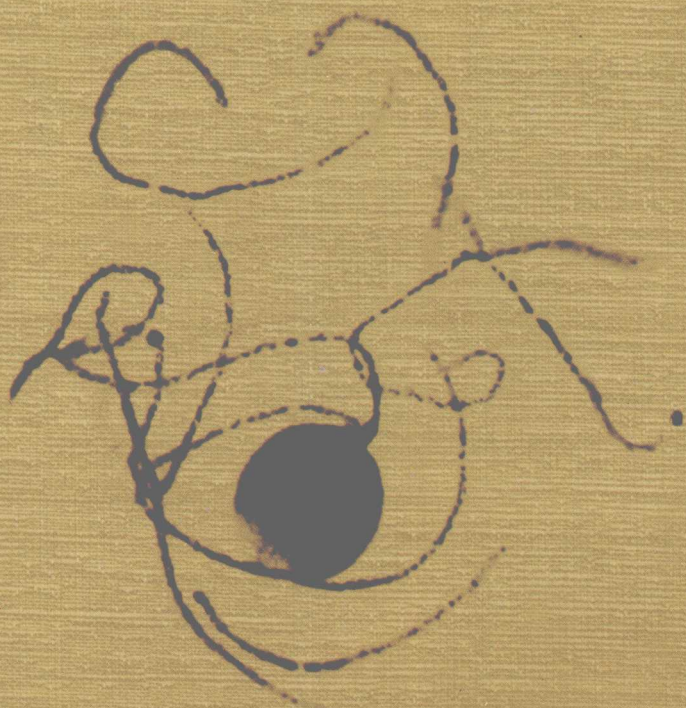


植物染色体 与遗传育种

李树贤 编著



科学出版社
www.sciencep.com

植物染色体与遗传育种

李树贤 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以植物育种为主体、以染色体为主线,将遗传与育种紧密结合在一起,比较系统地反映了当前植物育种的发展动向及水平。全书分为8个单元、16章,在简要介绍植物细胞遗传学相关内容及发展动态的基础上,对无融合生殖育种、 $2n$ 配子发生及利用、染色体组工程(单倍体、同源多倍体、异源多倍体)及染色体工程育种、体细胞杂交与倍性操作、异源核质杂种及其利用等进行了较为详细系统的论述。本书的特点在于理论联系实际,将农作物、园艺作物、林木果树植物以及园林花卉植物的相关内容融为一体,相互借鉴,有助于读者开阔思路。

本书可供相关院校教学及从事植物育种的科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

植物染色体与遗传育种/李树贤编著. —北京:科学出版社,2008
ISBN 978-7-03-020020-4

I. 植… II. 李… III. ①植物—染色体②植物育种:遗传育种
IV. Q943 S33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 006379 号

责任编辑:李秀伟 王 静/责任校对:朱光光
责任印制:钱玉芬/封面设计:福瑞来书装

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

*

2008年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2008年3月第一次印刷 印张:40 插页:10

印数:1—2 000 字数:925 000

定价:108.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

遗传学是植物育种学的基础学科。在农业专业教育中,遗传学和育种学分属两门课程。植物育种归根到底是对物种(品种)染色体及染色体外遗传结构的改良。育种与遗传研究的密切结合是现代植物育种学发展的一个显著特点。遗传工程作为植物遗传育种的技术体系,在近20~30年发展很快。广义的遗传工程包括:细胞工程、染色体组工程、染色体工程以及基因工程四个层次。其中,分子水平的基因工程作为前沿科学技术而受到广泛关注。细胞工程、染色体组工程及染色体工程则已日趋成熟,已进入进一步完善和普及阶段。这三个层次以染色体操纵为主线,涉及染色体组、染色体、染色体与细胞质基因以及染色体与外遗传因素关系的调整。相关内容在一些教科书及专著中分别有所反映,但密切结合育种实践,系统反映上述内容的著作还尚未见到。作者在长期的科研实践与学习过程中,深深感受到基础理论对指导和提高育种水平的重要性,以及编写一本以植物育种为主体、以染色体为主线,将遗传与育种紧密地结合起来,能够反映当前植物育种发展动向与水平的专著的必要性。为此,在过去十多年的时间内,在科研与其他工作之余,通过比较广泛的文献资料收集,结合自己的实践与体会,在为石河子农学院相关专业的研究生及相关科研院所科研人员所作的专题讲座讲稿的基础上,经反复修改调整,编著成此书。本书涉及农学、园林花卉、果树、蔬菜等多个学科的内容,由于作者水平有限,偏颇和错误之处在所难免,欢迎批评指正。

本书共分为16章,其中第一、二章为染色体遗传学的基本内容,作为第一个单元,力求减少与现有教科书和有关著作的重复,并尽可能反映当前新的发展内容,为以后的章节做铺垫;第三章“无融合生殖及 $2n$ 配子”,作为植物有性生殖的特殊变异而构成独立的一章,成为第二个单元;第四、五、六章为单倍体遗传育种单元;第七、八、九、十章为同源多倍体遗传育种单元;第十一、十二、十三章为异源多倍体遗传育种单元;第十四章“染色体工程”、第十五章“体细胞杂交与遗传操作”和第十六章“异源核质杂种及其利用”分别为独立的三个单元。全书在内容上,力求理论与技术体系的系统性和完整性,但在具体技术上则避免过于细化,读者可根据需要另行参阅其他著作。

本书以具有一定专业基础、从事植物育种研究的教学和科研人员为主要读者对象。如果能有一定的参考价值,作者将不胜欣慰。

在本书编著过程中,文稿的录入、图表的制作以及图版、文稿编排等,都曾得到不少同志的帮助,谨表谢忱。

李树贤

2007年3月6日于新疆石河子

Tel: 0993-2019936

E-mail: lxx319lx@163.com

目 录

前言

第一章 染色体——遗传物质的主要载体	1
一、染色体的基本结构	1
(一) 染色体的形态	1
(二) 常染色质和异染色质	5
(三) 染色体与核型	6
二、染色体的亚微结构	9
(一) 染色体与 DNA	9
(二) 染色质的基本结构单位——核小体	9
(三) 染色体空间结构的变化	10
三、染色体的特异性	11
(一) 染色体数目与形态特征的相对稳定性	11
(二) 细胞周期与染色体复制	12
(三) 染色体与基因	13
(四) 染色体的变异性	13
四、细胞分裂与染色体行为	14
(一) 有丝分裂	14
(二) 减数分裂	16
(三) 纺锤体的遗传变异	19
五、同源染色体的联会与交换	20
(一) 配对和联会的发生	20
(二) 联会的遗传控制	22
(三) 同源染色体之间的交换与重组	23
六、植物的特化染色体	25
(一) 性染色体	25
(二) B染色体	27
主要参考文献	30
第二章 染色体的变异	33
一、体细胞分裂中染色体行为的异常	33
(一) 核加倍	33
(二) 核缩减	34
(三) 体细胞交换	34
二、减数分裂中染色体行为的异常	36
(一) 同源染色体联会的变异	36

(二) 减数分裂中的特殊交换	36
(三) 产生 $2n$ 配子	37
(四) 后减数的减数分裂	38
三、染色体结构变异	38
(一) 结构变异的发生	38
(二) 缺失	39
(三) 重复	40
(四) 倒位	41
(五) 易位	44
(六) 巨大染色体	52
(七) 染色体结构变异与物种进化	52
四、基因突变	53
(一) 基因突变的特征特性	53
(二) 基因突变与性状表达	56
(三) 基因突变的检测	58
(四) 转座因子及其应用	59
五、染色体的整倍性变异	62
(一) 染色体基数	62
(二) 染色体的整倍体	63
(三) 同源多倍体	63
(四) 异源多倍体	64
六、染色体的非整倍性变异	64
(一) 二倍体的非整倍性变异	65
(二) 多倍体的非整倍性变异	66
(三) 假多倍性	67
(四) 非整倍体的主要类型	69
主要参考文献	69
第三章 无融合生殖及 $2n$ 配子	72
一、无融合生殖的种类	72
(一) 配子体无融合生殖	72
(二) 孢子体无融合生殖——不定胚生殖	74
二、无融合生殖的选育	75
(一) 无融合生殖的筛选	75
(二) 无融合生殖的诱导	78
(三) 人工染色体加倍筛选无融合生殖	79
(四) 从野生亲缘种转移无融合生殖基因	79
(五) 无融合生殖的遗传转化	82
三、无融合生殖的鉴别	83
(一) 植株形态和遗传行为鉴别	83

(二) 细胞学鉴定	84
(三) 生物化学和分子生物学鉴定	85
(四) 胚胎学鉴定	86
四、无融合生殖的遗传研究	86
(一) 专性无融合生殖的遗传	86
(二) 半融合生殖的遗传	89
(三) 兼性无融合生殖与不定胚的遗传	89
(四) 无融合生殖的特异性	90
五、无融合生殖在植物育种中的应用	91
(一) 快速获得纯合系	91
(二) 固定杂种优势	92
(三) 快速进行核置换	94
六、 $2n$ 配子及其在植物育种中的应用	95
(一) $2n$ 雄配子的发生	95
(二) $2n$ 雌配子的发生	97
(三) $2n$ 配子发生的遗传控制	98
(四) $2n$ 配子的获得	99
(五) $2n$ 配子的鉴定	100
(六) $2n$ 配子的遗传效应	102
(七) $2n$ 配子在植物育种中的应用	103
主要参考文献	104
第四章 单倍体及其发生	111
一、单倍体的基本概念	111
二、活体单倍体的发生	112
(一) 母性单倍体	112
(二) 雄核发育单倍体	113
(三) 多胚与单倍体	114
三、花药和花粉培养单倍体	114
(一) 花药和花粉培养的意义	115
(二) 供体材料的挑选	115
(三) 培养材料(花药和花粉)的预处理	116
(四) 小孢子的分离与纯化	118
(五) 培养条件与培养方式	118
(六) 花粉植株的发育途径	123
(七) 小孢子胚胎发生机制的研究	124
(八) 单倍体的加倍	125
四、未授粉子房和胚珠培养单倍体	126
(一) 未授粉子房培养	127
(二) 未授粉胚珠培养	128

(三) 胚囊植株的起源	129
五、体细胞染色体组消失单倍体	130
(一) 球茎大麦法	131
(二) 玉米法	132
(三) 鸭茅状摩擦禾法	133
六、孤雌生殖诱导系的发掘	135
(一) 超级授粉者的发现和选育	135
(二) 孤雌生殖诱导系作用机理的研究	137
主要参考文献	138
第五章 单倍体的遗传与变异	143
一、单倍体发生的遗传控制	143
(一) 活体单倍体发生的遗传控制	143
(二) 离体培养(花粉)单倍体发生的遗传控制	144
二、单倍体的遗传特异性	148
(一) 有丝分裂的相对稳定性	148
(二) 减数分裂与大小孢子发生的特异性	150
(三) 加倍单倍体配子体的选择性问题的	153
三、单倍体的遗传多样性	154
(一) 供体植株基因型的充分表达	154
(二) 单倍体和加倍单倍体遗传结构的变异	155
(三) 加倍单倍体表现型的遗传多样性	156
四、单倍体在遗传研究中的应用	159
(一) 用于染色体组分析	159
(二) 用于染色体配对的遗传研究	160
(三) 利用 DH 群体进行数量性状的遗传分析	161
(四) DH 群体用于构建分子连锁图	162
(五) 用于植物的基因转化	163
五、单倍体在植物进化中的遗传学意义	164
(一) 进化与适宜倍性水平	164
(二) 去多倍化的进化意义	164
(三) 繁殖方式、倍性变化与物种进化	165
主要参考文献	166
第六章 单倍体与植物育种	171
一、单倍体的育种学效能	171
(一) 提高杂交育种效率	171
(二) 分解育种与远缘杂交	173
(三) 提高诱变育种效能	173
二、单倍体与杂种优势育种	174
(一) 利用加倍单倍体固定杂种优势	174

(二) 利用加倍单倍体制配杂交种	174
(三) 用于诱导和改良雄性不育“三系”	175
三、加倍单倍体与杂交育种	178
(一) 花培育种的亲本选配	179
(二) 花培世代的确定	181
(三) 加倍单倍体的选择和改良	183
(四) 单倍体综合育种体系的建立	184
四、单倍体与特殊育种	188
(一) 单倍体与等基因系育种	188
(二) 单倍体与植物性别育种	188
(三) 单倍体与特殊品质育种	189
(四) 在木本植物育种中的特殊价值	192
五、单倍体与种质创新	193
六、花药培养与植株脱毒	195
主要参考文献	196
第七章 同源多倍体的获得	200
一、自然界的多倍体植物	200
二、多倍体的起源与自然选择	202
(一) 多倍体的起源	202
(二) 自然界多倍体的筛选	204
三、多倍体的化学诱导	208
(一) 诱变剂及其原理	208
(二) 种芽浸渍诱变	210
(三) 植株活体诱变	211
(四) 无性繁殖器官诱导	214
四、组织培养诱导多倍体	215
(一) 体细胞组织培养	215
(二) 胚乳培养获得多倍体	219
(三) 从花粉植株获得多倍体	224
(四) 原生质体培养	224
五、遗传学方法	225
(一) 二倍体和四倍体杂交	225
(二) 三倍体杂交或自交	226
(三) 三倍体和四倍体杂交	226
(四) 其他杂交方式与不同倍数体的获得	226
六、多倍体的鉴定	227
(一) 形态学鉴定	227
(二) 细胞学鉴定	227
(三) 分子生物学鉴定	229

(四) 遗传学鉴定	230
主要参考文献	230
第八章 同源多倍体的遗传变异	236
一、植物学特征特性	236
(一) 植株形态特征	236
(二) 细胞学特征	238
(三) 生理生化特性	241
(四) 生物学特性	243
二、减数分裂与大小孢子的发生	245
(一) 同源四倍体	246
(二) 同源三倍体	253
三、受精生物学的遗传变异	255
(一) 同源四倍体的交配亲和性	255
(二) 四倍体自交的胚胎学变异	257
(三) 四倍体和二倍体杂交的胚胎学变异	258
四、倍性变异及其相对平衡	260
(一) 实验多倍体的非整倍性变异与传递	260
(二) 四倍体居群的倍性平衡	261
(三) 非整倍体对四倍体居群生产率的影响	261
五、种子结实力的变异	262
(一) 同源四倍体的结实力	262
(二) 配子育性对稔性的影响	263
(三) 胚囊与胚胎发育对结实率的影响	264
(四) 减数分裂染色体行为的影响	267
六、基因组的遗传变异与进化	268
(一) 染色体结构变异与基因重组	268
(二) 核-质平衡的破坏与重建	270
(三) 重复基因的进化	270
主要参考文献	274
第九章 同源四倍体的选育	279
一、多倍体的倍性选择	279
二、四倍体的分离	280
(一) 依染色体和染色单体的分离	280
(二) 最大均等式分离与双减数频率	281
(三) 根据 α 值计算配子比率	282
(四) 两对独立因子杂交后代的分离比率	284
(五) 四倍体的分离与选择	285
三、育种目标及选育方案的确定	286
(一) 表型变异及育种目标的确定	286

(二) 育种方案的制定	287
四、群体改良的选择方法	288
(一) 单株选择与混合选择	288
(二) 一般杂交育种	289
(三) 回交育种法的利用	290
(四) 轮回选择法	290
五、选择中数量性状的分析	293
(一) 方差分析与遗传率	294
(二) 协方差与遗传相关	296
(三) 连锁遗传的分析	299
(四) 选择响应与选择指数	300
(五) 通径分析与其他	303
(六) 关于选择极限的问题	304
六、配合力测验与遗传分析	306
(一) 多倍体育种与配合力测验	306
(二) 配合力测验与遗传分析	306
(三) 实例	308
(四) 讨论	308
七、选择及“二倍化”	309
(一) 选择对“二倍化”的促进	309
(二) 聚合杂交和基因重组	311
(三) 理化诱变与聚合选择	311
(四) 无性系生物技术的应用	312
(五) 同源多倍体的“异源化”	313
主要参考文献	314
第十章 同源多倍体在育种中的利用	316
一、直接用于品种改良	316
(一) 一般原则	316
(二) 某些高基数物种同源多倍体的利用	316
(三) 营养系品种的选育	317
(四) 多倍体综合品种的选育	320
(五) 多倍体纯系品种の利用	321
二、多倍体杂种优势利用	324
(一) 多倍体杂种优势利用的特点	324
(二) 四倍体杂交种的选配	326
(三) 三倍体杂种优势的利用	328
三、少籽和无籽品种の利用	332
(一) 三倍体无籽西瓜品种的选育	332
(二) 果品植物无籽和少籽品种の利用	333

(三) 果菜类无籽和少籽品种选育的研究	335
(四) 甜瓜倍性育种讨论	336
四、双单倍体的利用	337
(一) 四倍体物种的分解育种	338
(二) 二倍体种的双单倍体育种	340
(三) 通过双单倍体提高四倍体育种效率	341
五、用作桥梁种及创造种质材料	342
(一) 利用多倍体作桥梁种	342
(二) 创造种质材料	343
六、植物性别操纵与非倍性效应的利用	344
(一) 染色体操纵与植物性别育种	344
(二) 通过异倍体杂交进行二倍体育种	346
(三) 染色体加倍中非倍性效应的利用	347
主要参考文献	348
第十一章 异源多倍体的发生	352
一、异源多倍体的起源	352
(一) 双二倍体	352
(二) 部分双二倍体	354
(三) 多倍体复合体	358
二、异源多倍体发生中的生殖隔离	361
(一) 远缘杂交的不亲和性	361
(二) 杂种不活——胚不发育性	362
(三) 杂种不育	363
(四) 克服远缘杂交生殖隔离的途径	364
三、胚培养拯救远缘杂种	369
(一) 取材	369
(二) 胚培养中的形态发生	370
(三) 培养基和培养条件	371
(四) 受精胚珠的离体培养	372
四、离体受精及合子培养	373
五、染色体加倍与双二倍体创建	374
(一) 杂种活体加倍	374
(二) 胚培养中加倍	375
(三) 杂交中的自然加倍	376
主要参考文献	377
第十二章 异源多倍体的遗传与变异	381
一、异源多倍体的遗传特性	381
(一) 双二倍体的相对稳定性	381
(二) 部分双二倍体的稳定性相对较差	383

(三) 返亲分离与多样性	384
二、异源多倍体基因的分离	386
(一) 双二倍体	386
(二) 亲缘关系较近的四倍体双二倍体	389
(三) 部分双二倍体	390
三、异源多倍体的变异	392
(一) 染色体数量的变异	392
(二) 渗入杂交与染色体置换	393
(三) 染色体结构变异	393
(四) 外遗传变异	396
(五) 核-质互作	397
四、无性系遗传变异	398
(一) 异源无性系变异的特点	398
(二) 器官离体培养与体细胞类减数分裂现象	400
(三) 无性系变异的机理	402
五、可交配性及染色体配对的遗传控制	403
(一) 可交配性的遗传控制	403
(二) 染色体配对的遗传控制	404
(三) 染色体配对的评估	406
六、异源多倍体与物种进化	408
主要参考文献	411
第十三章 异源倍数体的利用	416
一、通过双二倍体创造新作物	416
(一) 小黑麦的创造	416
(二) 蔬菜中的新作物‘白蓝’	420
(三) 其他植物中的新作物	421
(四) 从物种到作物	421
二、异源倍数体新种质的创造	422
(一) 双二倍体种质材料的创造	423
(二) 部分双二倍体新种质	425
三、异源倍数体的诱变育种	429
(一) 植株及活体器官诱变	430
(二) 无性系变异的利用	432
四、超远缘杂交与倍性改良	433
(一) 超远缘杂交的实践与理论假说	433
(二) 植株活体遗传转化的兴起与应用	434
五、异源倍数体新品种选育	435
(一) 远缘杂交与新品种选育	436
(二) 以异源倍数体做桥梁种进行育种	441

(三) 特殊品种的选育	444
六、复合种质选育及综合工具种的利用	446
(一) 异源复合种质的合成	447
(二) 利用综合工具种进行轮回聚合选择	449
主要参考文献	451
第十四章 染色体工程	457
一、染色体工程的基本概念	457
二、同源染色体削减——单体和缺体	458
(一) 单体、缺体的起源与形态特征	458
(二) 单体、缺体的细胞遗传学	460
(三) 单体、缺体的主要用途	462
三、同源染色体添加——三体 and 四体	466
(一) 三体	466
(二) 四体	471
四、同源染色体的特殊变异类型——端体	473
(一) 端体的种类与起源	473
(二) 端体的主要用途	474
五、异附加系和异代换系	476
(一) 异附加系	476
(二) 异代换系	482
六、异源易位系	488
(一) 异源易位系的创建	488
(二) 异源易位系在植物育种中的利用	499
主要参考文献	503
第十五章 体细胞杂交与遗传操作	508
一、原生质体培养与体细胞杂交	508
(一) 原生质体及其培养	508
(二) 原生质体融合及体细胞杂交	509
二、体细胞杂交的有关细胞学问题	511
(一) 异核融合与异核体的有丝分裂	511
(二) 体细胞杂交的亲性和性问题	512
(三) 对称与不对称融合	513
三、体细胞杂种的遗传变异	514
(一) 表型性状的遗传变异	514
(二) 细胞核遗传变异	516
(三) 细胞质基因组的遗传	519
四、原生质体技术与遗传饰变	521
(一) 异源细胞核和染色体的摄入	522
(二) 质体和线粒体的摄入	522

(三) 微生物或藻类的摄入	523
(四) 外源 DNA 的摄入	523
五、体细胞杂交与遗传操纵	524
(一) 原生质体融合与双二倍体创建	524
(二) 非对称融合与遗传操作	527
(三) 转移细胞质基因	529
(四) 配子—体细胞杂交	531
六、体细胞杂交与植物育种	532
(一) 创造新物种	533
(二) 选育和改良细胞质雄性不育系	534
(三) 植物倍性育种中的特殊价值	537
(四) 在异染色体系及抗性育种中的应用	540
(五) 利用体细胞杂种进行新品种选育	542
主要参考文献	546
第十六章 异源核质杂种及其利用	554
一、细胞质遗传与核质杂种	554
(一) 细胞质与染色体外遗传	554
(二) 杂种和核质杂种	557
(三) 核质杂种的获得	557
(四) 核质杂种的遗传多样性	558
二、核质杂种的开发和利用	559
(一) 核质杂种的开发	559
(二) 细胞质遗传与抗逆育种	563
(三) 核质杂种与品质育种	567
(四) 核质杂种与稳定品种选育	569
三、核质杂种与雄性不育性利用	571
(一) 细胞质雄性不育的核质互作	572
(二) 细胞质雄性不育系的开发与改良	573
(三) 光温敏雄性不育及其利用	583
(四) 核质互作及光(温)敏核不育系的聚合改良	587
(五) 核质互作保持隐性核不育系的设计	587
四、高光效核质杂种育种	588
(一) 物种与光合特性	588
(二) 高光效的生物学基础	591
(三) 高光效育种的途径	595
主要参考文献	602
术语关键词(中英文对照)索引	609
植物学名索引	616
图版	

第一章 染色体——遗传物质的主要载体

染色体 (chromosome) 在细胞分裂间期为染色质 (chromatin), 是细胞核的主要成分和遗传物质, 所以细胞核遗传又称为染色体遗传 (chromosomal inheritance)。质体 (plastid)、线粒体 (mitochondria) 等细胞器以及某些共生体 (symbiote) 和细菌质粒体等所引起的遗传, 则属于染色体外遗传 (extrachromosomal inheritance)。在真核生物中由于染色体外遗传物质存在于细胞质中, 所以又将其称为细胞质遗传 (cytoplasmic inheritance)。但在植物中, 迄今研究最多、最主要的还是染色体遗传。

染色体作为遗传物质的主要载体, 具有相应的特征特性, 并和细胞分裂、世代交替密切相关。

一、染色体的基本结构

染色体是细胞核中重要而稳定的成分。染色体有特殊的化学成分和形态结构, 具有自我复制的能力, 并且积极参与细胞的代谢活动。

(一) 染色体的形态

染色体存在于细胞核中, 是一种不断运动的生活结构, 在细胞有丝分裂 (mitosis) 中期, 由于高度螺旋化而呈现出典型的形态特征。在有丝分裂间期, 由于处于不同程度的解螺旋状态, 所以看不到它的典型结构, 而表现为染色质。染色体和染色质是同一物质的不同动态形态。

有丝分裂中期所看到的染色体的典型形态与大体结构, 主要由着丝点及其所连接的两个染色体臂、随体、次缢痕 (核仁组织区)、端粒等组成。

染色体臂是遗传物质最集中的部位, 以着丝点位置的不同通常分为长臂 (L) 和短臂 (S) 等不同的类型 (图 1-1)。

1. 着丝点与着丝粒

着丝点 (regio centromere) 是在光学显微镜下可以分辨出的使两个姐妹染色单体保持连接在一起的主缢痕亦叫初缢痕

(primary constriction) 区, 是染色体 DNA 分子上的一段特殊序列。在着丝点序列附近, 有高度重复的卫星 DNA, 这些卫星 DNA 不能与组蛋白结合, 因此形成异染色质区域。着丝点缺乏明显分化的超微结构, 但却是染色体结构中一个不可缺少的重要组成

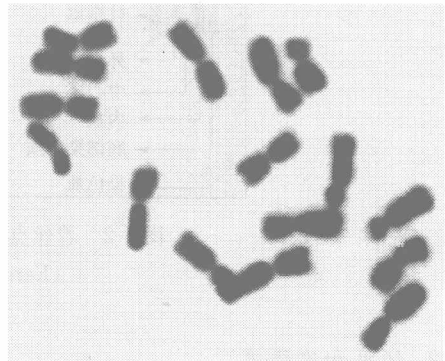


图 1-1 洋葱根尖细胞的染色体 ($2n=2x=16$)
(李树贤, 1981)

部分。一个染色体可以丢失一个臂或两个臂的大部分，例如 B 染色体或端体染色体，照样可以复制、分裂而增殖；但如果没有着丝点（着丝粒），便成为不能复制和自我繁殖的染色体断片，而终将被丢失。

着丝粒（centromere）仅指纺锤丝微管附着于染色体上的特殊结构，在光学显微镜下不能分辨，在电镜下其超微结构呈圆盘状、杯状或球形。此外，着丝粒和着丝点虽然空间位置是紧密联系的，但它们的结构和功能却有所不同。着丝粒与纺锤丝相连，决定着染色体有丝分裂时的方向，使染色体正确地分向两极。

着丝点由内向外可分为三个区域：最内一层为配对区，这一部分两个染色单体的染色质纤维交互联结，在细胞分裂中期之前使二者保持为一个整体，进入后期二者才分离。配对区向外是中央区，占着丝点的大部分，电镜下可以看到由单一的染色质纤维组成。最外层为着丝粒区，似盘状贴附在着丝点的外层。着丝粒的结构有多种形式，典型的为三层盘状物，纺锤丝微管主要吸附在外盘，少数可以伸入中央区到内盘，内盘通过底部染色质与着丝点染色质结合在一起（图 1-2）。

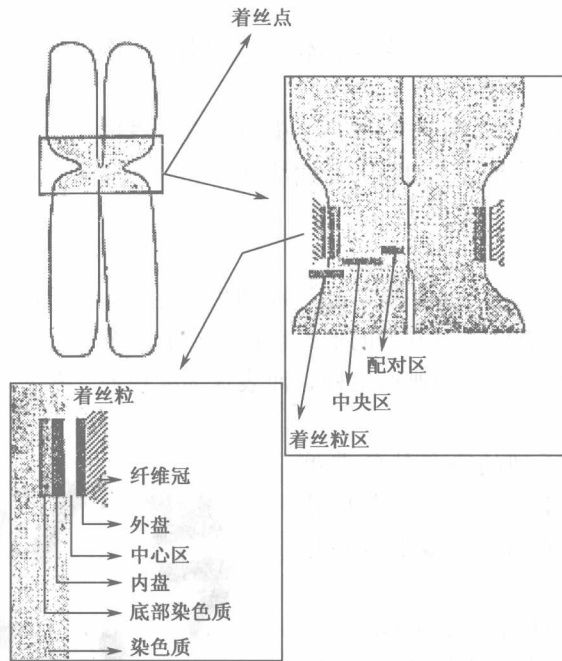


图 1-2 着丝点和着丝粒的结构示意图
(Earnshaw, 1989)

2. 缢痕和次缢痕

染色体的形态除了着丝点部位缢缩变细而外，在不同的物种中还经常发现在短臂或长臂的某一部位也会出现缢缩。着丝点部位的缢缩称为主缢痕或初缢痕。出现在染色体不同臂上的缢缩统称为次缢痕（secondary constriction）。主缢痕与次缢痕有如下方面的特征可供鉴别参考：

- (1) 次缢痕主要位于染色体的短臂上，极少数位于长臂或中部；