生物合成工厂”, 植物对于解决粮食安全、能源危机和环境污染等全球性问题提供了创新路径。随着现代生物技术及基因编辑技术的不断进步和优化, 植物也成为了合成生物学优良的底盘材料, 将为医药、大健康及粮食营养强化等做出更多贡献。

## 参 考 文 献

- [1] 潘俊慧, 周凯钰太, 王素春, 等. 合成生物学概述及其在兽医领域的应用前景展望[J]. 中国动物检疫, 2025, 42(2): 57-65.  
PAN J H, ZHOU K Y T, WANG S C, et al. Introduction to synthetic biology and its prospective application in veterinary field[J]. China Animal Health Inspection, 2025, 42(2): 57-65.
- [2] YIN Y, WEN J L, WEN M, et al. The design strategies for CRISPR-based biosensing: target recognition, signal conversion, and signal amplification[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2024, 246: 115839.
- [3] YANG Z R, CAO Y B, SHI Y T, et al. Genetic and molecular exploration of maize environmental stress resilience: toward

- sustainable agriculture[J]. *Molecular Plant*, 2023, 16(10): 1496-1517.
- [4] 邹奇, 潘炜松, 邱健, 等. 植物生物反应器优化策略与最新应用[J]. *中国生物工程杂志*, 2023, 43(1): 71-86.  
ZOU Q, PAN W S, QIU J, et al. Recent advances in optimization strategies and applications of plant bioreactors[J]. *China Biotechnology*, 2023, 43(1): 71-86.
- [5] XU H, YUE C, ZHANG Y, et al. Forestation at the right time with the right species can generate persistent carbon benefits in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(41): e2304988120.
- [6] 张先恩. 中国合成生物学发展回顾与展望[J]. *中国科学: 生命科学*, 2019, 49(12): 1543-1572.  
ZHANG X E. Synthetic biology in China: review and prospects [J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2019, 49(12): 1543-1572.
- [7] 赵国华, 浦佳丽, 唐北沙. ZFN、TALEN 和 CRISPR/Cas9 基因编辑技术在疾病研究及基因治疗中的应用[J]. *中华医学遗传学杂志*, 2016, 33(6): 857-862.  
ZHAO G H, PU J L, TANG B S. Applications of ZFN TALEN and CRISPR/Cas9 techniques in disease modeling and gene therapy[J]. *Chinese Journal of Medical Genetics*, 2016, 33(6): 857-862.
- [8] LAN T L, CHEN L G, WANG Y, et al. Genome synthesis in plants[J]. *Nature Reviews Bioengineering*, 2025: 326.
- [9] TIAN C F, LI J H, WANG Y. From qualitative to quantitative: the state of the art and challenges for plant synthetic biology [J]. *Quantitative Biology*, 2023, 11(3): 214-230.
- [10] MILLER T E, BENEYTON T, SCHWANDER T, et al. Light-powered CO<sub>2</sub> fixation in a chloroplast mimic with natural and synthetic parts[J]. *Science*, 2020, 368(6491): 649-654.
- [11] DEMURTAS O C, NICOLIA A, DIRETTO G. Terpenoid transport in plants: how far from the final picture? [J]. *Plants*, 2023, 12(3): 634.
- [12] LIU J L, ZHANG R X, CHAI N, et al. Programmable genome engineering and gene modifications for plant biodesign[J]. *Plant Communications*, 2025, 6(8): 101427.
- [13] BAI B, LIU W D, QIU X Y, et al. The root microbiome: community assembly and its contributions to plant fitness[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2022, 64(2): 230-243.
- [14] CHAI N, XU J, ZHANG R X, et al. Synthetic metabolic engineering of functional crops: boosting nutrition and human health[J/OL]. *The Crop Journal*, 2025. (2025-07-04)[2025-08-01]. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2025.06.003>.
- [15] 宋凯. 合成生物学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 172.  
SONG K. Introduction to synthetic biology[M]. Beijing: Science Press, 2010: 172.
- [16] LAWSON C E, HARCUMBE W R, HATZENPICHLER R, et al. Common principles and best practices for engineering microbiomes[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2019, 17(12): 725-741.
- [17] FUENTES P, ZHOU F, ERBAN A, et al. A new synthetic biology approach allows transfer of an entire metabolic pathway from a medicinal plant to a biomass crop[J]. *eLife*, 2016, 5: e13664.
- [18] SANTOYO G. How plants recruit their microbiome? New insights into beneficial interactions[J]. *Journal of Advanced Research*, 2022, 40: 45-58.
- [19] MCCANTS C B, WOLTZ W G. Growth and mineral nutrition of tobacco[J]. *Advances in Agronomy*, 1967, 19: 211-265.
- [20] ZHANG Y J, CHEN M X, SIEMIATKOWSKA B, et al. A highly efficient *Agrobacterium*-mediated method for transient gene expression and functional studies in multiple plant species [J]. *Plant Communications*, 2020, 1(5): 100028.
- [21] LIU C Y, CHEN Q, QU Y, et al. The plant platform for natural products synthesis: tobacco[J]. *Industrial Crops and Products*, 2025, 225: 120605.
- [22] CLOUGH S J, BENT A F. Floral dip: a simplified method for *Agrobacterium*-mediated transformation of *Arabidopsis thaliana*[J]. *The Plant Journal*, 1998, 16(6): 735-743.
- [23] HOLLAND C K, JEZ J M. *Arabidopsis*: the original plant chassis organism[J]. *Plant Cell Reports*, 2018, 37(10): 1359-1366.
- [24] MOHAPATRA P K, SARKAR R K, PANDA D, et al. Staging of rice plant growth and development[M/OL]//Tillering behavior of rice plant. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025: 105-139. (2025-01-24) [2025-08-01]. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-5235-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-97-5235-5_4).
- [25] MOHAMMED S, SAMAD A A, RAHMAT Z. *Agrobacterium*-mediated transformation of rice: constraints and possible solutions[J]. *Rice Science*, 2019, 26(3): 133-146.
- [26] SHIMAMOTO K. The molecular biology of rice[J]. *Science*, 1995, 270(5243): 1772-1773.
- [27] YANG G L, FANG Y, XU Y L, et al. Frond transformation system mediated by *Agrobacterium tumefaciens* for *Lemna minor*[J]. *Plant Molecular Biology*, 2018, 98(4): 319-331.
- [28] 吴荣荣, 汪阳忠, 潘晓璐, 等. 烟草瞬时表达技术的多途径应用研究进展[J]. *中国烟草科学*, 2024, 45(5): 114-120.  
WU R R, WANG Y Z, PAN X L, et al. Advances and prospects of research on multi-pathway applications of tobacco transient expression technology[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2024, 45(5): 114-120.
- [29] 郎宸用. 拟南芥 MEP 途径关键酶及代谢中间产物对萜类化合物生物合成的调控[D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
LANG C Y. Regulation of key enzymes and metabolic intermediates in MEP pathway on terpenoid biosynthesis in *Arabidopsis thaliana*[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [30] ADAMS J P, ADELI A, HSU C Y, et al. Plant-based FRET biosensor discriminates environmental zinc levels[J]. *Plant*

- Biotechnology Journal, 2012, 10(2): 207-216.
- [31] 邓接楼, 王爱斌, 涂晓虹. 秋水仙素对杂交水稻发芽率及主要农艺性状的影响[J]. 上饶师范学院学报, 2014, 34(3): 53-59.  
DENG J L, WANG A B, TU X H. Effects of colchicine on germination rate and major agronomic traits of hybrid rice[J]. Journal of Shangrao Normal University, 2014, 34(3): 53-59.
- [32] SONG Y J, HU Z L, LIU S Z, et al. Utilization of microalgae and duckweed as sustainable protein sources for food and feed: nutritional potential and functional applications[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(8): 4466-4482.
- [33] 唐娅丽, 于昌江, 刘宇, 等. 浮萍合成生物学研究进展[J]. 生命科学, 2020, 32(2): 100-109.  
TANG Y L, YU C J, LIU Y, et al. Advances in synthetic biology of duckweed[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2020, 32(2): 100-109.
- [34] 中国农业科学院深圳农业基因组研究所(岭南现代农业科学与技术广东省实验室深圳分中心). 一种氧甲基转移酶及其在生物合成异噁皮啶和噁皮啶中的应用: CN202411992792.5[P]. 2025-04-04.  
Shenzhen Institute of Agricultural Genomics, Chinese Academy of Agricultural Sciences(Shenzhen Branch Center of Lingnan Modern Agricultural Science and Technology Guangdong Laboratory). An oxymethyltransferase and its application in the biosynthesis of isoxaziridine and ziridine: CN202411992792.5[P]. 2025-04-04.
- [35] 浙江大学. 一种利用多基因共表达在植物中异源合成人参皂苷Rg3的方法: CN202310573134.1[P]. 2023-09-05.  
Zhejiang University. A method for heterologous synthesis of ginsenoside Rg3 in plants using multi-gene co-expr: CN202310573134.1[P]. 2023-09-05.
- [36] 重庆大学. 一种可提升广藿香醇合成量的融合基因及方法: CN202211273337.0[P]. 2024-09-17.  
Chongqing University. A fusion gene and method to enhance patchouli alcohol synthesis: CN202211273337.0[P]. 2024-09-17.
- [37] 山东大学. 一种黄酮合酶 I /黄酮-3-羟化酶及在黄酮类化合物合成领域的应用: CN202210565180.2[P]. 2023-08-22.  
Shandong University. A flavonoid synthase I /flavanone-3-hydroxylase and its application in flavonoid synthesis: CN202210565180.2[P]. 2023-08-22.
- [38] 中国农业科学院生物技术研究所. 一种高效人工根际联合固氮体系: CN202010435008.6[P]. 2020-05-21.  
Institute of Biotechnology, Chinese Academy of Agricultural Sciences. An efficient artificial rhizosphere combined nitrogen fixation system: CN202010435008.6[P]. 2020-05-21.
- [39] SMITH J K, SCHLOSS J V, MAZUR B J. Functional expression of plant acetolactate synthase genes in *Escherichia coli*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1989, 86(11): 4179-4183.
- [40] CAPARCO A A, GONZÁLEZ-GAMBOA I, CHANG-LIAO S, et al. A plug-and-play strategy for agrochemical delivery using a plant virus nanotechnology[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2024, 26(12): 280.
- [41] TIAN C F, LI J H, WU Y H, et al. An integrative database and its application for plant synthetic biology research[J]. Plant Communications, 2024, 5(5): 100827.
- [42] NIELSEN A A K, DER B S, SHIN J, et al. Genetic circuit design automation[J]. Science, 2016, 352(6281): aac7341.
- [43] BANF M, RHEE S Y. Computational inference of gene regulatory networks: approaches, limitations and opportunities [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) -Gene Regulatory Mechanisms, 2017, 1860(1): 41-52.
- [44] MENG X Y, ZHANG H X, MEZEI M, et al. Molecular docking: a powerful approach for structure-based drug discovery[J]. Current Computer-Aided Drug Design, 2011, 7(2): 146-157.
- [45] KONG C, YANG Y, QI T C, et al. Predictive genetic circuit design for phenotype reprogramming in plants[J]. Nature Communications, 2025, 16: 715.
- [46] 朱新广, 常天根, 宋青峰, 等. 数字植物: 科学内涵、瓶颈及发展策略[J]. 合成生物学, 2020, 1(3): 285-297.  
ZHU X G, CHANG T G, SONG Q F, et al. ePlant: scientific connotations, bottlenecks, and development strategies[J]. Synthetic Biology Journal, 2020, 1(3): 285-297.
- [47] 李星坤, 潘慧, 李攀, 等. 基于 CRISPR/Cas9 系统的拟南芥 *ugt84a1/ugt84a2* 双突变体制作及突变位点分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(20): 49-55.  
LI X K, PAN H, et al. Construction of *Arabidopsis ugt84a1/ugt84a2* double mutant and analysis of mutation site based on CRISPR/Cas9 system[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(20): 49-55.
- [48] 蔡波, 李晓晓, 张凌寒, 等. CRISPR/Cas9 技术联合脂质体转染子宫内腺癌细胞单质粒基因敲除方法首次编辑免疫相关基因 HLA-DRA[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(15): 2356-2362.  
CAI B, LI X X, ZHANG L H, et al. Editing immune-related gene HLA-DRA for the first time by CRISPR/Cas9 technology combined with liposome transfection of endometrial cancer cells with single-plasmid gene knockout method[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2023, 27(15): 2356-2362.
- [49] 李淑萍. 农杆菌 T-DNA 导入植物基因组的分子机理[J]. 河南农业科学, 2005, 34(4): 16-21.  
LI S P. Molecular mechanisms of *Agrobacterium* T-DNA integration into plant genomes[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2005, 34(4): 16-21.
- [50] OZYIGIT I I, YUCEBILGILI KURTOGLU K. Particle

- bombardment technology and its applications in plants[J]. *Molecular Biology Reports*, 2020, 47(12): 9831-9847.
- [51] ALTPETER F, BAISAKH N, BEACHY R, et al. Particle bombardment and the genetic enhancement of crops: myths and realities[J]. *Molecular Breeding*, 2005, 15(3): 305-327.
- [52] KESHAVAREDDY G, KUMAR A R V, RAMU V S. Methods of plant transformation- a review[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2018, 7(7): 2656-2668.
- [53] GAD A E, ROSENBERG N, ALTMAN A. Liposome-mediated gene delivery into plant cells[J]. *Physiologia Plantarum*, 1990, 79(1): 177-183.
- [54] SU W B, XU M Y, RADANI Y, et al. Technological development and application of plant genetic transformation [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(13): 10646.
- [55] KAEPLER H F, GU W, SOMERS D A, et al. Silicon carbide fiber-mediated DNA delivery into plant cells[J]. *Plant Cell Reports*, 1990, 9(8): 415-418.
- [56] SHIVASHAKARAPPA K, MARRIBOINA S, DUMENYO K, et al. Nanoparticle-mediated gene delivery techniques in plant systems[J]. *Frontiers in Nanotechnology*, 2025, 7: 1516180.
- [57] DENG X W, CAO M J, ZHANG J K, et al. Hyaluronic acid-chitosan nanoparticles for co-delivery of MiR-34a and doxorubicin in therapy against triple negative breast cancer[J]. *Biomaterials*, 2014, 35(14): 4333-4344.
- [58] LV Z Y, JIANG R, CHEN J F, et al. Nanoparticle-mediated gene transformation strategies for plant genetic engineering[J]. *The Plant Journal*, 2020, 104(4): 880-891.
- [59] HAMERS R J. Nanomaterials and global sustainability[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2017, 50(3): 633-637.
- [60] CUNNINGHAM F J, GOH N S, DEMIRER G S, et al. Nanoparticle-mediated delivery towards advancing plant genetic engineering[J]. *Trends in Biotechnology*, 2018, 36(9): 882-897.



**通讯作者:** 何玉池(1974—),女,博士,二级教授,国家级实验教学示范中心主任。研究方向为植物合成生物学与代谢工程。

E-mail: hyc@hubu.edu.cn



**共同通讯作者:** 甘露(1985—),女,博士,讲师。研究方向为植物合成生物学与代谢工程。

E-mail: ganlu@hjnu.edu.cn



**第一作者:** 何杨昱(2003—),男,本科,湖北大学生物工程专业在读。研究方向为植物合成生物学。

E-mail: 1210037876@qq.com