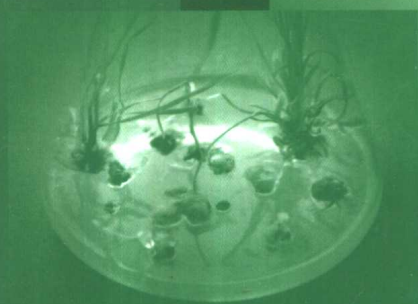
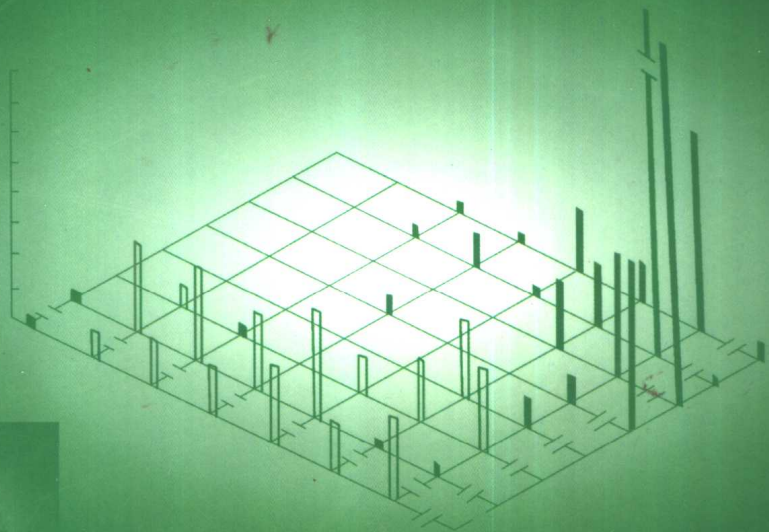


“十五”国家重点图书

现代生物技术丛书

植物细胞工程

朱至清 编著



化学工业出版社

现代生物技术与医药科技出版中心

现代生物科学丛书

植物细胞工程

王德成 主编



科学出版社

“十五”国家重点图书

现代生物技术丛书

植物细胞工程

朱至清 编著

化学工业出版社

现代生物技术与医药科技出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

植物细胞工程/朱至清编著. —北京: 化学工业出版社, 2003. 5 (现代生物技术丛书)
ISBN 7-5025-4098-9

I. 植… II. 朱… III. 植物-细胞工程
IV. Q943

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 030863 号

现代生物技术丛书

植物细胞工程

朱至清 编著

责任编辑: 叶 露 周 旭

文字编辑: 胡全胜

责任校对: 陶燕华

封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
现代生物技术与医药科技出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 14½ 插页 2 字数 344 千字

2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4098-9/Q · 29

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

建立在分子生物学、分子遗传学、生物化学、微生物学、细胞学以及化工、计算技术等基础之上的现代生物技术(生物工程),是20世纪后半期国际上突飞猛进的技术领域之一,它为人类保健、农牧业、食品工业、环境保护以及精细化工等产业的发展提供了前所未有的动力。展望新世纪,可以预料生物技术的前景更为光辉灿烂。本丛书将就该领域的研究动态逐个进行详细介绍,这里我们仅概述其突出进展与读者分享。鉴于各领域发展迅速和编者水平有限,丛书定有遗漏和不足之处,敬请读者指正。

一、基因组和后基因组学

人类基因组计划(HGP)正式启动于1990年,这是一个跨世纪、跨国界的最伟大的生命科学工程,经美、英、法、德、日、中6国的合作和努力,已于2001年完成全部序列测定。这一成就可以与原子弹计划和登月计划相媲美。它将对生命科学和人类健康产生巨大影响。应用各种技术,上千个与疾病相关的基因已被定位,并有近百个疾病基因被克隆。毫无疑问,这将为新药研究设计和疫苗制备提供依据,且已有多个物质进入临床试验。

与此同时,小家鼠、果蝇、线虫、拟南芥、水稻、啤酒酵母,以及多种真菌、细菌的基因组研究相继开展,其中拟南芥基因组的全序列测定业已完成。由于微生物的基因组远小于多细胞真核生物,且细菌和酵母基因中不存在内含子,因而便于分析,迄今已在酵母基因组中发现了一些与人类疾病基因同源的基因,研究这些基因在酵母中的生理功能,将有助于了解相关疾病的发病机理。

今天,一个崭新的领域——生物信息学迅速发展,它将基因的结构、蛋白质功能以及物种的进化在基因信息的基础上统一起来。这一学科的发展,对基因组和后基因组学研究及对人类健康和农业发展将产生深远的影响。

二、基因工程(重组DNA技术)

体外DNA重组技术始于1972年,首先在大肠杆菌中获得成功,继而扩展到其他微生物,生产出了多种新型发酵产品。美国批准上市的基因工程产品有人类胰岛素、人类生长因子、白介素、干扰素、牛型生长激素疫苗等,并不断有新的品种进入临床应用。重组微生物的应用,也为高等生物作为表达外源基因的宿主提供了技术和经验,如哺乳动物细胞株、昆虫细胞株、转基因动物、转基因植物,都有可能作为生产需要糖基化的重组蛋白质的宿主。

我国基因工程研究起步较晚,自1986年“863”计划实施以来,生物技术药物的研究和产业化获得迅猛发展,至1998年已有14种基因工程药物、3个基因工程疫苗和数十个重组诊断试剂投放市场。

三、转基因作物及其他农业生物工程

农业生物技术中最重要的是转基因作物 (GMC)。近十年间 GMC 发展速度极快, 1996~2001 年全球 GMC 的种植面积增长了 30 倍。2000 年达 4 420 万公顷, 比 1999 年增长 11%, 2001 年又在 2000 年的基础上增长 19%, 达 5 260 万公顷。GMC 种植面积占相关作物全球种植面积的比例依次为: 大豆 46%、棉花 20%、油菜 11%、玉米 7%。

我国 GMC 的种植面积在 13 个国家中居第四位。国产转基因 Bt 抗虫棉的育成和推广, 开创了国内基因工程农业应用的成功范例, 仅 2001 年种植面积达 60 万公顷。抗虫棉的杀虫性强, 农药用量可减少 70%~80%, 既降低了用工成本, 又保护了环境。

继获得第一代 GMC (抗除草剂、抗虫、抗病等) 之后, 第二代转基因作物已呼之欲出, 重点是进一步改良作物品质, 提高其营养水平 (如“金稻米”等), 或以植物作为生物反应器生产医疗保健产品 (如口服疫苗等)。同时, 针对旱、涝、盐碱、低温等恶劣自然环境, 培育各类抗逆作物。

此外重组根瘤菌、重组联合固氮菌, 抗病杀虫重组微生物的开发和应用也取得了明显的成效。

四、克隆动物及转基因动物

动物体细胞克隆技术的发展为生产蛋白质类药物、器官移植、挽救珍稀濒危动物以及培育优良品种等奠定了基础。最近, Wilmut 等用山羊胚胎的核转入去核未受精的卵母细胞, 产生了克隆动物——Dolly 羊, 成为科学上的重大突破, 并在多种动物中得到重复。

转基因动物的成功引导了一种新型制药工业, 即利用转基因山羊、绵羊和乳牛的乳汁来生产治疗人类疾病的蛋白类药物。转基因动物发展的另一动向是克隆修饰的猪, 为人体器官移植提供外源器官, 以缓解临床上对人体器官的迫切需求。

体细胞克隆山羊在我国的上海市转基因研究中心及陕西的中国杨凌克隆动物基地都获得了成功。

五、细胞工程和组织工程

多年来我国植物组织培养和细胞工程研究在国际上是领先的。我国学者通过花药和花粉单细胞培养培育出烟草、水稻、小麦、大麦、油菜、甘蔗等作物的新品种、新品系, 种植面积逾 100 万公顷。脱病毒快速繁殖的主要作物有香蕉、马铃薯、甘蔗、木薯、香草兰、草莓、柑橘、苹果、葡萄、花卉和观赏植物。紫草、三七等植物细胞已可在发酵罐中大量培养。我国的传统中药涉及 5 000 种左右植物, 细胞培养是中药资源开发的一个重要方面。

我国学者在动物细胞工程方面也作出了重要贡献。例如亲缘关系远近不同的鱼类可进行各种核质组合, 在变种间、属间及科间都获得了具有独特性状的

核质重组鱼。

动物发育工程中另一重大进展是干细胞株的建立，这已成为国际上研究的热点。干细胞是指未充分分化、但具有再生为各种组织器官和个体潜在功能的细胞。血液干细胞能够分化、生成整个血液系统，用造血干细胞移植来治疗白血病和一些遗传血液病，是医学界正在探索的课题。最近，以色列科学家首次从胚胎干细胞培养出人类心脏组织，它可以正常跳动，并且有新生心脏组织的电特性和机械特性。波兰科学家用脐血干细胞成功地培育出了脑细胞，有可能被用于帕金森病、脑震荡等疾病的治疗和脑部损伤的修复。美国科学家最近成功地将胚胎干细胞分化成人类骨髓中的造血先驱细胞，并进一步培养成红血球、白血球和血小板。这些结果预示着人类有可能获得取之不尽的血源。我国科学家已成功地将干细胞体外培养成胃和肠黏膜组织，这是继利用干细胞原位培养皮肤组织全能修复之后，人类再生组织器官方面的又一重大成果。

六、环境生物工程

我国是环境污染较严重的国家，环境生物工程在防治各种污染中将起重要作用。众所周知，油轮海上倾油可引起大面积海域污染，国外虽采用“超级细菌”（含有多个降解烃类的质粒）进行海面浮油处理，但其效果尚有待改进。化学农药对土壤的污染虽可用具专一性降解能力的特种细菌处理，但作用也甚缓慢。相对而言，较为先进的方法是采用可被降解的生物农药。此外，河流、湖泊水域的污染防治、酸雨危害以及城市垃圾的处理等，也都是亟待解决的问题。

七、酶工程

酶工程是现代生物技术的重要组成部分，其特点是利用酶、含酶细胞器或细胞（微生物、植物、动物）作为生物催化剂来完成某些重要的化学反应。应用范围包括医药、食品、化学工业，诊断分析和生物传感器等。涉及的品种不少，诸如糖化酶、淀粉酶、洗涤用酶以及 β -内酰胺抗生素生产有关的青霉素酰化酶、7-ACA酰化酶等，其市场需求、生产规模和产值均很可观，并已产生巨大的经济效益。随着酶的大量应用，各种酶反应器和固定化技术应运而生，更进一步地推动了酶工程的发展。

当代酶工程发展的趋势之一是寻找耐极端条件的酶，如耐高温、耐酸碱、耐盐等。这些酶存在于嗜高温、嗜酸碱、嗜高盐的细菌中。近年来对这些细菌的研究进展迅速，这将为酶工业提供源源不断的新型酶类。

八、新型能源和清洁能源的开拓

随着化石能源逐年减少，再生能源的研制开发已备受国际关注。虽然我国石油和煤炭储量丰富，但从长远考虑，还需对这一课题予以重视。展望未来，新型能源，特别是清洁能源的开发很有必要。

氢气是无污染的清洁能源，燃烧后不产生二氧化碳、硫、氮氧化物等有害物质，国外的燃氢汽车已研制成功。产氢的微生物甚多，值得重视的是光合细

菌，该菌可利用工业废水产氢，同时具有农用肥效的作用。

巴西和美国是燃料乙醇生产技术和商业应用比较成熟的国家。作物秸秆、废报纸等生物材料是生产再生能源的最廉价原料，所生产的燃料乙醇成本可低到每加仑 1.10 美元，虽然仍高于每加仑 0.80~0.90 美元的汽油批发价，但随着技术的改进，生产成本将会逐步降低。

九、新型生物传感器的研制

要研制新型生物传感器，需要新型的酶和生物材料，这些酶需能耐高温、酸、碱或低温。已发现的这类特殊生物材料有嗜盐细菌的紫膜，这是一种光敏材料，可转化光子为 ATP。另一个例子是磁细菌细胞中的微小磁石 (Fe_3O_4)，对细胞起导航作用。当代正竞相研制 DNA 芯片，以色列学者已用其建成简单的计算机。

生物传感器应用范围广泛，包括临床检测、免疫反应、反应罐过程检测、环保毒物检测等，不胜枚举。

十、生化工程

包括发酵工艺、过程检测与控制、反应模型建立、反应器的设计和应用，以及包括产品提取纯化、包装在内的下游加工工艺等方面，这是生物技术产业化的最后重要过程。

本丛书以应用生物技术为主，包括必要的基础知识和前景展望。丛书包括 15 个分册，即基因工程、蛋白质工程、酶工程、生物信息学、植物细胞工程、动物细胞工程、微生物工程、生物制药技术、高级生物传感器、环境生物工程、农业生物工程、糖生物工程、生物技术与疾病诊断——兼论基因治疗、组织工程、生物工程下游技术。

每册均由工作在第一线的专家撰写，概要阐述了国内外生物技术的进展和趋势。期望本丛书的出版能够对推动我国生物技术的研究开发及产业化作出微薄的贡献。

编者衷心寄语青年朋友，认识生物技术的光辉前景，祝愿你们以聪明才智为我国的生物技术作出创新贡献。

焦瑞身 贾士学

2002 年 1 月

前 言

植物细胞工程(plant cell engineering 或者 plant cell biotechnology) 是一种利用离体培养细胞进行遗传操作, 实现植物品种改良的生物技术。细胞工程和基因工程是现代植物生物技术两个不可分割的组成部分。虽然基因工程也采用一些细胞工程的技术, 但是细胞工程本身是一种独立的、自成体系的生物技术。细胞工程在细胞或亚细胞的水平上进行遗传操作, 并不涉及重组 DNA 和有害外源基因的导入, 基本上不存在生物安全问题, 所以细胞工程是一种安全的生物技术, 也可以说是“绿色的”生物技术。正因为如此, 近年来细胞工程又重新受到人们的重视。

高等植物是多细胞的有机体, 无法在整体水平上进行遗传操作, 只有通过离体培养使植物细胞或小块的组织在离体培养条件下生长、发育和分化, 再生完整植株, 才可能使细胞水平上的遗传操作传递到植物体, 实现植物的品种改良。因此植物细胞工程是建立在植物离体组织培养基础上的一种生物工程技术。

细胞工程的理论基础是细胞学说和细胞全能性学说。100 年前, 德国学者 Haberlandt (1902 年) 发表了著名论文《植物细胞离体培养实验》, 提出了细胞全能性的观点。他认为, 作为高等植物的器官和组织基本单位的细胞有可能在离体培养条件下实现分裂分化, 乃至形成胚胎和植株。由于当时知识和技术的局限, 他们的实验未能成功, 但是却开辟了植物学的新领域——植物组织和细胞培养。20 世纪中叶, 植物细胞组织培养与细胞的遗传操作相结合, 发展成为植物细胞工程, 它不仅推动了植物科学的发展, 而且对农林业乃至医药工业的发展产生了重要的影响。

在 Haberlandt 进行组织培养试验之后不久, Hannig (1904 年) 尝试了幼胚的离体培养, 使萝卜属 (*Raphanus*) 和辣根菜属 (*Cochlearia*) 植物的未成熟胚在含有糖、无机盐、氨基酸和植物提取物的培养基上发育成熟。从 20 世纪 20 年代起, 幼胚培养被育种家们用来挽救远缘杂交时早期败育的胚胎, 因此可以认为, 幼胚培养和胚胎拯救 (embryo rescue) 技术是最先应用的植物细胞工程技术。

20 世纪 30 年代植物组织技术基本建立, 以琼胶 (洋菜) 为基质的人工合成培养基被广泛应用。由于生长素 B 族维生素在培养基中的应用, 1937~1939 年 White、Gautheret 和 Nobercourt 分别建立了植物组织的连续培养物, 使离体的植物组织可以在人工培养基上不断生长, 从而奠定了现代组织培养的基础。

从离体培养的组织或细胞再生完整植株是植物组织培养和细胞工程研究的核心问题。1948 年 Skoog 和 Tsui (崔激) 首先解决了这一问题。他们在培养烟草的茎段组织时发现, 向培养基中添加 40mg/L 的腺嘌呤不仅能够促进薄壁细胞的分裂, 而且能够使增殖的细胞通过器官发生再生完整的植株。这项研究的重要性在于首次发现一种简单的化合物 (腺嘌呤) 可以诱导细胞启动复杂的器官发生过程, 使体细胞再生完整植株, 这是植物组织培养的一个重要的转折点。在上述研究的基础上, Skoog 实验室的 Miller 于 1955 年发现腺嘌呤的类似物激动素 (6-呋喃氨基嘌呤), 其诱导细胞增殖和芽分化的作用比腺嘌呤强 3 万倍。1958 年 Steward 使悬浮培养的单个胡萝卜细胞形成体细胞胚, 不仅最终用实验证明了 Haberlandt

的植物细胞全能性学说, 而且使细胞的遗传操作成为可能。

植物组织培养用于种苗繁殖, 形成了植物细胞工程的重要分支——植物茎尖培养与脱病毒快速繁殖。我国学者罗士韦教授是国际上最早研究茎尖培养的学者, 他在 1945 年建立了一种在合成培养基上连续培养石刁柏(*Asparagus officinalis*)茎尖的方法。继罗士韦之后, Ball (1946 年) 培养了长度仅有 40~60 μm 带有 1~2 个叶原基的羽扇豆属(*Lupinus*)和旱金莲属(*Tropaeolum*)的幼小茎尖, 使它们长成植株, 并且移栽成活。Morel and Martin (1952 年) 的研究揭示了茎尖培养在园艺和农业上的应用前景, 他们首次发现从已经被病毒感染的大丽花(*Dahlia*)植株的茎尖可以培养出无病毒植株。后来 Morel (1960 年) 又利用茎尖培养获得无病毒的观赏兰花, 而且建立了通过原球茎的继代培养, 周年生产兰花试管苗的方法, 并且指出, 在一年之内从一个兰花的茎尖有可能生产出 400 万棵试管苗。此后欧美等国出现了以茎尖培养为基础的兰花、马铃薯和草莓等植物的脱毒试管苗工厂, 形成最早的植物细胞工程产业。

20 世纪 60 年代末兴起的植物单倍体技术是一项在植物育种上用途广泛的细胞工程技术。1966 年印度学者 Guha 和 Maheshwari 通过培养未成熟花药使毛叶曼陀罗(*Datura innoxia*)的花粉发育为单倍体的胚状体和植株。此后不久, 烟草和水稻的花药培养也获得成功。由于单倍体植物加倍之后即成为纯合二倍体, 在育种上可以从杂种快速获得稳定的后代, 因此受到育种学家的极大重视。我国学者自 1972 年以来, 已经在 30 多种经济植物上通过花药培养或花粉培养获得单倍体或加倍单倍体植株, 并且显著改进了花药培养方法, 通过花粉植株培育出烟草、水稻、小麦和油菜新品种 20 余个。近年来利用未受精子房培养和远缘花粉授粉诱导单倍体的技术也受到育种学家的重视。三倍体在育种上也有重要价值, 因为它具有较强的生长优势和能够产生无子果实。20 世纪 70 年代末, 我国研究者利用胚乳培养获得了多种果树和园艺植物的胚乳植株, 其中一部分是三倍体, 表明胚乳培养在三倍体育种上具有应用前景。

大约在花药培养兴起的同时, 原生质体培养和体细胞杂交也在英、日、德、美等国获得成功。截至 1995 年, 世界上约有 180 种植物的原生质培养再生植株取得成功, 其中约 50 种是由我国研究者首先完成的, 可见我国的原生质体培养研究在世界上占有重要的地位。我国学者利用原生质体进行体细胞杂交也取得一些进展, 共获得十余种体细胞种间杂种。体细胞远缘杂种由于存在生殖障碍和遗传不稳定性, 一般不能直接用于育种, 但是可以作为从远缘亲本导入外源基因的一种手段。近年来原生质体被用作基因工程的受体, 也受到人们的关注。

1981 年, Larkin 和 Scowcroft 评述了大量的组织培养文献后指出, 再生植株中变异株的出现是一种普遍的现象。他们把这种由组织培养诱发的变异叫做体细胞无性系变异, 由此产生的变异株叫做细胞突变体。利用无性系变异, 经过离体或田间筛选获得有用的细胞突变体, 是一种新的细胞工程育种途径。1990 年以来, 我国研究者利用无性系变异选育出了高糖甘蔗、高蛋白小麦、耐盐小麦、高赖氨酸玉米和细胞质雄性不育水稻等新品系, 还有早熟高产大麦新品种。同时还利用小麦远缘杂种的体细胞培养和花药培养中的无性系变异, 得到许多代换系, 以及抗白粉病和抗黄矮病的易位系, 它们在小麦抗病育种上有利用价值。

植物细胞大量培养生产有用的次生代谢产物是植物细胞工程另一个重要的领域。早在 1964 年我国就开始进行人参细胞培养, 1980 年以后, 我国研究者相继开展了紫草、新疆紫草、三七、红豆杉、青蒿、红景天和水母雪莲等植物的细胞大量培养的研究, 并利用生物反

反应器进行药用植物细胞大量培养的小试和中试。其中新疆紫草中试的规模达到 100L 反应器的水平,并小批量生产了紫草素,用于研制化妆品及抗菌、抗病毒和抗肿瘤的药品。红豆杉细胞大量培养在我国也获得初步成功,从细胞培养物中得到了贵重的抗癌药品紫杉醇,但产率还有待提高。

1973 年,在烟草冠瘿瘤培养物中发现了来源于农杆菌的 Ti 质粒,它可以自发地整合到植物的基因组中去,由此开始了植物重组 DNA 和基因工程的研究。近 20 年来,细胞工程技术被广泛用于植物的基因转化,于是细胞工程和基因工程紧密结合,构成了现代植物生物技术的主体。

20 世纪 90 年代以来,虽然基因工程成为生物技术的主流,但是细胞工程并未失去独立存在的价值,它继续在优良苗木繁育、农作物育种和植物天然药物的开发中起着举足轻重的作用。近年来在国外有关生物技术的刊物上,植物细胞工程的文章在数量上仍占有相当大的比例,而且出现了一些新的生长点,例如离体受精与合子培养。细胞工程中存在的一些难题和基础问题,诸如植株再生的基因型差异、细胞脱分化和器官发生的基因调控以及无性系变异的原因等,也继续受到植物细胞生物学家和分子生物学家的关注。因此撰写一本新书来反映植物细胞工程领域已有的成果和目前的动态,仍然十分必要。然而,当我接受本丛书的主编焦瑞身教授的建议和鼓励,并着手编写《植物细胞工程》分册时,却感到十分为难。原因之一是,面对本领域浩瀚的文献和迅速的进展,感到力不从心。另一个原因是,1987 年以来陆续出版了几本优秀的有关植物细胞工程的书籍,例如许智宏院士主编的《植物生物技术》、胡含和王恒立教授主编的《植物细胞工程与育种》、孙敬三和桂耀林教授主编的《植物细胞工程实验技术》以及孙敬三和陈维伦教授主编的《植物生物技术和作物改良》等。在这几本著作中,专家们已经对植物细胞工程各个领域的进展作过全面的论述,后来者恐怕无人能出其右。编著者怀着惶恐的心情,写完了这本《植物细胞工程》分册,希望本书在系统性和反映我国学者的成果方面有其特色。虽然本书力图尽量多地引用本领域的最新进展,但是由于时间所限,在这方面肯定有许多遗漏和不足。

本书的写作得到国内许多著名植物细胞生物学家和植物细胞工程专家的帮助。在本书的写作过程中,我的老师,北京大学的胡适宜教授和朱激教授一直给我以启发和鼓励。中国科学院遗传研究所的胡含教授,中国科学院植物研究所的孙敬三教授、叶和春教授、陈维伦教授、郭仲琛教授、母锡金教授、刘公社教授和赵德修教授,以及厦门大学的田惠桥教授都为本书提供了有价值的文献,并慷慨地允许引用反映他们的重要研究结果的图表或照片。在写作的后期,收到了杨弘远院士和周嫦教授赠送的、反映他们多年研究成果的专著《植物有性生殖实验研究四十年》,以及胡适宜和杨弘远院士赠送的《植物受精生物学》,这两本书帮助我顺利地完成了与生殖细胞工程有关的章节。在此对所有给与支持与帮助的专家表示最诚挚的感谢。

朱至清

2003 年 1 月于中国科学院植物研究所

“现代生物技术丛书”编委会

编委会主任 焦瑞身

编委会成员 (以姓氏汉语拼音为序)

郭礼和 中国科学院上海生物化学与细胞生物学研究所 研究员

贾士荣 中国农业科学院生物技术中心 研究员

焦瑞身 中国科学院上海植物生理生态研究所 研究员

伦世仪 江南大学 中国工程院院士 教授

俞俊棠 华东理工大学 教授

张树政 中国科学院微生物研究所 中国科学院院士 研究员

朱宝泉 上海医药工业研究院 研究员

本册编写人员

朱至清 中国科学院植物研究所 研究员

内 容 提 要

本书介绍了植物细胞工程的原理、基本方法及其在农业和医药工业上的应用。第三章至第十一章介绍了植物细胞工程的各分支领域的进展和实验技术，并列举了许多操作实例，具有很强的实用性。第十二章介绍了无融合生殖的潜在价值，具有较高的前瞻性。

本书较全面地反映了我国学者在植物细胞工程领域的贡献，许多研究方法是我国学者的研究成果，适合于我国的具体情况。本书也引用了大量的国外文献，以供读者进行深入研究时参考。

本书可供植物生物技术和育种领域的科研人员参考，也可作为综合大学、师范院校、医学院校、农业院校的医药、农业等专业的教学用书。

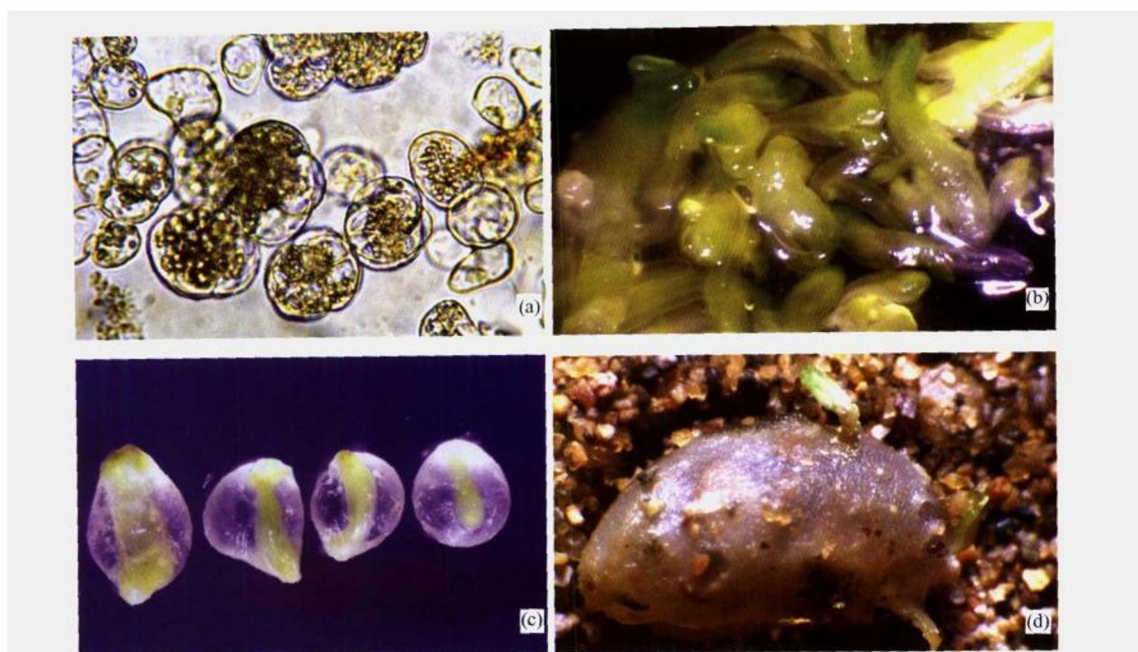


图 6-3 芹菜人工种子的制备过程

(a) 培养的细胞和细胞团；(b) 成熟的胚状体；(c) 人工种皮包埋制成的人工种子；
(d) 人工种子在土壤中萌发(郭仲琛教授提供照片)

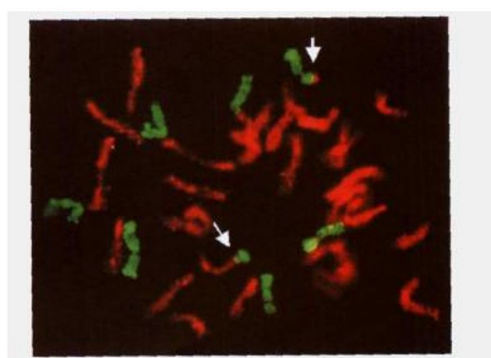


图 7-4 普通小麦×硬粒小麦-簇毛麦双二倍体杂种愈伤组织细胞中的染色体易位
簇毛麦染色体发绿色荧光, 箭头指示易位的染色体

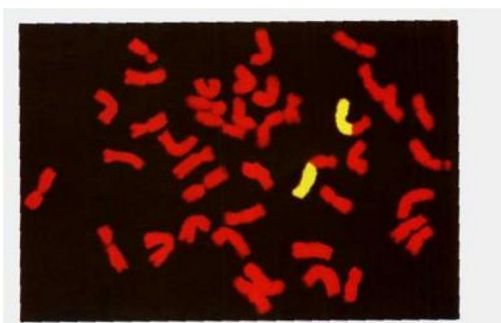


图 7-5 花药培养获得的 6RL-6BS 易位系
DH644-28 根尖细胞的分子原位杂交图像
黑麦染色体长臂 6RL 发黄色荧光(张相岐教授提供照片)

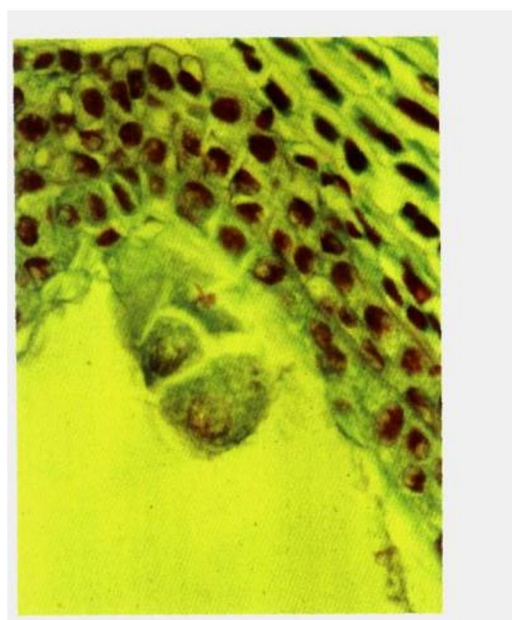


图 8-3 小麦×玉米杂种合子
第一次分裂后染色体的排除
(孙敬三教授提供照片)



图 8-4 由半配合产生的单倍体枝条呈黄绿色
(孙敬三教授提供照片)

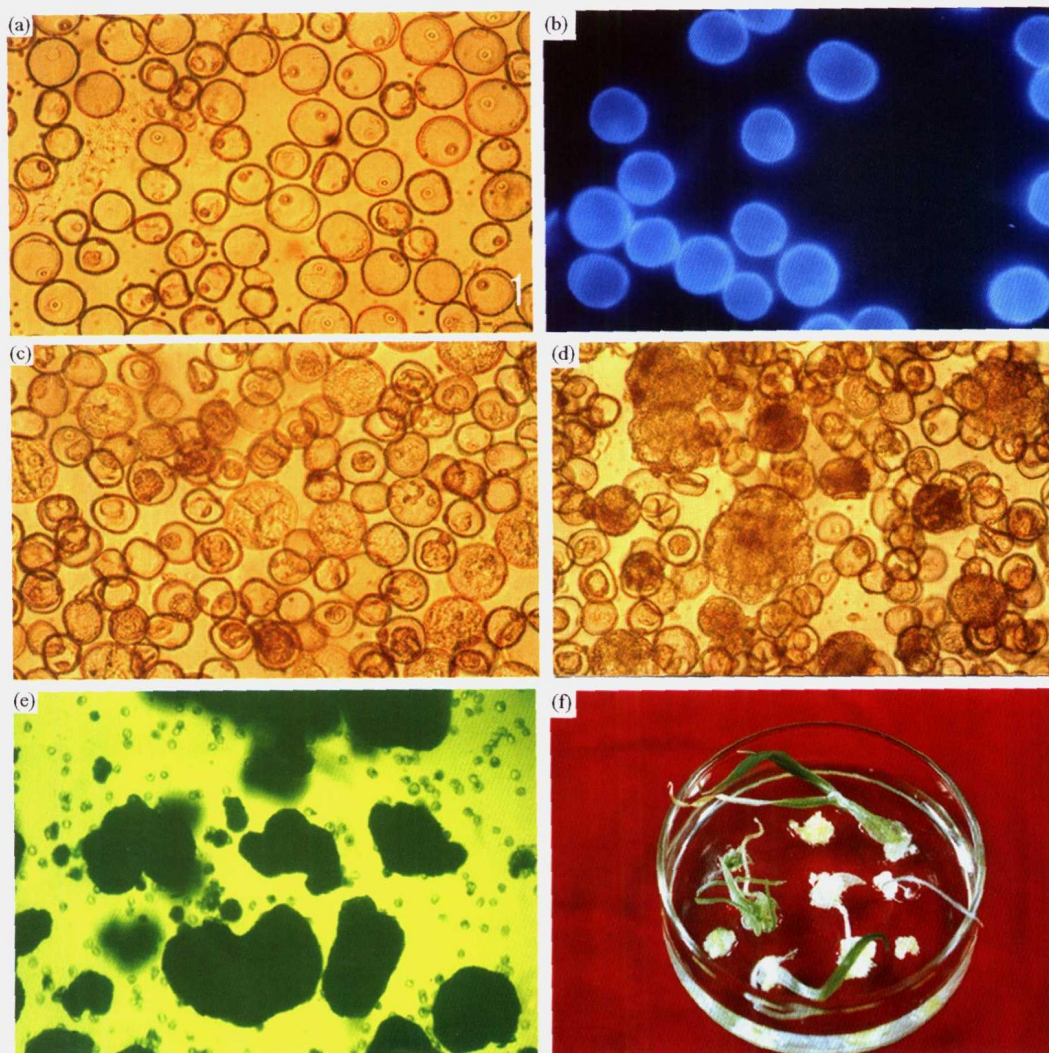


图 8-8 大麦游离小孢子形成花粉植株的过程
(胡含教授提供照片)

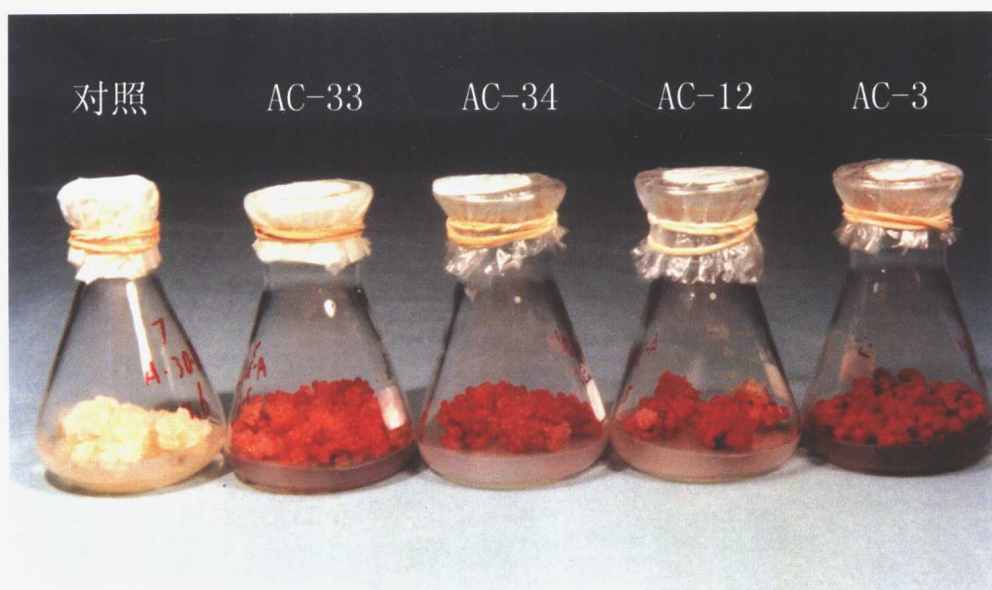


图 10-1 通过选择得到的紫草高产细胞系及其对照
(叶和春教授提供照片)

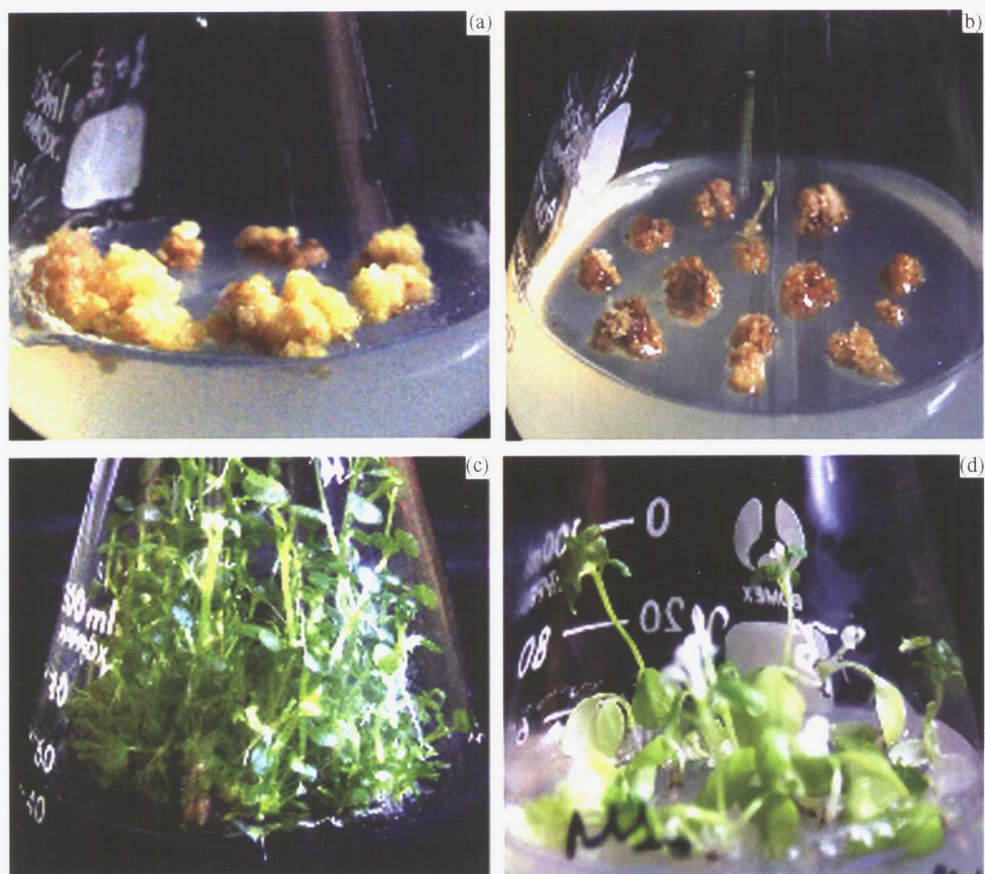


图 11-6 豆瓣菜愈伤组织的转化与植株再生

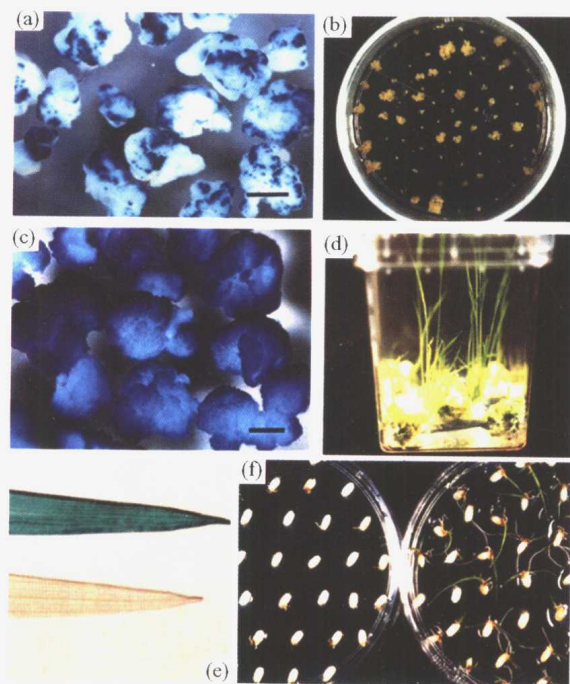


图 11-8 水稻品种 Tsukinohikari 盾片愈伤组织的转化和植株再生

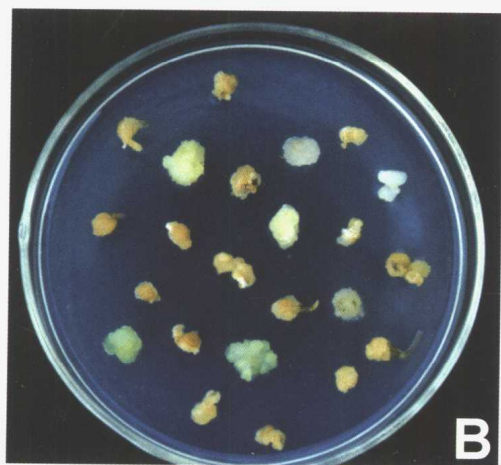


图 11-13 转化后的小麦幼胚产生的
抗 PPT 的小麦愈伤组织(白色)



图 11-14 抗 PPT 的小麦再生植株