

现代生命科学基础丛书

13

高级植物分子生物学

葛莘 编著



科学出版社

www.sciencep.com

现代生命科学基础丛书

高级植物分子生物学

葛 莘 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者在授课讲义的基础上进一步完善而成的。全书分为9章,论述了分子生物学与植物分子生物学简史、植物的基因组与基因组学、基因的结构、基因的表达与调控、基因的功能分析、植物细胞的信号转导、植物的细胞分化和器官发育、植物生物技术等内容,并附有植物学和分子生物学词汇。所有章节均先介绍基本知识和理论,然后讲述相关的专题。这些专题都是近年来植物分子生物学的重大突破,因此具有很高的科学意义和现实意义。同时,通过讲评经典的科学论文来达到培养学生能力的目的。

本书图文并茂,适合作为高等院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高级植物分子生物学/葛莘编著:—北京:科学出版社,2004.8

(现代生命科学基础丛书)

ISBN 7-03-012478-2

I. 高… II. 葛… III. 植物学:分子生物学 IV. Q.946

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第058704号

责任编辑:马学海 王 静 彭克里 孙晓洁/责任校对:宋玲玲

责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2004年8月第一次印刷 印张:35

印数:1—2 500 字数:794 000

定价:75.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

《现代生命科学基础丛书》编委会

主 编：许根俊

副主编：沈倍奋 乔守怡 马克平 王克夷

编 委：(按汉语拼音排序)

敖世洲	昌增益	陈润生	戴灼华	丁明孝
杜生明	段恩奎	方荣祥	傅继梁	龚非力
顾红雅	何大澄	胡志红	黄伟达	金冬雁
李 博	李 林	曲音波	沈 萍	施苏华
寿天德	谭仁祥	王金发	武维华	薛勇彪
药立波	查锡良	张大勇	张知彬	左建儒

前 言

现代生命科学诞生于西方的文艺复兴时代，而当时的大旗是人本主义，因此，生命科学是以医学和动物科学为主体发展起来的，植物科学则长期处于陪衬地位。不过，在过去的 10~20 年间，植物科学有了飞速的发展，在一些领域，如抗病性的分子机理、功能基因组学、分子发育生物学、生物技术等方面，植物科学与相应的人类或动物科学相比，不仅毫不逊色，而且有许多领先之处。1990~2001 年，权威杂志《科学》(Science) 就出版了四期植物科学专刊，分别为 1990 年 11 月的“生物学的前沿：植物 (Frontiers in Biology: Plants)”；1995 年 5 月的“生物技术的前沿：兴起的植物科学 (Frontiers in Biotechnology: Emerging Plant Science)”；1999 年 7 月的“植物生物技术：食物与饲料 (Plant Biotechnology: Food and Feed)”和 2001 年 6 月的“植物病理学 (Plant Pathology)”。植物科学在整个生命科学领域中的重要性正在逐渐显露出来，而植物分子生物学则是植物科学的最前沿。

作为一门学科，植物分子生物学并没有一个一成不变的界限和范围，它的内容几乎包括了植物科学的所有领域，如遗传学、生理学、发育生物学，等等。为了方便起见，本书把植物分子生物学定义为“以植物为主要研究对象，以分子生物学方法和技术为主要研究手段，从分子角度、在基因水平上阐述生命现象的科学。”根据这个定义，植物分子生物学的内涵仍然十分庞大，几乎包括了过去十余年间植物科学的所有最新成果。如何编写一本具有植物科学特色，既介绍分子生物学的基本理论，又能够反映植物科学最新进展的研究生教材，是一个新的挑战。从另一方面讲，教育的目的不仅是传授知识和技能，还应该包括学生能力的开发和培养。这里所说的“能力”包括：提出问题的能力、分析问题的能力、辨别是非的能力和解决问题的能力。如何在篇幅不大的教材中反映能力培养的特色，更是一个让人感到棘手的难题。

在过去的两年中，笔者给哈尔滨工业大学生命科学与工程系的研究生讲授“植物分子生物学”。在编写讲义的同时，我在这两方面都进行了一些摸索。首先，本书采用了一种较新的编排结构。全书分为 9 章，所有章节均用一定的篇幅介绍分子生物学与植物分子生物学的基本知识和理论，然后讲述与本章题目相关的专题。这些专题都是近年来植物分子生物学研究的重大突破，具有很高的科学意义和现实意义。通过讲述专题，既可以强化前一部分的理论知识，又能够介绍植物分子生物学的最新进展。比如，第二章首先介绍了植物基因组的基本知识，然后通过讨论已经得到全部序列的植物基因组——拟南芥和水稻的基因组，详细地介绍了这两个植物基因组的特点；第三章在讲述植物基因的结构特点之后，比较全面地介绍了用于植物基因研究和应用的启动子；第四章则结合基因的表达与调控，讲述了近年来在基因表达调控研究中的重大发现，如基因沉默现象；第五章则结合基因的功能分析，介绍了植物的抗病基因研究的最新成果，等等。

其次，笔者主要通过讲评经典的科学论文来达到培养学生能力的目的。具体地说，本书对专题的讨论主要通过讲解原始科学论文，从问题的提出、研究方法的选择，到试

验结果的解释、科学结论的得出，都逐步分析，适当加以评论，使读者对论文作者的逻辑思维和技术路线都能有较为深刻的了解。本书选择的论文很多来自《科学》、《自然》(Nature)、《细胞》(Cell)等权威科学刊物，它们代表着当今植物科学研究的最高水平。把这些论文读懂、读透，基本上可以说触摸到了当今植物科学主线的脉搏，了解到了一流科学家的假设、取证、思维和推理的过程。通过模仿，再经过知识的增加与经验的积累，相信对读者研究能力的提高会有很大的帮助。

植物分子生物学内容十分广泛，穷一人毕生之时间和精力，也不可能了解其全部。这就决定了在编写讲义时，要在选材方面下大的工夫。本书第一章讲述分子生物学发展简史。对科学工作者来说，了解科学史是掌握科学发展方向、学习前人研究方法、提高自己研究能力的最佳途径。对分子生物学家来说，这方面的知识尤为重要。本书第二章到第五章的内容选择是根据分子生物学的特点，采用循序渐进的方式，从基因组到基因结构到基因表达调控到基因的功能分析，顺理成章。但其后几章的题目确定，具有颇大的主观性。本书在这方面选题的标准有两个，一个是重要性，另一个是前沿性。最后确定的三个方面，即植物的信号转导、植物的细胞分化和器官发育、植物生物技术，都是植物分子生物学研究的重要领域，并且近年来有突破性进展。应该指出，分子生物学与生物技术是两个不同的知识体系，前者注重于基础理论和基础知识，后者则是应用这些理论、知识和方法来解决社会问题或者创造财富。对现阶段的中国来说，知识的应用显得更具有迫切性。本书的第八章不仅详细地介绍了植物生物技术的成熟领域，并且指出了一些可能的开发方向。最后一章实际上是附录，本人试图通过将植物学和分子生物学的基本概念、定义、名词术语和相应的英文词汇串联起来，给予讲解，希望这种形式能够对入门读者有所裨益。

生命科学是实验科学，一篇科学论文实际上是一份实验报告。对于一篇科学论文来说，图片（也就是试验结果）的重要性往往超过文字本身。为了使本书的内容清晰易懂，本书选用了一些权威杂志发表的论文中的图片。应该说，绝大多数图片是讲解原始科学论文所必需的。没有它们作为参考，读者就不可能真正理解论文本身。本书作者承蒙多家期刊和出版社的许可，获得这些图片的使用权，使本书陡然生色，在此深表谢意。

由于篇幅所限，在引用参考文献时，没有列出作者的名字和引文的标题，笔者在此向各位作者致歉。还有一点需要指出的就是，很多科学结论都是根据几篇研究论文得出的，但本书一般仅列其中之一，这一点，亦希读者明察。

总之，我衷心希望本书的出版能够对我国的植物分子生物学的教学和研究起到点滴作用。笔者水平有限，诚请专家学者批评指正。

葛 莘
2004 年

目 录

前言

第一章 分子生物学与植物分子生物学简史	1
第一节 从基因到 DNA	1
第二节 从噬菌体到 DNA 双螺旋结构	4
第三节 RNA 与遗传密码	8
第四节 生物技术时代来临	10
第五节 植物分子生物学	11
第六节 基因组学的诞生	14
第二章 植物的基因组与基因组学	16
第一节 植物的基因组	16
一、基因组的复杂性	16
二、简单序列和重复序列	17
三、表达基因的数量	18
四、叶绿体基因组	19
五、线粒体基因组	21
六、混源 DNA	23
七、线粒体和叶绿体中的 RNA 编辑	23
八、线粒体和叶绿体的起源	25
第二节 基因组学简介	25
一、以互联网络为平台的数据库	26
二、组建基因组的物理图谱和遗传图谱	27
三、基因组序列分析及其策略	27
四、分析基因组序列的结构特点	29
五、鉴定基因组中的基因并确定其功能	31
六、建立基因表达数据库	33
七、建立基因及表现型之间的关系	34
八、确定 DNA 序列的多样性	35
九、为比较不同生物的基因组提供资料	36
十、基因的命名	36
十一、基因组学研究举例：全基因组鸟枪法测序人类基因组研究	38
第三节 拟南芥基因组	41
一、拟南芥基因组概况	42
二、拟南芥基因组的结构特点	42
三、非编码 RNA 基因	46

四、编码基因	47
五、主要蛋白功能类群	50
第四节 水稻基因组	57
一、籼稻基因组	57
二、粳稻基因组	59
三、国际水稻基因组计划	62
第三章 基因的结构	64
第一节 非编码 RNA 基因的结构	65
一、具有核酶性质的 RNA	66
二、小细胞核 RNA	74
三、小细胞核仁 RNA	75
四、miRNA	78
五、其他非编码 RNA	80
第二节 编码基因的一般结构	82
一、原核生物基因的特点	82
二、植物基因的结构	83
第三节 参与基因转录的蛋白质结构	87
一、RNA 聚合酶 II	88
二、普通转录因子及辅助激活子	89
三、激活子 (特异转录因子)	95
四、转录因子的典型结构域	99
第四节 植物基因和用于植物基因研究的启动子	103
一、35S 启动子	104
二、可诱导的启动子	106
第四章 基因的表达与调控	113
第一节 染色质结构对基因转录的影响	113
一、染色质结构的变化对转录起始过程至关重要	113
二、染色质结构变化的机制	116
第二节 编码基因的转录过程	124
一、编码基因转录的起始过程	125
二、编码基因的转录及转录后处理	126
三、mRNA 向细胞质内的运输	129
第三节 mRNA 的质量监控	131
第四节 基因表达是一个整体的、连续的过程	134
一、5'端加帽与转录的延长和终止	135
二、转录的起始和延长与 mRNA 前体的处理	135
三、mRNA 输出与 mRNA 前体的处理过程是耦联的	136
第五节 异位拼接与基因表达的调控	137
一、烟草抗病毒的 N 基因的异位拼接	138

二、拟南芥基因 <i>FCA</i> 通过异位拼接控制开花时机	139
三、绿色荧光蛋白为什么不发光	141
第六节 mRNA 的翻译及其调控	142
一、mRNA 携带的调控信息	143
二、mRNA 翻译的起始过程	145
三、基因特异的翻译调控	149
四、翻译水平的重新编码	151
第七节 蛋白质功能的调控	155
一、蛋白质的运输	155
二、蛋白质的处理	160
三、蛋白质的翻译后共价修饰	161
四、蛋白质的翻译后非共价修饰	163
五、蛋白质的泛素化及蛋白质降解	165
第八节 基因沉默	174
一、基因沉默现象是普遍存在的	175
二、小干扰 RNA 与基因沉默机理	176
三、双链 RNA 是 PTGS 现象的关键	179
四、PTGS 是植物抵抗 RNA 病毒侵染的防御机制	181
五、基因沉默与 DNA 的甲基化	190
第五章 基因的功能分析	196
第一节 遗传图谱与连锁分析	197
一、遗传图谱与物理图谱	197
二、拟南芥的基因组图谱	199
三、分子标记技术	201
四、利用分子标记进行基因定位	206
第二节 基于作图的基因克隆	209
一、根据作图从拟南芥中克隆基因	210
二、青椒细菌性斑点病抗病基因 <i>Bs2</i> 的克隆	211
三、克隆控制番茄糖度的 QTL	213
四、定位及克隆控制番茄果实重量的 QTL	218
第三节 基因的突变分析	221
一、化学诱变及目的基因突变植物的筛选	222
二、转座子及转座子突变系统	223
三、T-DNA 及 T-DNA 突变系统	228
四、加强子陷阱、启动子陷阱和基因陷阱	228
五、激活标签突变	229
六、根据基因标签克隆基因	229
第四节 基因的表达分析	231
一、基因的超量表达	232

二、基因的抑制表达·····	233
三、通过基因的表达研究基因功能·····	233
第五节 蛋白质的序列分析·····	240
一、蛋白质的结构分析与同源分析·····	240
二、蛋白质的信息资源·····	241
三、蛋白质序列分析举例·····	243
第六节 植物的抗病性与抗病基因·····	248
一、植物病理学基础·····	248
二、抗病基因的结构与功能·····	250
三、病原菌无毒力蛋白质及其与 R 蛋白的相互作用 ·····	259
四、Pto 介导的植物抗病机理研究 ·····	263
五、植物抗病反应的信号转导·····	274
第六章 植物细胞的信号转导·····	285
第一节 信号及信号转导的本质·····	286
一、植物细胞感受的信号·····	286
二、信号受体蛋白·····	288
三、次级信使·····	293
四、信号转换的中介: G 蛋白·····	303
五、MAPK 级联反应 ·····	308
六、转录因子及信号反应基因·····	310
七、信号转导途径的调控·····	311
八、植物细胞完整信号转导途径举例·····	312
第二节 植物激素信号的转导·····	317
一、生长激素信号途径·····	317
二、细胞激动素与二元信号系统·····	318
三、赤霉素与种子中淀粉水解及植物株高·····	323
四、脱落酸与气孔关闭·····	330
五、乙烯信号途径·····	337
六、芸苔素类固醇信号的受体·····	337
第三节 植物外源信号转导途径·····	340
一、光信号的转导·····	340
二、非生物胁迫信号的转导·····	345
第四节 异源三体 G 蛋白与植物激素信号转导 ·····	352
一、G 蛋白与脱落酸·····	352
二、G 蛋白与生长激素·····	353
三、G 蛋白与赤霉素·····	358
第七章 植物的细胞分化和器官发育·····	363
第一节 细胞分化的分子机理·····	364
一、顶端分生组织中的 CLV 基因系统 ·····	365

二、拟南芥根细胞的分化与 <i>SHR/SCR</i> 基因系统	368
三、表皮毛的分化	371
第二节 格局建立的分子机理	375
一、表皮毛的格局建立	375
二、叶片的格局建立	380
三、分枝与顶端优势	385
第三节 从营养生长向生殖生长的转化及花器官的发育	387
一、从花序分生组织到花器官的形成：概述	387
二、影响植物从营养生长到生殖生长转变的信号途径	390
三、花器官发育的 ABC 模型及其修正	397
第四节 植物的胚胎发生	401
一、胚胎发生的一般过程	401
二、植物胚胎发育的分子机理	403
三、自交不亲和现象	411
第五节 植物果实的发育	414
一、果实的发育成熟过程	414
二、番茄及其他肉质果实的后熟机制	415
三、控制拟南芥的长角果开裂的分子机制	418
第八章 植物生物技术	421
第一节 植物的遗传转化及瞬间表达技术	422
一、细胞核基因组的转化：农杆菌介导的植物遗传转化方法	422
二、叶绿体基因组的转化	427
三、无标记基因遗传转化和标记基因的剔除	429
四、植物病毒载体法	432
第二节 分子育种：植物生物技术在种植业中的应用	436
一、抗虫植物	440
二、抗病植物	444
三、抗除草剂植物	449
四、改善植物的农艺性状	450
五、改善植物的营养品质	453
六、提高植物的抗逆性	455
第三节 分子农业：植物生物技术在医药业中的应用	458
一、植物生物反应器	458
二、利用植物生产医用和药用蛋白	462
三、利用植物生产口服疫苗	467
四、利用植物生产可降解塑料	469
五、利用植物生产功能性化学物质	470
第四节 分子添加剂业	472
一、分子添加剂业的内容和特点	472

二、淀粉酶的利用·····	474
三、纤维素酶·····	476
四、半纤维素酶·····	478
五、植酸酶的用途·····	480
第五节 植物治理·····	481
一、植物治理的概念和内容·····	481
二、金属硫蛋白和植物螯合素·····	482
三、细胞色素 P450 ·····	484
四、利用细菌基因进行植物治理·····	485
第六节 植物生物技术的社会问题·····	488
一、转基因生物的安全性问题·····	489
二、美国生物技术产品的管理机构及其政策·····	492
三、知识产权问题·····	494
第九章 植物学和分子生物学词汇·····	498
第一节 细胞学与植物学·····	498
一、细胞的结构·····	498
二、细胞的分裂·····	500
三、植物的结构·····	500
第二节 遗传学·····	502
第三节 生物化学·····	505
一、碳水化合物·····	505
二、脂肪·····	506
三、核酸·····	507
四、蛋白质·····	508
第四节 分子生物学·····	513
一、基因·····	513
二、克隆·····	517
三、载体·····	518
四、分子生物学工具酶·····	519
五、分子杂交·····	522
六、引物及其应用·····	523
七、电泳·····	524
八、基因组学·····	525
九、生物技术·····	527
附录 1: 人类基因组计划的缘起 ·····	529
附录 2: 商业科学家文特尔 ·····	531
附录 3: 分子生物学经典论文选目及简明注释 ·····	534

图 目 录

图 1.1	烟草花叶病毒 (TMV) 杆状粒子的电子显微镜照片	1
图 1.2	埃弗里首次证明 DNA 是遗传物质	3
图 1.3	肺炎双球菌的两种不同形态的菌落	3
图 1.4	埃弗里的细菌转化实验示意图	4
图 1.5	噬菌体的结构模型与赫尔希-蔡斯试验	5
图 1.6	使 DNA 双螺旋结构得以破解的 X 射线衍射照片	7
图 1.7	沃森 (左) 和克里克 (右) 正在研究 DNA 结构模型	7
图 1.8	乳糖操纵子 (<i>Lac Operon</i>) 示意图	9
图 1.9	世界上第一个基因工程产品——促生长素抑制素 (<i>somatostatin</i>) 的结构	11
图 2.1	拟南芥细胞蛋白质二维聚丙烯酰胺凝胶电泳图	18
图 2.2	植物叶绿体基因组结构示意图	19
图 2.3	甜菜线粒体基因组图	22
图 2.4	作图法基因组测序及组装	28
图 2.5	鸟枪法全基因组测序及组装	28
图 2.6	人类基因组中 GC 含量与基因的关系	30
图 2.7	序列相关基因之间的亲缘关系	33
图 2.8	几丁质诱导的拟南芥基因表达	34
图 2.9	拟南芥基因组中串联重复基因排列的数量分布	43
图 2.10	拟南芥基因组大片段基因加倍	43
图 3.1	无所不能的 RNA	64
图 3.2	原生动物 <i>Tetrahymena thermophila</i> 的 I 类内含子二级结构	68
图 3.3	核酶切割 RNA 的酸-碱催化反应和双金属离子催化反应	69
图 3.4	内含子自我拼接的机制	70
图 3.5	桃潜隐花叶类病毒的二级结构及构成的锤头状核酶结构	71
图 3.6	锤头状核酶的三维结构	72
图 3.7	酵母细胞核核酸酶 P 的 RNA 亚基二级结构	73
图 3.8	拼接小体催化核心的二级结构模型及与 II 类内含子第 V、第 VI 结构域的比较	75
图 3.9	Box C/D 和 Box H/ACA snoRNA 的结构与功能	76
图 3.10	两种 RNA 中被修饰的核苷	77
图 3.11	拟南芥和水稻 miRNA 基因结构的保守性	79
图 3.12	大肠杆菌基因的启动子结构	82
图 3.13	典型真核生物基因的结构示意图	83
图 3.14	1993 年诺贝尔生理或医学奖获得者理查德·罗伯茨 (Richard John Roberts)	

及他利用电子显微镜证明内含子存在的照片	84
图 3.15 U2 型细胞核 mRNA 前体内含子的保守序列	85
图 3.16 多顺反子与单顺反子概念示意图	86
图 3.17 mRNA 的 5'帽子结构	87
图 3.18 酵母 RNA 聚合酶 II 的三维结构	89
图 3.19 人类 TBP、TFIIB 与腺病毒启动子组成的复合体	91
图 3.20 后生动物 TAFII250 的示意图	95
图 3.21 转录辅助激活子复合体与基因表达	96
图 3.22 拟南芥 R2R3 型 MYB 结构域的保守序列	97
图 3.23 MADS 盒蛋白序列	98
图 3.24 II 型 MADS 蛋白的一般结构	98
图 3.25 人类血清反应因子 (SRF) MADS 结构域的 X 射线衍射模型	98
图 3.26 果蝇 EN 蛋白同源异型结构域与 DNA 结合的高级结构示意图	99
图 3.27 锌指结构示意图	100
图 3.28 螺旋-环-螺旋结构与 DNA 结合示意图	101
图 3.29 亮氨酸拉链示意图	102
图 3.30 翼式螺旋结构域 NMR 模型	102
图 3.31 花椰菜花叶病毒的电子显微镜照片 (300 000 倍)	103
图 3.32 CaMV 35S RNA 启动子的结构与序列	105
图 3.33 Tn10 上的四环素抗性基因系统的调控	108
图 3.34 四环素抑制子系统与 35S 启动子组成的杂合启动子	108
图 3.35 细胞核受体蛋白的基本结构	109
图 3.36 糖皮质激素控制的蛋白质功能激活系统	110
图 3.37 受糖皮质激素控制的基因转录系统	110
图 3.38 糖皮质激素及其类似物的分子结构式	111
图 3.39 根据曲霉的 <i>alc</i> 调控元设计的植物转基因可诱导表达系统	111
图 3.40 报告基因在 <i>alcR alc::GUS</i> 转基因拟南芥中的表达受诱导物乙醇剂量的 控制	112
图 4.1 染色质结构的动态变化	114
图 4.2 核小体核心粒体和 ¹⁴⁶ bpDNA 片段组成的复合体 X 射线衍射结构	115
图 4.3 转录激活子 VP16 引起的染色质大规模松弛	116
图 4.4 依赖于 ATP 的染色质重建	117
图 4.5 脊椎动物组蛋白 N 端序列的修饰位点	118
图 4.6 人类 TAFII2500 双 bromodomain 的三维结构图	122
图 4.7 启动子的 TATA 盒与转录起始因子结合三维示意图	125
图 4.8 编码基因的转录后处理: 传统模式	126
图 4.9 人类细胞 hnRNA 3'端加 polyA 尾的过程	128
图 4.10 B1 阶段的拼接小体结构	129
图 4.11 参与 mRNA 细胞核输出的蛋白质的结构	131

图 4.12	mRNA 输出细胞核模型	131
图 4.13	鉴定能够引发 mRNA “无意义介导的降解” 的蛋白质	134
图 4.14	异位拼接的几个模式	138
图 4.15	烟草 <i>N</i> 基因的异位拼接	139
图 4.16	<i>FCA</i> 基因结构图及其与报告基因 <i>GUS</i> 组成的融合基因	140
图 4.17	GFP 的 mRNA 在转录后被非正常地拼接	142
图 4.18	核糖体 30s 亚基及其上面的三个 tRNA	145
图 4.19	烟草花叶病毒的 Ω 序列	150
图 4.20	烟草花叶病毒终止密码子 UAG 的翻译通过	153
图 4.21	莫洛尼鼠白血病毒病的终止密码子翻译通过	154
图 4.22	大麦黄矮病毒 (BYDV) P1-P2 融合蛋白来自核糖体移框翻译	154
图 4.23	真核细胞内蛋白质的运输	156
图 4.24	输入素 α 的一般结构	159
图 4.25	N-甲基化的氨基酸分子结构式	161
图 4.26	N-多糖和 O-多糖与蛋白质的连接	162
图 4.27	泛素介导的蛋白质降解	165
图 4.28	拟南芥泛素前体蛋白 UBQ4 和 UBQ1 的结构	166
图 4.29	拟南芥 E1 蛋白 UBA1 (GenBank AAB39246) 的结构	166
图 4.30	拟南芥中的四类 E2 蛋白	167
图 4.31	RING 指的 “双卡” 结构	168
图 4.32	26S 蛋白酶体的结构与功能	169
图 4.33	酵母 20S 蛋白酶体催化核心	169
图 4.34	AUX/IAA 和 ARF 蛋白的结构特点	172
图 4.35	双链 RNA 诱导的基因沉默机理	177
图 4.36	马铃薯 X 病毒 (PVX) 和马铃薯 Y 病毒 (PVY) 的互促进作用	182
图 4.37	PVY 病毒基因克服病毒诱导的基因沉默	183
图 4.38	PVY 属病毒基因克服病毒诱导的 <i>GFP</i> 转基因沉默	184
图 4.39	基因沉默调控子-钙调蛋白 (rgs-CaM) 的氨基酸残基序列及其在植物中的表达	184
图 4.40	rgs-CaM 克服 <i>GFP</i> 转基因沉默	185
图 4.41	本珊烟草从 TRV-GFP 侵染中康复	186
图 4.42	康复与交叉保护作用的关系; PVX 重组病毒挑战接种试验	187
图 4.43	TRV-GFP 的康复与瞬间表达基因的 PTGS	188
图 4.44	PVX 诱导的交叉保护作用	189
图 4.45	烟草 <i>RdRP</i> 基因 mRNA 在野生型和转基因植物中的积累	190
图 4.46	烟草花叶病毒 (TMV) 病的症状和病毒 RNA 在植物体内的积累	190
图 5.1	分子遗传学的研究方向	197
图 5.2	拟南芥第一染色体图谱	199
图 5.3	拟南芥的基因组序列图谱局部放大图	200

图 5.4	拟南芥的遗传图谱局部放大图	200
图 5.5	检测限制性片段长度多态性的主要步骤	202
图 5.6	AFLP 试验的主要成分	203
图 5.7	简单序列长度多态性及其检测方法	204
图 5.8	酶切位点扩增多态性 (CAPs) 及其检测方法	206
图 5.9	近等基因系的建立	207
图 5.10	群分法分析拟南芥幼苗的突变	209
图 5.11	根据图谱克隆青椒细菌斑点病抗病基因 <i>Bs2</i>	213
图 5.12	数量性状位点 (QTL) <i>Brix9-2-5</i> 的精细作图	215
图 5.13	<i>Brix9-2-5</i> 的精确位置	216
图 5.14	<i>IL9-2-5</i> 在有限开花番茄背景下的高精度数量性状位点图谱	217
图 5.15	<i>fw2.2</i> 在番茄第二染色体上的高精度遗传图谱和物理图谱	219
图 5.16	番茄第二染色体 <i>fw2.2</i> 区域重组植物基因型图示	220
图 5.17	<i>fw2.2</i> 的定位与克隆	220
图 5.18	TILLING: 瞄准基因组中诱导的局部突变	223
图 5.19	玉米 <i>Ac</i> 转座子的结构及表达	225
图 5.20	细菌插入序列的转座模型	226
图 5.21	利用转座子诱导基因的插入突变	227
图 5.22	质粒拯救法鉴定 T-DNA 插入的基因	230
图 5.23	TAIL-PCR 的原理和程序	231
图 5.24	<i>ACS</i> 基因在番茄中的表达	236
图 5.25	乙烯诱导 <i>ACS</i> 基因在番茄中的表达	237
图 5.26	<i>ACS</i> 基因在成熟 <i>Nr</i> 突变型番茄中的表达	238
图 5.27	<i>ACS</i> 基因在番茄乙烯合成过程中的表达调控模型	239
图 5.28	BLAST 分析 CAF 的同源蛋白结果的图像显示	244
图 5.29	用 CAF 蛋白序列在 CDD 数据库检索的结果	246
图 5.30	决定植物病害发生的三个因素	249
图 5.31	基因对基因理论的遗传学模型	250
图 5.32	植物 R 蛋白与动物参与内部免疫反应的蛋白质的结构比较	255
图 5.33	富含亮氨酸重复序列 (LRR) 的高级结构	255
图 5.34	番茄 R 蛋白 <i>Cf-4</i> 和 <i>Cf-9</i> 的结构比较	256
图 5.35	SNARE 蛋白复合体是由 4 个 α 螺旋组成的复式螺旋	257
图 5.36	鼠伤寒沙门氏菌 (<i>Salmonella typhimurium</i>) 丙型分泌系统示意图	262
图 5.37	利用计算机程序比较 <i>Pti</i> 和同源蛋白质序列	266
图 5.38	<i>Pto-avrPto</i> 相互作用诱导的 <i>PR</i> 基因表达	268
图 5.39	<i>AvrPto</i> 诱导的植物抗病反应途径	268
图 5.40	<i>Pto</i> 的活化区域	270
图 5.41	<i>AvrPto</i> 激活 <i>Pto</i> 的模型	271
图 5.42	<i>Pto</i> 自我磷酸化位点的突变对超敏反应的影响	272

图 5.43	Pto 自我磷酸化位点的突变株在酵母二元杂交系统中与 AvrPto、Pti1 和 Pti4 的相互作用	273
图 5.44	AvrPto-Pto 与超敏反应信号转导途径模型	274
图 5.45	植物抗病途径及其相互作用	279
图 6.1	几种植物内源信号分子的结构式	287
图 6.2	具有富含亮氨酸重复序列 (LRR) 的类似受体蛋白激酶 (RLK) 和类似受体蛋白质 (RLP)	290
图 6.3	根瘤菌合成的根瘤因子的一般化学结构	291
图 6.4	植物根瘤因子受体蛋白的结构	292
图 6.5	三类组氨酸蛋白激酶受体的结构	293
图 6.6	果蝇钙调蛋白与钙离子结合的三维结构	295
图 6.7	钙调蛋白的构型变化	295
图 6.8	依赖于钙调蛋白的蛋白激酶和依赖于钙离子的蛋白激酶结构比较	297
图 6.9	拟南芥双孔通道蛋白 TPC1 的拓扑结构模型	297
图 6.10	cAMP (adenosine 3', 5'-cyclic monophosphate) 的分子结构式	299
图 6.11	巯基氧化氮谷胱甘肽 (S-nitrosoglutathione) 分子结构式	302
图 6.12	异源三体 G 蛋白与 GDP 结合时的高级结构	303
图 6.13	植物信号转导途径中的 MAPK 级联反应	309
图 6.14	被 flg22 激活的早期防卫基因	314
图 6.15	信号在植物中的转导途径	316
图 6.16	二元信号系统的组成	321
图 6.17	由组氨酸蛋白激酶介导的细胞激动素信号转导途径	323
图 6.18	具有生物活性的赤霉素分子结构式	324
图 6.19	转录因子 GRAS 家族的基本结构	326
图 6.20	赤霉素在禾谷类种子糊粉层细胞中的信号转导途径	328
图 6.21	脱落酸生物合成途径及其调控	331
图 6.22	环腺苷二磷酸核糖 (a) 和 S1P (b) 的分子结构式	334
图 6.23	脱落酸信号控制的植物气孔关闭途径	335
图 6.24	XA21 和 BRI1 嵌合基因及其生物反应	338
图 6.25	植物细胞中三种光信号受体蛋白的结构	342
图 6.26	趋光素 LOV 结构域与黄素单核苷酸结合结构	342
图 6.27	拟南芥光信号转导途径简化图	345
图 6.28	植物光敏素的一级结构和光化学性质	346
图 6.29	G 蛋白基因与生长激素在根细胞分裂过程中的相互作用模型	357
图 6.30	水稻 <i>Ga</i> 基因 <i>RGA1</i> 的染色体定位、在矮化突变株中的表达以及表现型	359
图 6.31	5 个水稻矮化突变株与其亲本的 <i>RGA1</i> 基因序列比较	360
图 6.32	转化互补试验	361
图 6.33	野生型和 <i>d1</i> 突变型水稻对赤霉素 (GA) 信号的反应	362