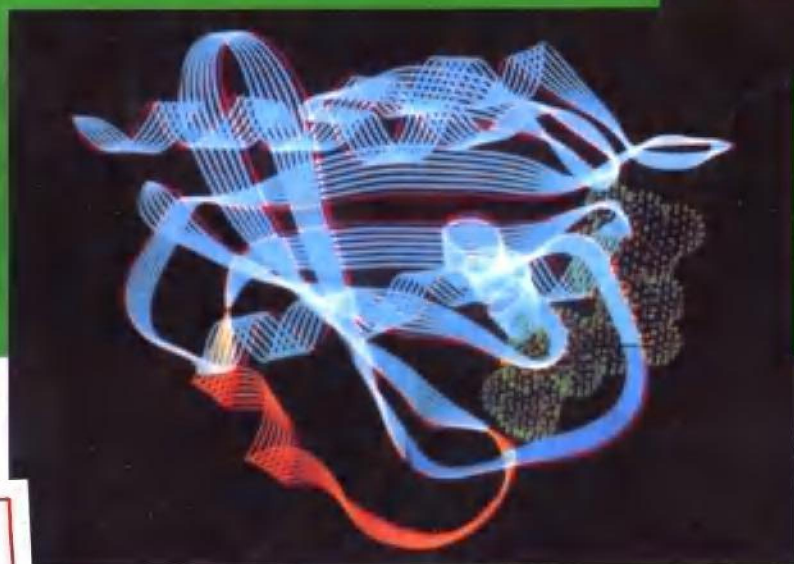
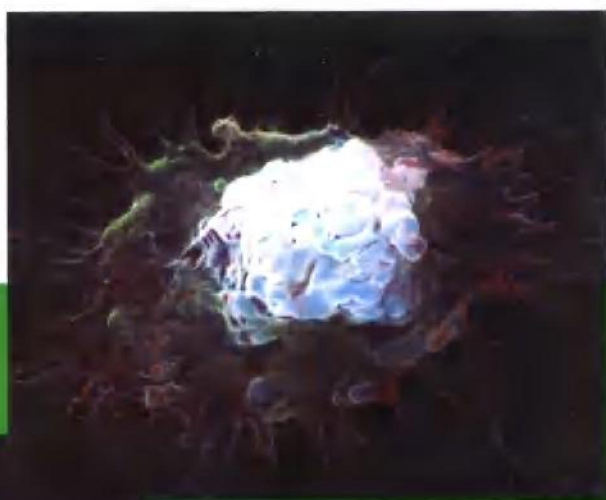


肿瘤分子生物学

主 编 孙 靖 中
邹 雄
主 审 马 挺 光



人 民 卫 生 出 版 社

肿瘤分子生物学

孙靖中 邹 雄 主编

马挺光 主审

编 委

马玉燕	史本康	孙靖中	钟 宁	毕冬松
李鲁传	李 宏	李宇新	余之刚	张庆殷
张小桥	张 楠	邹 雄	范子义	杨其峰
姜旭生	徐 欣	徐 峰	程宝泉	

7/29/22

人 民 卫 生 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

肿瘤分子生物学/孙靖中, 邹雄主编. —北京: 人民卫生出版社, 1998

ISBN 7-117-03073-9

I. 肿… II. ①孙…②邹… III. 肿瘤学-分子生物学
IV. R730

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 22933 号

肿瘤分子生物学

孙靖中 邹雄 主编

人民卫生出版社出版发行
(100078 北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼)

三河市潮河印刷厂印刷

新华书店经销

787×1092 16 开本 18 印张 412 千字

1998 年 12 月第 1 版 1998 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

印数: 00 001—3 000

ISBN 7-117-03073-9/R·3074 定价: 23.00 元

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

闡明腫瘤机理
普及腫瘤知識
促進腫瘤防治

祝腫瘤分子生物學出版

巴德年

一九九八年三月

應用分子生物學技術

提高腫瘤診治水平

楊興季

一九九八年

序

肿瘤是吞噬人类生命的恶魔，虽然人们与之斗争已许多年了，但收效甚微，并且发病率在上升，死亡率仍居高不下。但近年来，由于分子生物学的迅速发展，肿瘤基础研究有了可喜的突破性的进展，对肿瘤的发病机制有了更深入的了解，使得人类攻克肿瘤的愿望有了巨大的希望。虽然因研究的时间尚短，尚需进一步深入完善，且目前离临床应用仍有较大的距离，但只要方向明确，坚定地奋斗下去，攻克肿瘤的时间一定不会太长了。

肿瘤分子生物学是一门从基因和分子水平来对此学科研究肿瘤的病因及发病机制的新兴学科，发展很快，对许多临床工作者是不太熟悉的。然而它的研究范围广泛，在诊断治疗中的潜力巨大，可能是将来诊治肿瘤的根本方法。因而需要吸收大量的青年志士来参加研究，特别是要使临床工作者了解和参与这一工作，使研究能得以全面发展并逐渐与临床工作相结合，早日应用于临床。然而国内系统地、深入浅出地介绍这方面知识的书籍很少，《肿瘤分子生物学》一书的出版提供了极好的参考资料，能够起到普及和提高的作用，使临床医师受到这方面的训练和培养，使年轻的医师易于掌握基础知识和研究方法。

山东医科大学外科孙靖中教授、邹雄教授多年来从事肿瘤研究，近年来致力于肿瘤分子生物学的研究，他们邀请了许多具体作这方面研究的、掌握了新知识和技术的中青年专家与学者共同撰写了这一本专著，详尽地阐述了肿瘤分子生物学的基本知识、基本技术和有关肿瘤分子生物学的知识，并介绍了当前肿瘤分子生物学在临床应用的状况和前景。

这是一本具有较高学术水平的参考书，它的出版无疑会对开展肿瘤分子生物学的研究起到积极的推动作用。并为早日攻克肿瘤作出贡献。我热忱地向广大医师，特别是有志于肿瘤研究的中青年医师推荐此书。

北京协和医院 外科

钟守先

前言

癌症研究已有几百年历史了，但至今癌症仍在人群中猖獗肆虐。按世界卫生组织 1995 年资料，全世界每年新发现癌肿 700 万，每年死于癌肿人数 500 万；我国 1996 年癌症发病人数 180 万，死亡人数 128 万。就人群的死亡病因而言，肿瘤是西方国家仅次于冠心病，是中国仅次于脑血管病的第二位死因；就死亡率而言，肿瘤却高居各病首位，成为当代威胁人类健康最严重的疾病。

1975 年，美国政府鉴于肿瘤对人类的危害，宣布了调动大量人力、物力的“向癌症宣战”。这是人类第一次把攻克一种疾病作为国策之一，企图利用强大的国力来攻克肿瘤。世界上许多事物发展常常不以人们的意志为转移，1993 年的美国总统防癌委员会在总结“向癌症宣战”以来的研究进展时发现，15 年中投入了 250 亿美元，癌症的发病率上升了 7%，5 年生存率仅提高了 4%。最近，学术界在总结几十年防治癌症的经验教训时指出：在继续按照传统的思路提高手术、化疗、放疗疗效的同时，还应另辟蹊径寻找攻克癌症的新途径。

近十余年来，肿瘤学在基础理论研究上取得了突破性进展，令人鼓舞，人们从中看到了攻克癌症的光明前景。这就是以癌基因及生长因子为中心的肿瘤分子生物学。

癌症的本质是不受正常生理机制调控的细胞无限制增生。所以长期以来，科学家就把研究焦点集中到控制细胞增生的细胞核上。近 20 年来，随着研究的逐步深入，研究工作从细胞核到染色体，最后到基因水平。肿瘤研究深入促进了基因分析技术的进步，并且在 70 年代提出了癌基因学说，80 年代提出了生长因子学说。前者阐述了哪些基因失调导致了癌症的发生；后者则从细胞内分泌和受体角度阐明了细胞增生的生化机制。这两个学说既独立又互相依赖，癌基因的突变、失调是癌症发生的起因，而癌基因的突变又常常通过促使生长因子分泌和激活生长因子受体诱导细胞增生。根据这两个学说，人们逐渐在基因水平和分子水平认识了癌症的发病机制。大量的动物实验和部分临床研究结果证实了这两个学说是迄今为止最接近肿瘤本质的理论。由于研究时间尚短，这一理论还未带临床实践上的根本变化，但其光明前景却为众所首肯。

由于分子生物学在肿瘤诊治研究中的巨大潜力，吸收了许多有识之士投入这一工作，和蓬勃发展的肿瘤分子生物学相比，国内相应的参考书籍就显得匮乏。为此，我们自 1995 年起组织了一批从事过肿瘤分子生物学工作的博士、硕士，根据自己的工作经验，参照了国内外相应的资料，历时三年编写了这本《肿瘤分子生物学》。

考虑到大部分读者是临床工作者，本书主要介绍基础知识，以普及肿瘤分子生物学

为主要目的。全书共分三篇、十九章。第一篇为概论，介绍分子生物学的基本知识、基本技术和肿瘤分子生物学的发展史；第二篇为理论篇，介绍肿瘤分子生物学有关的知识；第三篇为应用篇，介绍当前国际上肿瘤分子生物学实际应用的一些动态。必须指出的是：肿瘤分子生物学是一门年轻的学科，我们还在学习和探索之中，这次我们编辑出版此书实为抛砖引玉之举，期望更多有识之士利用分子生物学研究肿瘤，也期望这方面的专家指正。

我们深切感谢第四军医大学马挺光教授为我们审阅了全稿，提供了不少资料和宝贵的意见；感谢山东医科大学附属医院和图书馆给予的大力支持。

在此，我们也感谢乔效明为本书绘制插图，赵森、孙小萌为本书打印、编排所做的大量工作。

孙靖中 郅 雄

1998年4月

目 录

第一篇 概 论

第一章 分子生物学基础	1
第一节 早期分子生物学发展史	2
第二节 DNA 双螺旋结构	3
第三节 中心法则和逆转录酶	6
第四节 基因表达的调控	10
第五节 癌基因和抑癌基因的发现	13
第六节 生长因子	15
第七节 分子生物学的技术突破	18
第八节 基因治疗	21
第二章 分子生物学基本技术	27
第一节 核酸分子杂交技术	27
第二节 聚合酶链反应技术	43
第三节 DNA 分子克隆	51
第四节 核酸序列测定	58
第五节 单克隆抗体的制备	64

第二篇 肿瘤分子生物学

第三章 癌基因	66
第一节 原癌基因	66
第二节 癌基因	67
第四章 抑癌基因	75
第一节 概念及分类	75

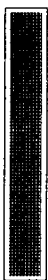
第二节	抑癌基因的功能	76
第三节	抑癌基因及其研究现状	76
第四节	临床应用及展望	84
第五章	显性癌基因的激活与隐性癌基因的灭活	86
第一节	人类癌基因的突变类型	86
第二节	显性原癌基因的激活突变	88
第三节	肿瘤抑制基因的灭活	94
第六章	几种重要癌基因的作用机制	98
第一节	临床肿瘤学中的 bcl-2 基因	98
第二节	三磷酸鸟苷结合蛋白与癌症	103
第三节	EGFR 和 c-erbB2 的过度表达与肿瘤的关系	108
第四节	p53 基因与肿瘤的关系	117
第七章	几种常见肿瘤的癌基因	121
第一节	胃肠道肿瘤	121
第二节	肺癌	123
第三节	乳腺癌	124
第四节	神经母细胞瘤	125
第五节	生殖-泌尿系肿瘤	126
第六节	血液系统恶性肿瘤	127
第八章	基因的转换模型	130
第一节	转基因小鼠模型的建立	130
第二节	利用转基因小鼠对癌基因作用的研究	133
第三节	利用转基因小鼠对致癌原、肿瘤的预防和治疗的研究	140
第九章	细胞周期和癌细胞的分化	142
第一节	细胞周期与肿瘤	142
第二节	细胞分化与肿瘤	146
第十章	癌细胞的逆转	152
第一节	概述	152
第二节	细胞凋亡	153
第三节	癌细胞的分化能力	154
第四节	细胞恶性转化与逆转	157
第五节	癌细胞逆转的实验研究现状与展望	157

第十一章 病毒与肿瘤	162
第一节 历史回顾	162
第二节 病毒的致癌机制	162
第三节 病毒与人类肿瘤	166
第四节 评价与展望	171
第十二章 免疫与肿瘤	173
第一节 肿瘤抗原	173
第二节 荷瘤机体的免疫反应	176
第三节 肿瘤细胞的免疫逃逸	180
第四节 肿瘤的免疫治疗	182
第十三章 遗传与肿瘤	188
第一节 遗传因素在肿瘤发病中的作用	188
第二节 肿瘤与染色体异常	192
第十四章 激素与肿瘤	198
第一节 概述	198
第二节 分类及生化过程	199
第三节 激素受体与肿瘤	202
第四节 各种激素与人类肿瘤	202
第五节 激素的临床应用与展望	209
第十五章 肿瘤的扩散	212
第一节 肿瘤扩散的细胞行为	212
第二节 肿瘤扩散的分子基础	213
第三节 肿瘤细胞的扩散与细胞膜寡糖的关系	218
第四节 肿瘤转移基因	219
第五节 肿瘤转移抑制基因	220
第六节 MHC 与肿瘤转移	223

第三篇 分子生物学在肿瘤诊断与治疗中的应用

第十六章 分子生物学在肿瘤诊断中的应用	228
第十七章 化疗与分子生物学	235
第一节 概述	235
第二节 常用化疗药分类、作用机制及一些新的使用方法	235

第三节	肿瘤化疗的新靶点	239
第四节	肿瘤耐药性	242
第十八章	放疗和分子生物学.....	247
第一节	生物大分子的放射效应	247
第二节	放射敏感性的分子生物学基础	249
第三节	放射引起某些细胞因子改变的分子生物学基础	254
第四节	分子生物学在放疗中的应用	257
第十九章	肿瘤基因治疗.....	260
第一节	概论	260
第二节	肿瘤基因治疗中攻击肿瘤细胞的靶细胞	260
第三节	基因转移方法	262
第四节	基因调控	263
第五节	目的基因的选择和在肿瘤基因治疗的应用	264
第六节	肿瘤基因治疗的策略	272
第七节	肿瘤基因治疗存在的问题和展望	274



第一篇 概 论

第一章 分子生物学基础

20世纪是人类科学史上的黄金时代。纵观 20 世纪,人类已公认热核反应的发现与应用、计算机诞生与普及、分子生物学的建立与发展是最重大的科学成果。科学界预测 21 世纪的领导科学将是分子生物学为核心的生命科学、以计算机为中心的信息科学以及环保科学。这三大学科的发展将推动、指导其它学科的发展。

分子生物学是一门重要的新理论,它通过研究基因、生长因子,阐述人体遗传、生长、发育的规律。并从基因和生长因子的变异研究许多重大疾病,如:肿瘤、心血管病、遗传病、感染、免疫的发生、发展的病理本质,为攻克这些疾病提供了新的理论基础。与此同时,分子生物学技术也逐步形成。分子生物学理论与分子生物学技术相互推动、发展,如:基因工程技术改变了许多自然界存在生物的性状。分子生物学正逐渐应用于医学临床,为认识诊治许多疾病开创了更新的领域。分子生物学将会极大影响和改变农牧业、人口、药学、医疗、环境等许多关系国计民生的重大问题,造福于人类。

和其他自然科学一样,分子生物学的发展也有着曲折的历史。由于其对人类和社会的特殊重要性,分子生物学研究成果频繁地出现在诺贝尔奖名单上,从 1962~1995 年有关分子生物学获诺贝尔奖的工作展示了一部完整的分子生物学发展史(表 1-1)。

表 1-1 三十年来有关分子生物学诺贝尔获奖名单和内容

年份	获奖者	内 容	所获的诺贝尔奖
1962 年	J. D. Wasten, H. C. Click	DNA 双螺旋结构	诺贝尔生理和医学奖
1965 年	F. Jacob J. L. Monod	基因调控乳糖操纵子	诺贝尔生理和医学奖
1966 年	F. P. Rous	病毒致癌学说	诺贝尔生理和医学奖

续表

年份	获奖者	内 容	所获的诺贝尔奖
1968 年	R. W. Holley H. G. Khorana M. W. Nurenberg	核糖核酸中心法则	诺贝尔生理和医学奖
1969 年	M. Delbruck A. D. Hershey S. E. Luria	噬菌体基因研究	诺贝尔生理和医学奖
1972 年	S. Moore W. H. Stein	核糖核酸三维结构	诺贝尔化学奖
1974 年	A. Claude G. E. Palade	分离细胞发现 RNA 病毒	诺贝尔生理和医学奖
1975 年	D. Baltimore H. M. Temin R. Dolbeco	逆转录酶, DNA 病毒	诺贝尔生理和医学奖
1978 年	W. Arber D. Nathens H. O. Smith	DNA 限制性内切酶	诺贝尔生理和医学奖
1980 年	P. Berg W. Gilbert	重组 DNA DNA 顺序分析	诺贝尔化学奖
1982 年	A. Klug	核酸蛋白复合体	诺贝尔化学奖
1986 年	R. L. Montalcini S. Cohen	生长因子	诺贝尔生理和医学奖
1988 年	G. Eline G. Hitchigns	抗 DNA 合成类药物	诺贝尔生理和医学奖
1989 年	J. M. Bishop, H. E. Varmans T. Cach S. Altman	癌基因学说 RNA 酶催化活性 (Ribozyme)	诺贝尔生理和医学奖 诺贝尔化学奖
1993 年	R. Roberts, P. sharp K. B. Mullis M. Smith	断裂基因 PCR 仪 寡聚核苷酸介导基因突变法	诺贝尔生理和医学奖 诺贝尔化学奖 诺贝尔化学奖
1994	A. Gliman M. Rodbell	信号传导和 G-蛋白	诺贝尔生理和医学奖
1995 年	E. B. Lewis, C. Nusslein-Volhard, E. Wieschaus	基因和果蝇突变关系探讨	诺贝尔生理和医学奖

第一节 早期分子生物学发展史

1865 年德国修道士孟德尔(Gergor Mendel)通过研究豌豆性状遗传性提出了遗传的基本规律——孟德尔定律。1896 年法国的米歇尔(Miesher)从死亡的白细胞核中分离出 DNA。由于知识和条件所限,上述两大重要发现均未被当时科学界所重视,但是这两项

发现缓慢而各不相关地发展着。

1882年弗莱明(Fleming)发现了原核细胞的无丝分裂,1891年雷马克(Remark)发现了有丝分裂。1903萨顿(Walter. Sutton)提出了染色体是遗传物质基础的设想。同年,丹麦的约翰逊(Wilhelm Johannsen)第一个使用“基因”(gene)表达生物体内的遗传物质。1910摩尔根(T. H. Morgan)以果蝇为对象研究了遗传和变异,从实验中探讨了染色体在遗传中的变化规律,1926年他出版了《基因论》,从染色体角度总结了遗传规律。细胞核中的染色体是遗传物质的载体,基因有规律地排列在染色体上。由于摩尔根在染色体,遗传方面所作的重大贡献,获得了1933年生理学和医学诺贝尔奖,从此建立了细胞遗传学,以染色体为主体研究遗传规律。1956年莱温(A. Levan)和华裔学者蒋有兴提出了人类细胞核含26对染色体。60年代末又发现了染色体显带技术。

1944年艾弗里(Oswald Avery)等证明了遗传信息载体——染色体的本质是DNA。至此,孟德尔和米歇尔两位先驱者的发现在此交汇,形成一门新科学——分子遗传学。由于染色体从细胞水平(分子量 $1.5 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$)反映了遗传规律,解释了遗传性疾病在染色体水平的变化,细胞遗传学至今仍在发展。分子生物学(分子遗传学)从研究DNA变化着手,更精细反映了遗传的变化规律,而且和生化、生理、免疫学相结合使其内涵更丰富,技术应用范围更广,逐渐占据了遗传学的主导地位。分子遗传学成为分子生物学一个重要分支。

第二节 DNA 双螺旋结构

1953年是分子生物学发展的里程碑,在这以前艾弗里(Avery)已经推论DNA是遗传的物质基础,但当时对于DNA的组成和结构无人知晓。作为遗传物质基础的DNA结构应该具备两个基本条件:①必须具有多样性,能解释生物遗传性状的千变万化;②必须具有把遗传物质准确复制下来的功能。英国学者威尔金斯(Wilkins)和富兰克林(Franklin)利用当时新兴的X线衍射技术探讨DNA的结构,证明DNA是双链结构,摄制了“B型”DNA X线衍射模型。同时,查戈尔(Chargall)发现了碱基相配的规律:在一个聚核苷酸链上,嘌呤和嘧啶数目永远相等,即A-G、C-T相配。沃森和克里克在研究DNA结构时参照了古兰(Gulland)提出的碱基和碱基可与氢键相连接的结论,他们反复设计DNA结构模型,最后发现DNA由两条多聚核苷酸链呈螺旋结构,而每条多聚核苷酸链中碱基呈规律性分布。

1953年4月25日沃森和克里克在《自然》杂志正式发表DNA双螺旋结构的模式,根据这一模式,DNA一级结构是由两条平行连在一起很长的多聚核苷酸链按一定的碱基顺序排列的。两条主链间由氢键相连,犹如一架梯子,每一条多聚核苷酸链都由脱氧核糖核酸和碱基组成,组成DNA的碱基有4种:腺嘌呤(adeneri, A)、鸟嘌呤(guanine, G)、胸腺嘧啶(thymine, T)、胞嘧啶(cytosine, C)。在两条平行链上A-T、G-C配对,每条链上嘌呤数和嘧啶数相等, $A=T$, $G=C$ 。由于4种碱基对可以任意排列,长度为n碱基单位的DNA就可能有 4^n 种排列顺序。如含100碱基对的DNA,可有 4^{100} 的排列结果,其多样性满足了生物遗传性状分化的要求。

DNA的二级结构分两大类。一类是右手螺旋即A型DNA, B型DNA及C型DNA,

另一类是局部的左手螺旋即 Z-DNA。在右手螺旋中，主要是 B 型 DNA，这是 DNA 钠盐在一定温度下的结构，这种结构既规则又稳定。它是两条反向平行的多核苷酸链围绕同一中心轴构成的右手螺旋结构，两条链上的碱基以氢链相连，G 与 C 配对，A 与 T 配对，大约每 3.4nm 为一个周期，含 10 个核苷酸，双螺旋直径为 2.0nm(图 1-1)。若温度改变或 DNA 钠盐变为钾盐、铯盐，亦形成 A 型、C 型构象。在纯化 DNA 时，如用乙醇沉淀，大部分 DNA 由 B 型经 C 型变成 A 型而沉淀。当 DNA B 型成 A 型时，碱基平面和轴线夹角由 0° 增至 20° ，每一周的核苷酸为 11 对，螺旋距由 3.4nm 缩小至 2.8nm。DNA 的三级结构为超螺旋结构，大多数为双链环型分子。在染色体内的 DNA 形如盘卷折叠的螺旋状梯子，经过高度压缩，一个人类细胞 $6\mu\text{m}$ 直径的细胞核能容纳长达 $1.6\sim 1.8\text{m}$ 的 DNA。DNA 对称的双螺旋结构，以及两条由互补碱基组成的链，这样的结构便于自我复制。

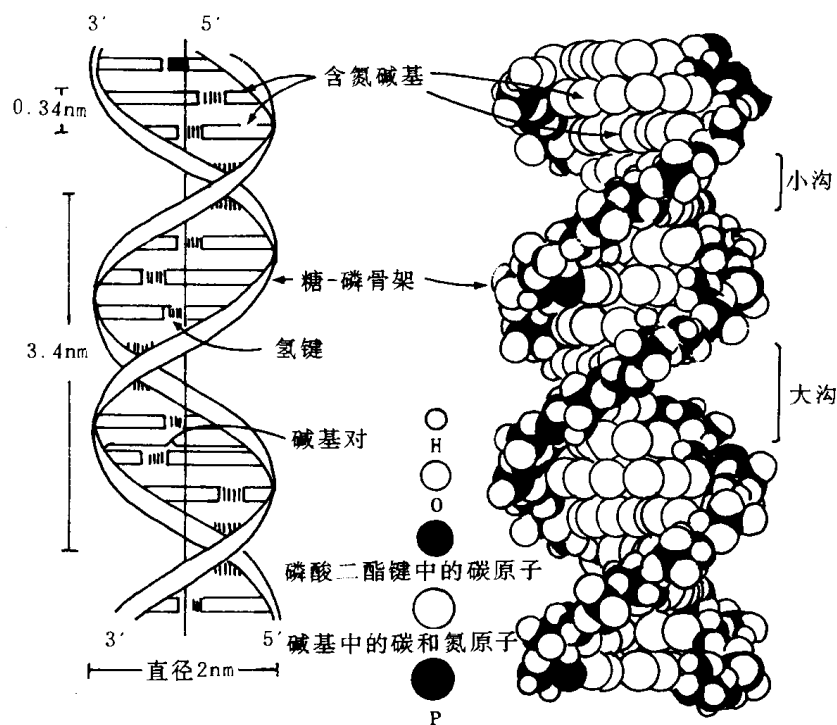


图 1-1 DNA 的双螺旋结构

复制时母代双螺旋 DNA 像拉链一样，自动分解成两条链，然后再以各自为模板，根据 A-G、C-T 配对原则形成二条和原链互补的新链，为了保证复制的精确，DNA 复制时，须有 DNA 聚合酶参与，该酶具有外切酶活性，能识别和消除不配对的引物末端，对 DNA 复制链起了校对作用。最终，携带遗传信息的一条 DNA 复制成完全相同的二条 DNA，母代信息传给了子代这一 DNA 结构和半保留复制的学说满足了作为遗传物质必需的条件，揭示了遗传的奥妙，轰动了当时科学界，被认为是生物学史上一次伟大革命，奠定了分子生物学的基础，威金斯、沃森和克里克因此获得了 1962 年诺贝尔奖。

随着他们工作不断发展，学术界认识到染色体主要成份是盘曲得很紧的双螺旋 DNA 分子，所谓基因就是 DNA 链中一个片段。DNA 链上 4 种碱基对按不同顺序排列，三个碱基对组成了一个密码，代表了一个氨基酸。一个基因实际上就是编码一种蛋白质的

DNA 单位,表 1-2 示和 DNA 相对应的 RNA 遗传密码,按表核苷酸排列有 64 种密码子,其中少数几个密码子如 UAA、UAG、UGA 为修正码,AUG 为起始码,GUG 通常为缬氨酸密码同时也可能是 mRNA 甲硫氨酸起始码,从表中还可见一种氨基酸可能有多种密码。根据 DNA 半复制原理子代生物体的双链 DNA 一条来自母体,一条来自父体。染色体上同一位点的基因称等位基因(alleles),如果这基因中来自父母亲两个 DNA 片段结构完全一致,称为纯合子,如果等位基因的 DNA 双链结构不同称为杂合子,纯合子 DNA 双链编码的 mRNA 和最终编码产物(其最终表达结果称为表型)多肽也相同。更多见的是杂合子,如杂合子两段基因都是异常的,亦是无活性的基因,那么这一基因也将成为无活性变异。但这种情况比较少见,更多见的杂合子情况是,其最终结果(表型)取决于 DNA 链表现,杂合子一条 DNA 链基因型(正常和异常的)和表型不一致称隐性遗传;杂合子上基因(正常和异常的)和表型一致的称为显性遗传。杂合体也可以表现出两个基因表型,如一个 AB 血型的人,既产生抗原 A 的基因表型,又产生抗原 B 的基因表型,这种等位基因称共显性。如果两个基因在同一染色体上,它们常常同时表现这种情况称为连锁。当连锁基因位于性染色体上,随性染色体表现,称性连锁。由于性染色体一条 DNA 来自父体 Y 基因,一条 DNA 来自母体 X 基因,两条基因非同源,一个隐性突变母体的性基因 $X^D X^R$ 和一个正常父本 $X^D Y$ 婚配后,就有可能产生子代 $X^R Y$,这时 X^R 可以成为显性基因使子代得病机会为 50%,当父本有一个隐性 X^R 基因和母本隐性基因 $X^R X^D$ 结合,他们的女儿可能产生异常 $X^R X^R$ 等位异常基因(纯合子)遗传机率为 50%,这种和性染色体连在一起的异常基因在遗传时往往在部分子女中再现显性异常,称为 X 性连锁。

1974 年 Klug 证明染色体以串珠形式存在,每个珠子直径 10nm,称为核小体(nucleosome),其成份为 4 种组蛋白 H_2A 、 H_2B 、 H_3 和 H_4 包绕着 140~200 个碱基对的 DNA 片段,这种 DNA-蛋白复合体即染色体。图 1-2 示 DNA 双链和核小体盘曲浓缩形成染色体,这一模型对研究细胞控制功能有十分重要意义,Klug 为此获得了 1982 年诺贝尔化学奖。

1964 年 Leder 等阐明了三个碱基对编码一个氨基酸。一般蛋白质平均约含 300 个氨基酸,相应需要 1000 个碱基对(bp),一个基因仅是编码一种蛋白质的 DNA 片段。目前学术界认为各种生物所含 DNA 量不同,病毒、细菌的 DNA 链长约 10^3 bp,原核生物含 DNA 10^6 bp,真核细胞含 DNA 10^9 bp,人类全部 DNA 约含 30 亿个 bp,相当 300 万个基

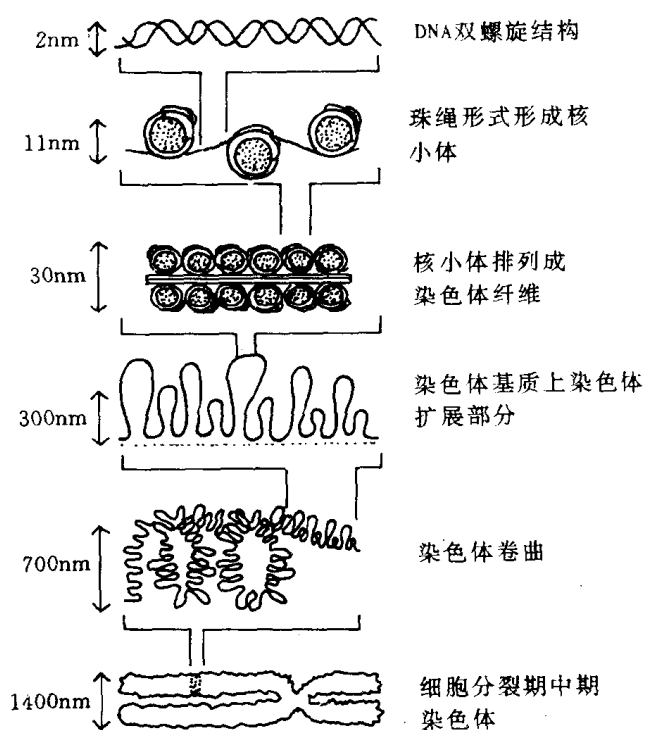


图 1-2 基因和染色体