

# 医学细胞与分子生物学

(第二版)

陈诗书 汤雪明 主编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 医学细胞与分子生物学

(第二版)

陈诗书 汤雪明 主编

科学出版社

北京

## 内 容 提 要

本书共分五篇三十章,包括总论,生物大分子的结构与功能,细胞的结构与功能,基因的复制、表达与调控以及若干细胞与分子生物学专题。本书的特点是把医学细胞生物学和医学分子生物学的内容结合起来,既介绍了细胞与分子生物学的基本理论、知识和技术,又反映了这一领域的最新进展,并对当前的发展前沿和研究热点如干细胞、转基因动物、肿瘤和艾滋病的分子基础以及基因诊断和基因治疗等作专题介绍。

本书可用做医学院校研究生、博士学位医学生、七年制医学生、五年制本科生和进修生的教材,也可供教师、科研人员和医生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

医学细胞与分子生物学/陈诗书,汤雪明主编. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-012329-8

I. 医... II. 陈... III. ①人体细胞学:细胞生物学  
②分子生物学 IV. ①R329.2②Q7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 091590 号

责任编辑:潘志坚 / 责任校对:连秉亮

责任印制:刘 学 / 封面设计:一 明

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>

上海交大印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

1995年2月第一版 上海医科大学出版社出版

2004年1月第二版 开本:787×1092 1/16

2004年1月第一次印刷 印张:59 1/4

印数:1—4 000 字数:1 390 000

定价:98.00元

# 《医学细胞与分子生物学》

## 编辑委员会

主 编:陈诗书 汤雪明

编 委:(以姓氏笔画为序)

王一飞	王亚新	王克夷	王敦瑞	孔良曼
卢 健	朱 平	任兆瑞	汤雪明	孙岳平
杨 洁	杨晓煜	陈诗书	易 静	赵涵芳
胡庆沈	夏爱娣	徐 晨	高 飞	钱书兵
钱关祥	黄心智	黄海霞	章有章	章保平
曾益涛	戴冰冰			

## 第一版前言

自1966年停止招收研究生到1978年恢复正规研究生制度,整整有12年的间隔,这段时间国际上生物化学、细胞生物学以及分子生物学正好是以十分迅猛的速度发展着的,因此,恢复研究生课后首先的大事是要补这巨大的空缺。作为教师,我们如饥似渴地学习生物学领域中的新知识、新概念、新理论和新技术,当时我们对研究生开设的课程有点像补课的性质,以高级生物化学及细胞生物学内容为主,分别开设理论及实验课程。经过四五年的补缺之后,大学的普通生物化学的内容有了大幅度的更新和补充。我们对研究生开设的课程便逐步以分子生物学及现代细胞生物学的内容为主。近十年来的实践证明,细胞生物学和分子生物学这两门课是研究生的重点课程,选修的学生数最多,并常作为必修的学位课程,对研究生的课题研究和日后的工作也有很大的帮助。

细胞生物学和分子生物学虽分别由不同的教研室承担,但是在教学过程中,我们相互间不断对这两门课的有关内容进行调整,以求内容能有机联系,加强其整体性。我们深深体会到,要学好分子生物学,必须有良好的细胞生物学基础,而细胞生物学的进一步深化必是分子生物学。因此,我们设想若能在教材上联贯统一起来,一定会取得更好的效果。经过反复酝酿,我们决定合编一本教材,以十几年修改多次的教材为基础,在内容的组织安排上努力将细胞生物学和分子生物学联贯统一起来。同时考虑到授课的方便,将细胞生物学和分子生物学中相对独立的内容,分别集中成章编写。本书的第一部分中“从分子、细胞到人体”这一章作为本书的绪论,然后着重介绍当代研究细胞生物学和分子生物学的基本技术方法,重点为原理方面的介绍。第二部分论述组成细胞的大分子物质,以蛋白质和核酸的结构和功能为中心。第三部分论述细胞的各种亚细胞结构及其功能以及细胞的生长与分裂、联系与识别的分子生物学基础。第四部分则以分子遗传学为中心论述基因的组织结构、复制,转录和翻译以及基因表达的调控等问题。第五部分介绍若干细胞分子生物学专题。在过去几年中,这最后一部分内容经常有变动,因为是以讲座(seminar)形式进行的,它反映的是细胞生物学和分子生物学发展的前沿及研究热点,部分课又是邀请国内外的专家来讲授,因此,每学年的专题不完全相同,本书只编入几个相对稳定的专题,如受精、AIDS的分子生物学、分子免疫学、肿瘤的分子基础、基因诊断学及基因治疗的基础等。

两年多来,在全体编写者的努力及上海医科大学出版社的热情支持下,书终于出版了。当然,有许多不足甚至错误之处,今后将吸收各方面的意见,不断修改补充,希望能成为一本对基础医学和医学研究生、进修生有用的教材,也能作为广大医药卫生科技工作者的参考书。

编者

1994年4月

## 第二版前言

《医学细胞与分子生物学》于1995年由原上海医科大学出版社出版以来,重印数次,得到国内同行的鼓励和广大读者的支持。为反映近几年生命科学的飞速发展和满足研究生的教学以及广大医学工作者的参考,我们决定重新编写出版。

《医学细胞与分子生物学》(第二版)仍然由五大篇组成,但内容方面作了较大幅度的更新、补充和调整,由原来的24章增至30章。近年来在细胞生物学和分子生物学领域的科研中,涌现了许多新技术方法,我们适当选择一些有代表性的技术方法编纳于第一篇。生物大分子已向基因组学、蛋白质组学、RNA组学等深入发展,这些新进展也反映在第二篇中,同时把原来第四篇的基因的组织结构调整至第二篇并与DNA合并成为第四章(DNA和基因组)。近年来对小分子非信使RNA(Small non-messenger RNA, snmRNA)特别是siRNA和微RNA的研究进展十分迅速,有必要将RNA另立一章。细胞的结构与功能篇除保留了原来的基本结构外,还介绍了细胞的物质运输、信号转导、细胞增殖、分化和死亡等内容。第四篇仍然是围绕分子遗传学的新进展编写。在第五篇新增添了干细胞、转基因动物和生物信息学在分子生物学中的应用等三章。

本书的作者除上海第二医科大学的一些教师外,还邀请一些国内外专家撰写他们所擅长专业的相关章节。编者尊重作者的写作原意,在此对他们致以诚挚的感谢。

编者的水平有限,为保证本书的质量,我们邀请了一些资深的教授、研究员及第一线的研究人员,对有关的章节进行严格的评审和把关,不少章节经3~4位专家重复评审,编者在此对这些专家表示衷心感谢。这些评审专家是(按姓氏笔画为序):王克夷研究员、祁国荣研究员、陆长德研究员、杨劲松博士、何尧祥教授、沈翊珩教授、陈惠黎教授、胡以平教授、郑仲承研究员、黄薇研究员、童坦君教授等。

本书之所以能够成功编写与上海市教委、上海第二医科大学教务处和研究生处的资助是分不开的。编写过程还得到徐让、李布、杨红英、吴兆平、徐荣婷、朱莺和刘扬等同志的帮助,特此致谢。最后编者感谢科学出版社热情组织我们编写此书。

陈诗书 汤雪明

2003年6月

# 目 录

第二版前言

第一版前言

## 第一篇 总 论

<b>第一章 从分子、细胞到人体</b> .....	3
第一节 在细胞与分子水平上阐明生命现象 .....	3
第二节 细胞的进化 .....	5
第三节 分子细胞生物学与现代医学 .....	8
参考文献 .....	11
<b>第二章 细胞生物学技术</b> .....	13
第一节 显微镜技术 .....	13
第二节 细胞培养技术 .....	20
第三节 细胞结构成分的离心分离技术 .....	23
第四节 细胞化学技术 .....	27
第五节 分析细胞学技术 .....	34
第六节 细胞工程 .....	40
参考文献 .....	44
<b>第三章 分子生物学技术</b> .....	45
第一节 分子生物学中常用的工具酶 .....	45
第二节 常用载体及宿主细胞 .....	47
第三节 重组 DNA 技术 .....	55
第四节 其他常用的分子生物学技术 .....	60
参考文献 .....	80

## 第二篇 生物大分子的结构与功能

<b>第四章 蛋白质及蛋白质组</b> .....	83
第一节 蛋白质对生命的重要性 .....	83
第二节 蛋白质的构件分子——氨基酸 .....	86
第三节 蛋白质分子的基本结构及其与功能的关系 .....	89
第四节 蛋白质分子的空间结构及其与功能的关系 .....	95
第五节 蛋白质的单体缔合、超分子装配及蛋白质-蛋白质、蛋白质-DNA 相互作用 .....	110
第六节 蛋白质组 .....	114
参考文献 .....	116
<b>第五章 DNA 及基因组</b> .....	117

第一节 DNA 的结构与功能 .....	117
第二节 基因 .....	125
第三节 基因组的结构与功能 .....	129
第四节 人类基因组计划与后基因组计划 .....	142
参考文献 .....	147
<b>第六章 RNA .....</b>	<b>148</b>
第一节 RNA 的研究简史 .....	148
第二节 生命起源——RNA .....	149
第三节 RNA 基本结构与功能 .....	151
第四节 各类 RNA 的结构与功能 .....	153
第五节 RNA 组学 .....	167
参考文献 .....	168
<b>第七章 生物催化剂 .....</b>	<b>170</b>
第一节 酶与核酶在催化作用上的异同 .....	170
第二节 生物催化剂的结构基础 .....	171
第三节 生物催化剂高效催化的作用机制 .....	176
第四节 基本反应动力学 .....	181
第五节 生物催化剂活性的调节 .....	192
参考文献 .....	204
<b>第八章 糖复合物 .....</b>	<b>205</b>
第一节 糖复合物的存在与分布 .....	205
第二节 糖复合物的结构 .....	206
第三节 糖复合物的代谢 .....	213
第四节 糖复合物的生理功能 .....	219
参考文献 .....	226
<b>第三篇 细胞的结构与功能</b>	
<b>第九章 细胞膜 .....</b>	<b>229</b>
第一节 细胞膜的化学组成和结构 .....	229
第二节 生物膜对小分子物质的运输 .....	249
参考文献 .....	270
<b>第十章 细胞质 .....</b>	<b>271</b>
第一节 细胞质的组成 .....	271
第二节 内质网 .....	275
第三节 高尔基体 .....	284
第四节 溶酶体 .....	291
第五节 过氧化物酶体 .....	298
第六节 线粒体 .....	300



参考文献	319
<b>第十一章 细胞骨架</b>	321
第一节 细胞质骨架	321
第二节 细胞核骨架	345
参考文献	352
<b>第十二章 细胞核与染色体</b>	353
第一节 核被膜	353
第二节 染色质和染色体	357
第三节 核仁	376
参考文献	379
<b>第十三章 细胞内蛋白质的分选和运输</b>	381
第一节 细胞内蛋白质的分选信号以及运输途径和方式	381
第二节 细胞内蛋白质的门控运输	385
第三节 细胞内蛋白质的穿膜运输	390
第四节 细胞内蛋白质的小泡运输	402
参考文献	418
<b>第十四章 细胞通讯与信号转导</b>	419
第一节 细胞通讯与信号转导的基本知识	419
第二节 受体及其信号转导途径	430
第三节 细胞信号转导的调节	448
第四节 细胞信号转导途径之间的相互作用	452
参考文献	457
<b>第十五章 细胞增殖及其调控</b>	458
第一节 细胞周期	458
第二节 细胞分裂	463
第三节 细胞周期的调控	470
第四节 细胞增殖周期与医学	487
参考文献	491
<b>第十六章 细胞分化</b>	492
第一节 细胞分化与个体发育	492
第二节 细胞分化与组织更新	499
第三节 细胞分化与基因表达的时空调节	505
第四节 细胞分化与肿瘤	511
参考文献	514
<b>第十七章 细胞衰老与死亡</b>	516
第一节 细胞衰老	516
第二节 细胞死亡	521
参考文献	535

## 第四篇 基因的复制、表达与调控

<b>第十八章 基因的复制、修复与重组</b> .....	539
第一节 DNA 复制的基本特点 .....	539
第二节 参加 DNA 复制的酶类和某些蛋白质 .....	542
第三节 DNA 复制的过程 .....	547
第四节 真核细胞的 DNA 复制 .....	549
第五节 DNA 损伤的修复 .....	551
第六节 DNA 的重组 .....	557
参考文献 .....	562
<b>第十九章 基因的转录和转录后加工及逆转录</b> .....	563
第一节 基因转录的基本性质 .....	563
第二节 RNA 聚合酶 .....	564
第三节 与转录起始有关的 DNA 结构 .....	566
第四节 基因的转录与转录后加工 .....	569
第五节 逆转录 .....	588
参考文献 .....	591
<b>第二十章 蛋白质的生物合成——翻译</b> .....	592
第一节 蛋白质合成中三类 RNA 的作用 .....	592
第二节 蛋白质合成的过程 .....	601
第三节 翻译后的加工 .....	611
第四节 翻译的调控 .....	614
参考文献 .....	616
<b>第二十一章 基因表达的调控</b> .....	617
第一节 基因表达调控的一些基本原理 .....	617
第二节 原核生物基因表达的调控 .....	618
第三节 真核生物基因表达的调控 .....	626
参考文献 .....	641

## 第五篇 若干与细胞及分子生物学有关的专题

<b>第二十二章 生殖细胞与受精</b> .....	645
第一节 减数分裂 .....	645
第二节 配子的准备 .....	650
第三节 受精 .....	658
第四节 受精卵的分化发育 .....	667
第五节 人类的不育、节育与优生 .....	672
第六节 哺乳动物细胞核移植(克隆) .....	676
参考文献 .....	680

<b>第二十三章 抗原递呈和免疫识别的分子生物学</b> .....	681
第一节 主要组织相容性抗原.....	681
第二节 抗原肽的加工和递呈.....	686
第三节 T 细胞表面受体与免疫识别.....	694
参考文献.....	700
<b>第二十四章 癌基因与抑癌基因</b> .....	702
第一节 癌基因的发现及病毒癌基因.....	703
第二节 癌基因的鉴定方法.....	707
第三节 癌基因的产物及其功能.....	710
第四节 抑癌基因及其发现.....	719
第五节 抑癌基因的产物及其功能.....	720
第六节 癌基因与抑癌基因的相互作用.....	725
第七节 总结.....	726
参考文献.....	726
<b>第二十五章 艾滋病的分子生物学基础</b> .....	727
第一节 HIV 的分离和起源.....	727
第二节 HIV 的分子结构.....	729
第三节 HIV 感染细胞的分子机制.....	738
第四节 HIV 在宿主细胞内的复制和装配.....	740
第五节 HIV 感染的血清学检查.....	743
第六节 治疗艾滋病的药物.....	744
第七节 艾滋病疫苗.....	748
参考文献.....	750
<b>第二十六章 转基因动物</b> .....	752
第一节 转基因动物的原理和方法.....	752
第二节 几类转基因动物的研究.....	757
第三节 转基因动物在医学上的应用.....	764
第四节 克隆.....	767
参考文献.....	777
<b>第二十七章 干细胞</b> .....	778
第一节 干细胞的概念和基本特征.....	778
第二节 胚胎性干细胞.....	784
第三节 组织干细胞.....	794
第四节 干细胞研究的应用前景和挑战.....	806
参考文献.....	812
<b>第二十八章 基因诊断</b> .....	813
第一节 基因诊断的原理和方法.....	813
第二节 基因诊断技术在常见遗传病中的应用.....	819

---

参考文献	843
<b>第二十九章 基因治疗</b>	<b>844</b>
第一节 基因治疗的概念	844
第二节 外源基因及其导入方法	845
第三节 逆转录病毒载体	847
第四节 腺病毒及腺相关病毒载体	854
第五节 非病毒载体	857
第六节 载体的靶向性问题	860
第七节 基因治疗的临床试验	863
第八节 问题及展望	871
参考文献	873
<b>第三十章 生物信息学在分子生物学中的应用</b>	<b>875</b>
第一节 生物信息数据检索系统(Entrez)	875
第二节 同源序列的分析和对比	882
第三节 人类基因组及其特征	887
第四节 蛋白质的结构与功能分析	896
参考文献	906
<b>汉英索引</b>	<b>907</b>
<b>英汉索引</b>	<b>921</b>

第一篇  
总论



# 第一章 从分子、细胞到人体

## 第一节 在细胞与分子水平上阐明生命现象

生物多样性(biodiversity)是指地球上所有生命形式的总和,包括数以百万计的动物、植物、微生物物种和它们所拥有的基因,以及它们与生存环境所组成的复杂的生态系统。今天的地球是个瑰丽多彩的生物世界。但是在大约 36 亿年以前,我们这个星球却是一片死寂荒凉。生命,只是原始地球发展到一定时期的产物。直到大约 35 亿年前,我们这个星球上才有了最原始的细胞。细胞(cell)的出现标志着生物发展史上的一次大飞跃。恩格斯说:“随着第一个细胞的产生,整个有机界的形态形成的基础也就随之而产生了。”细胞是所有生物体的基本单位。无论人类、动物、植物或单细胞的生物(如细菌)都由细胞组成。细胞不仅是单细胞生物的基本单位,也是多细胞生物的基本单位。事实上,多细胞生物的生命也是以单细胞形式开始的。以人类为例,卵子与精子融合为受精卵(单细胞)时,便是人的生命的起始。受精卵细胞一分为二,然后不断分裂与分化,直至发育成为由多达几百万亿个细胞组成的人体。由于一切生物都是由细胞所组成,这就使人们从无限多样的生物世界中看到它的统一性。

细胞的形成与发展是生命进化的主干,但也有一条向非细胞形式发展的进化旁支,即类病毒(viroid)及病毒(virus)系统,它们均不能自主代谢,其繁殖必须依靠宿主。

无论是细胞还是病毒,生命现象的物质基础是生物大分子,这些大分子可以被视作为完成各种具体工作的“机器”。生物大分子主要包括核酸、蛋白质、糖类、脂类以及它们的复合体。蛋白质和核酸是所有生命活动的主要物质基础,生物体的世代遗传是由核酸承担的,而生命活动则主要由蛋白质(包括酶)的功能来体现。一个细胞可以被视为精巧组装成的生物大分子“复合机器”:DNA 与组蛋白构成了染色质,细胞核中为数众多的非组蛋白又与染色质之间形成复杂的功能联系。编码一个功能产物(多肽或 RNA)的一段 DNA 称为基因(gene);在细胞质内,mRNA、rRNA 及 tRNA 相互配合进行着蛋白质合成,进而再给以加工、修饰、运输;由脂类及蛋白质共同组成的流动镶嵌膜系,将细胞空间分割成许多功能区域;位于细胞边界的细胞膜(由膜蛋白、膜脂及复合糖组成),更承担着物质通透、胞吞胞吐及信息传递与细胞通讯联络及识别等重要任务。

在细胞与分子水平上研究生命现象与规律的科学为细胞与分子生物学(cell and molecular biology),其主要任务是在细胞、亚细胞和分子三个层次上研究生命活动的结构基础、细胞各部分的化学组成和新陈代谢活动,进而阐明生物体生长、分化、遗传、变异、衰老、死亡等基本生命活动的规律。

细胞生物学并不是一门全新的科学。早在 17 世纪 60 年代英国物理学家 Robert Hooke 及荷兰科学家 A. V. Leeuwenhoek 分别用简陋的显微镜发现了植物细胞壁及动物细胞,包括人的精子。到了 19 世纪 30 年代,德国科学家 Schleiden 及 Schwann 分别断定一切植物和动物都由细胞构成,提出了“细胞学说”(cell theory)。细胞学说的建立打开

了进入生物微观世界的大门。恩格斯高度评价细胞学说在科学史上的作用,他把细胞学说、能量转化与守恒定律及生物进化论一起誉为 19 世纪自然科学的三个伟大发现。随后的百余年,由于技术限制,主要集中研究细胞的化学组成及形态结构,被称之为细胞学(cytology)。20 世纪 30 年代以后,由于大量采用了近代物理与化学技术,同时物理学家、生物化学家、遗传学家及微生物学家等一起闯入生命科学的领域,包括对细胞与生物大分子的研究。其中 Watson 与 Crick(1953)提出了 DNA 分子的双螺旋结构模型,在此基础上又提出了遗传信息传递的“中心法则”。这以后的一系列研究所得到的新成果与所形成的新概念,使人们对构成细胞的大分子有了深入的了解。在此基础上形成的分子生物学是继细胞学说与生物进化论以来生物学的第二次革命。从此细胞生物学及分子生物学分别从细胞与分子的角度研究基因的结构、基因表达与调控、细胞内的信号转导、物质运输、细胞的增殖与分化及其调控等。在此基础上两门学科相互渗透,发展成为分子细胞生物学(molecular cell biology)。

综观细胞与分子生物学的科学思维与研究路线,大致可以分为以下三个学派:

1) 结构学派 认为只有阐明细胞、亚细胞、分子乃至量子的结构,才能阐明生命现象的本质。结构学派的主要任务是从细胞与分子的结构出发,预见它们的功能与行为。结构学派的基础是严谨的物理学理论和强有力的实验技术,如“基于同步辐射的结构生物学”。目前结构生物学的中心任务是确定组成生物大分子的每个原子的三维空间排列,一旦明确了核酸、抗体和酶等大分子的三维结构,必然导致对其功能认识的极大深化,这将是后基因组时代的一个重要研究方向。

2) 信息学派 认为生命现象的一个重要活动是信息流,因此认为生命现象的本质是信息的形成、传递与演化。如果说结构学派更多的是注意静态的描述与科学的推理的话,那么信息学派则主要着眼于动态的分析与过程的演绎。细胞内存在两个主要的信息流:一是基因表达的信息流(也即 DNA→RNA→蛋白质);二是外界信息对细胞的影响(也即从细胞膜经胞质以至细胞核的过程)。细胞与细胞之间的信号传递与通讯联络是多细胞生物(包括人体)的重要生理活动。在人体内,神经系统、内分泌系统与免疫系统的功能都离不开细胞与细胞间的信号联系。毫无疑问,了解细胞内以及细胞与细胞之间的信号传递能更深刻地了解人的正常生理活动及疾病机制,进而可探索更为有效的治疗与预防措施。

3) 层次学派 认为生命活动是有层次的,即大分子、细胞、细胞间直至人体这样几个不同的结构层次。诚然,各个层次的生命活动都建立在生物大分子的结构、运动及其相互作用的基础上。但是必须指出的是生命现象的各个层次有着不同的规律。把复杂的生命现象简单地、不分层次地分解成细胞与分子机制,是一种还原论(reductionism)。毫无疑问,拘囿于纯粹的还原论分析有其固有的局限性,任何生命现象都不可能单纯地归结为物理、化学的变化,也不可能简单地从一个复杂系统的基本组分的性质来外推这个系统是如何工作的。因此细胞分子生物学的研究一方面要深入地进行结构与信息交流的分析,另一方面要用系统科学方法论来指导细胞与分子的研究。在生物学研究中,如基因调控、基因敲除、细胞与器官功能的检测等,都可被视为整体性分割,分割后的局部仍具有生物学的系统特征。采用保留不同联系的整体性分割的小系统,综合不同分割后小系统的新



质,即可逐步缩小由分割产生的模糊性,逐渐趋近于系统真正的新质。总之,整体化、量化地研究生命系统将是 21 世纪生命科学研究的重要趋势。

## 第二节 细胞的进化

从某种意义上来说,细胞是由分子进化到人类之间的中间阶段。进化是生物学的中心法则。从分子生物学的角度来看,进化包括着遗传信息的形成、传递与选择 3 个要素。

### 一、从分子到原始细胞

生命的进化是通过化学的进化而实现的。在生命出现以前的远古时代,经历了元素形成(C、H、O、N、P、S、卤素及金属)及简单化合物( $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_4$ 、 $\text{NH}_3$  等)两个阶段,形成了四大类有机物,即氨基酸、核苷酸、糖类与脂肪酸。在此基础上就有可能进一步聚合演变成为多肽、多核苷酸、多糖及脂类。

生命进化中的一个转折点是遗传信息的形成。蕴藏在多核苷酸链中的碱基序列信息即为遗传信息的结构基础。例如,A、G、U、C 四种单核苷酸经过一定的排列组合,形成了一个多核苷酸链,其碱基序列假设为 GGAUCAC,其中碱基序列就是新出现的一个结构信息。生命进化的关键是遗传信息能正确无误地传递,从一个分子传递给另一个分子,从这一代遗传给下一代。在遗传信息的传递过程中碱基的互补配对原则起着决定性的作用。由于 A-U 与 C-G 的互补配对,可将上述 GGAUCAC 的信息传递给互补的 CCUAGUG,然后再通过一次互补配对恢复为 GGAUCAC。在配对过程中,必须有催化剂,否则互补配对的过程十分缓慢且效率很低。在无生命的远古时代,还未出现酶这样的催化剂,那时候 RNA 分子本身以及泥土中的金属离子可能起催化作用。近年来已证明某些 RNA 具有催化功能,称之为 ribozyme。优胜劣汰是进化的准则,在 RNA 复制过程中会产生各种各样的拷贝,那些过长的、过紧的或不稳定的 RNA 结构迟早将被淘汰;只有那些能精确自我复制而稳定的 RNA 三维结构才能保存下来并最终占优势。RNA 分子有两个特点:一是作为配对复制的模板;二是催化共价键的断裂或形成。约在 40 亿年前,一些 RNA 分子开始发挥各种不同的功能,有的可催化其本身的复制,有的还可催化其他 RNA 构型的复制,更有些 RNA 形成了 tRNA 及 mRNA 的雏形。由于 tRNA 与氨基酸之间的对应关系,以及 tRNA 与 mRNA 之间的配对关系,遗传信息就由多核苷酸链流向多肽链。这样一来,最原始的 RNA 指导蛋白质合成的框架已经形成。在遗传密码这本“辞典”中,每三个核苷酸作为一个“单词”,即三联体(triplet),与之相对应的为一特定的氨基酸。迄今,所有的生物体都采取这种方式,这也是从另一方面提示世界上现存的各种细胞均来自于同一个祖先——原始细胞(primordial cell)。

膜(membrane)的形成是原始细胞形成的重要标志。原始生命是在海洋中形成的。有复制能力的 RNA 及其指导下合成的蛋白质,只有被磷脂构成的膜包围以后才能形成一个独立的单位,这就是原始细胞,最原始的细胞约在 35 亿年之前诞生。原始细胞分裂很慢,遗传信息量也不多,细胞内只有种类与数量有限的蛋白质。原始细胞进一步进化的