



普通高等教育“十三五”规划教材

MOLECULAR AND
CELLULAR BIOLOGY

分子细胞生物学

张建保 卢晓云◎主编



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

分子细胞生物学

张建保 卢晓云 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

鉴于越来越多的理工科学生以及相关科技工作者需要了解分子与细胞层次的生命科学相关内容,西安交通大学相关教师组织编写了本书。本书简明、系统地介绍了细胞及相关的分子生物学知识,内容包括:细胞的物质基础、物质与能量代谢、细胞结构及功能、细胞遗传物质、遗传信息的表达及调控、信号转导、细胞增殖与分化、神经细胞等。

本书由西安交通大学长期为理工科学生讲授生命科学相关课程的教师编写,教材的内容、编写思路与传统的分子细胞生物学教科书不同,更适合有志于了解或从事生命科学相关工作的理工科本科生、研究生以及科技工作者使用。

图书在版编目(CIP)数据

分子细胞生物学 / 张健保, 卢晓云主编. —北京: 科学出版社, 2017.2
普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-051725-8

I. ①分… II. ①张… ②卢… III. ①分子生物学-细胞生物学-高等学校-教材 IV. ①Q7

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第024872号

责任编辑: 刘 丹 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 铭轩堂

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>

北京文林印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年2月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 448 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《分子细胞生物学》编委会

主 编 张建保 卢晓云

编 委 (按姓氏笔画排序)

孔 宇 孔令洪 冯 怡 许 丹

李延海 邵永平 武亚艳 谭 丹

前 言

随着人类社会的进步与发展，人们越来越关注自身的疾病与健康等生命奥秘，同时越来越多的工程技术成果开始在生命科学领域应用与拓展，生命科学知识已经成为了现代理工科高等教育必须学习的内容。

分子与细胞生物学是理解生命科学的基础，一些理工科院校已经开始开设相关课程。目前虽然已经有很多分子与细胞生物学方面的著作，但针对理工科学生使用的教材不多。鉴于此，我们编写了本教材。本书力求基础性强，注重逻辑严密与文字描述简洁，在思维方式与内容组织上尽可能地适合理工科学生使用。

本书主要介绍了分子与细胞生物学的基本知识，希望通过对本书内容的学习，读者们能够理解细胞的生命过程，并为进一步深入学习相关内容奠定基础。本书共8章，第1章介绍了细胞的物质基础，主要由孔宇副教授编写；第2章介绍了细胞的能量与代谢，主要由孔令洪副教授编写；第3章介绍了细胞的结构与功能，由张建保教授编写；第4章与第5章介绍了现代分子生物学的知识，主要由卢晓云教授编写；第6章介绍了细胞的通讯与信号转导，由邵永平教授编写；第7章介绍了细胞周期与细胞的增殖、分化等，由许丹副教授编写；第8章属于专题介绍，讲授了神经细胞的结构与功能，由李延海副教授编写。

本书编写过程中，冯怡、武亚艳、谭丹等参与了部分章节的校对，王蕾蕾、冉淦侨、吴兴娟、赵季平、胡二玲、杜环、彭文毓、尚森、荣誉等参与了本书的绘图工作，在此，对他们的工作表示感谢。本书编写过程中，我们参考了部分国内外的著作，在此一并表示衷心感谢。

感谢科学出版社的刘丹编辑，正是她认真负责的工作，才使本教材得以付梓。

分子与细胞生物学正在快速发展，我们在编写过程中主要考虑了最基础的内容，并对发展前沿有所跟进和展开，本书编写过程中难免会有疏漏或不妥之处，敬请读者批评指正。

张建保

2016年12月于西安交通大学

目 录

前言	
绪论	1
第 1 章 细胞的物质基础	5
1.1 组成细胞的基本元素及化学键	5
1.2 糖类	9
1.3 脂肪类（脂类或者脂质）	18
1.4 蛋白质	28
1.5 核酸	49
本章小结	56
思考题	57
拓展读物	58
第 2 章 细胞中能量及物质的代谢与转化	59
2.1 生物体中的能量来源及其存在形式	59
2.2 糖类的代谢	70
2.3 脂类的代谢	84
2.4 蛋白质的代谢	93
本章小结	99
思考题	100
拓展读物	100
第 3 章 细胞结构及其功能	101
3.1 细胞质膜与细胞质基质	101
3.2 细胞器的结构与功能	106
3.3 细胞的大小与形态	110
3.4 细胞的生命过程	110
3.5 植物细胞	114
3.6 原核细胞	115
3.7 病毒	119
本章小结	119
思考题	120
拓展读物	120
第 4 章 细胞的遗传物质及其维持	121
4.1 DNA 和染色体	121

4.2 DNA 的复制	132
4.3 DNA 的损伤与修复	148
本章小结	160
思考题	161
拓展读物	162
第 5 章 细胞遗传信息的表达及调控	163
5.1 从 DNA 到 RNA: 基因转录	163
5.2 真核细胞 RNA 转录后加工及转运	186
5.3 从 RNA 到蛋白质: 翻译	195
本章小结	205
思考题	206
拓展读物	206
第 6 章 细胞的通讯与信号转导	207
6.1 信号分子	207
6.2 信号分子受体 (信号的接收)	208
6.3 细胞内的信号处理与传递	212
6.4 细胞对信号的生物应答	223
6.5 信号的终结	225
本章小结	227
思考题	227
拓展读物	228
第 7 章 细胞的增殖、分化与凋亡	229
7.1 细胞周期	229
7.2 细胞分裂	233
7.3 细胞分化	241
7.4 细胞凋亡	245
本章小结	251
思考题	251
拓展读物	251
第 8 章 神经细胞及其功能	252
8.1 神经细胞	252
8.2 神经细胞的生物电现象	254
8.3 神经细胞间的信息传递	261
8.4 神经细胞的联系方式及整合机制	268
本章小结	272
思考题	273
拓展读物	273

绪 论

生命科学在当今社会中是最典型的爆发式发展的科学领域，人们在了解生命奥秘的同时，已经开始利用生命科学的理论和方法去解决当今人类社会面临的健康、资源、生态、环境、能源、信息和材料等领域的一系列重大问题，正在对人类社会的方方面面产生着巨大的影响。

细胞是生命最基本的组成单元和功能单位。细胞生物学是以细胞为研究对象，从细胞的整体水平、亚显微水平、分子水平 3 个层次以动态的观点，研究细胞、细胞器的结构和功能，细胞的生命过程以及细胞各种生命活动规律的学科。细胞生物学是现代生命科学前沿的分支学科之一，随着现代生命科学的发展，人们越来越多地从分子层面上去探索细胞各种生命活动规律的分子机制，这就是分子细胞生物学主要探索的领域。

生命科学的研究历程一直以来都与物理、化学等基础学科理论的发展和技术的进步密不可分，在了解细胞的基本知识之前，我们首先希望读者从分子细胞生物学发展的历史及其发展趋势中，体会各学科交叉对生命科学发展的促进作用以及生命科学对人类产生的重大影响。

1. 分子细胞生物学发展阶段

从研究内容来看，细胞生物学的发展可分为 3 个层次，即显微水平、超微水平和分子水平。从时间轴来看，细胞生物学的历史大致可以划分为 4 个主要的阶段。

第一阶段

从 16 世纪后期到 19 世纪 30 年代，是细胞发现和细胞知识的积累阶段。在这个阶段中，早期显微镜的发明使人们发现了之前无法观察到的微观世界。可以说，没有显微镜就不可能有细胞学的诞生。1665 年，英国人 R. Hooke 用自己设计与制造的显微镜（放大倍数为 40~140 倍）观察了软木（栎树皮）的薄片，第一次描述了植物细胞的构造，并首次用“cells”（小室）这个词来称呼他所看到的类似蜂巢的极小的封闭状小室（实际上只是观察到纤维质的细胞壁）。荷兰皇家学会会员 A. van Leeuwenhoek 是第一个看到活细胞的人，他一生中制作了 200 多台显微镜和 500 多个镜头，观察过原生动物、人类精子、鲑鱼的红细胞、牙垢中的细菌等。1812 年，苏格兰人 D. Brewster 发明油浸物镜，改进了体视显微镜。1886 年，德国人 E. K. Abbe 发明了复消差显微镜，并改进了油浸物镜。至此，普通光学显微镜技术基本成熟。通过对大量动物、植物的观察，人们逐渐意识到不同的生物都是由形形色色的细胞构成的。

在 19 世纪以前，许多学者的工作都着眼于细胞的显微结构方面，从事形态上的描述，而对各种有机体中出现细胞的意义一直没有做出理论的概括。直到 19 世纪 30 年代，德国人施莱登（M. J. Schleiden）和施旺（T. Schwann）提出：一切植物、动物都是由细胞组成的，细胞是一切动植物的基本单位。这就是著名的“细胞学说（Cell Theory）”。后人根据施莱登和施旺发表的研究结果，综合为以下要点：①细胞是一个有机体，一切动植物都由细胞发育而来，并由细胞和细胞产物所构成；②细胞是一个相对独立的单位，既

有自己的生命，又对其他共同组成整体的生命起作用；③新细胞可以从老细胞中产生。1855年，德国人魏尔肖（R. Virchow）提出“一切细胞来源于细胞”的著名论断，进一步完善了细胞学说。把细胞作为生命的基本单位，以及作为动植物界生命现象的共同基础的这种概念立即被普遍接受。恩格斯将细胞学说誉为19世纪的三大发现之一。

第二阶段

1839年施莱登和施旺的细胞学说的问世，确立了细胞（真核细胞）是多细胞生物结构和生命活动的基本单位。但长期以来，细胞学的研究偏重在结构方面。从19世纪30年代到20世纪初，在细胞学说的基础上，从显微水平研究细胞的结构与功能是这一时期最活跃的研究领域。形态学、胚胎学和染色体知识的积累，使人们认识了细胞在生命活动中的重要作用。1893年 Hertwig 的专著《细胞与组织》（*Die Zelle und die Gewebe*）出版，标志着细胞学的诞生。其后1896年哥伦比亚大学 Wilson 编著的 *The Cell in Development and Heredity*、1920年墨尔本大学 Agar 编著的 *Cytology* 都是这一领域最早的教科书。

第三阶段

19世纪后期显微技术的改进以及生物固定技术和染色技术的出现，极大地方便了人们对细胞显微结构的认识，各种细胞器相继被发现，特别是20世纪30年代电子显微镜的问世。1932年，德国人 M. Knoll 和 E. A. F. Ruska 发明了最初的电子显微镜，1940年美国 and 德国制造出分辨力为0.2nm的商业化电子显微镜。1981年瑞士人 G. Binnig 和 H. Rohrer 发明了扫描隧道显微镜，并与电镜发明者 Ruska 同获1986年度的诺贝尔物理学奖。这些工程领域的新技术也极大地推动了细胞生物学的发展，使细胞形态研究达到了空前的高潮，把细胞学带入了第三大发展时期。到20世纪70年代，人们不仅发现了细胞的各类超微结构，而且也认识了细胞膜、线粒体、叶绿体等不同结构的功能，使细胞学发展为细胞生物学。De Robertis 等1924年出版的《普通细胞学》（*General Cytology*）在1965年第四版时定名为《细胞生物学》（*Cell Biology*），这是最早的细胞生物学教材之一。1953年，X线衍射技术揭示出遗传物质 DNA 完美的双螺旋结构，标志着分子生物学的建立，人们对细胞遗传规律的了解进一步深入到了分子层面，并逐渐了解了遗传密码、中心法则以及细胞基因表达的调控等基本问题，这些也都直接促进了细胞生物学的发展，使人们不仅对细胞的结构有了更清楚的认识，也对细胞的各种生命活动规律有了更深入、更全面的了解。

第四阶段

从20世纪70年代基因重组技术的出现到当前，细胞生物学与分子生物学的结合越来越紧密，分子细胞生物学的发展成为生命科学爆发式发展的重要力量。研究细胞中不同分子的结构及其在生命活动中的作用成为主要任务。基因表达调控、信号转导、肿瘤细胞生物学、细胞分化和凋亡、干细胞及诱导多功能干细胞、基因编辑相继登场，成为当代分子细胞生物学领域一个又一个的研究热点。工程技术领域的进步和仪器设备的快速发展使得生物芯片、基因测序、分子示踪、冷冻电镜、高通量质谱鉴定等一系列先进技术手段成为分子细胞生物学发展的强力推手。

2000年“人类基因组计划”工作草图完成，带领人们进入了以研究基因功能为主的后基因组时代。蛋白质组学、RNA组学、糖组学、代谢组学等各种“组学”研究相继登场。同时，生物信息学、纳米生物学等新兴学科也快速发展，细胞生命活动的规律将被进一步完整解析，新技术揭示的分子机制也将有望进一步指导多个交叉学科理论和更新技术的发

展。现在，人们也已经开始通过人工设计并合成染色体的方法构建具有特定功能的“合成生命”。生命科学已进入了迅速发展期，也将引领人类社会进入一个新的发展阶段。

2. 分子细胞生物学发展展望

众所周知，人类经历了漫长的采猎文明后，约在一万年前进入农业经济时代，18世纪60年代，英国率先进入工业经济时代，20世纪50年代美国最早走完工业经济的历程，进入信息时代。据专家估计，这一经济形态的“寿命”为75~80年，到21世纪20年代将渐渐失去活力，届时人类将迎接下一个经济时代，即生物经济时代的到来。生物经济的基础为细胞及其蕴含的基因，其核心技术为建立在分子细胞生物学理论基础上的各类生物技术。这些理论和技术已经为世界经济及产业带来了巨大变革。

(1) 推动产业革命，创造新的经济增长点。生物产业的比重已逐步提高，药品中基于生物技术的产品已经占优势地位，转基因动植物市场前景广阔。此外，生物芯片已广泛应用于科研、医疗、农业、食品、环境保护、司法鉴定等领域，将会成为与微电子芯片一样重要的产业。

(2) 推动医学革命，延长人类寿命。20世纪初人类平均寿命为40多岁，抗生素和疫苗的应用、医疗技术的提高和公共卫生观念的提出使人类摆脱了传染病威胁，寿命逐渐提高。20世纪末人类平均寿命达到70多岁，但心血管病、癌症和各类遗传病或遗传相关的疾病仍然是威胁人类健康的主凶。21世纪生物技术将推动新一轮医学革命，能够从疾病预防与疾病诊断、药物研制、组织工程、基因治疗、器官移植、抗衰老等多方面延长人类寿命。事实上，早在1990年美国国立卫生研究院(NIH)就进行了世界首例基因治疗，对象是一名患有先天性重度联合免疫缺陷病的4岁女孩。这种疾病是因为缺乏正常的腺苷脱氨酶(ADA)基因而引起的，专家们以病毒作为载体，将ADA基因导入从患者血液中分离出来的淋巴细胞，在体外培养后再输回患者体内，使这位女孩体内ADA的含量升高，免疫功能有所恢复，可以正常活动而无不良反应。这是世界首例基因治疗成功的患者，在此之后，全世界掀起了基因治疗的热潮。

(3) 推动绿色革命，解决食品危机。20世纪60年代的杂交玉米、杂交小麦和杂交水稻等农作物优质品种的栽培，标志着传统植物育种理论和各种农业措施在作物改良中的应用达到了高峰，并对农业产生了深远的影响，被誉为第一次绿色革命。而21世纪转基因动植物、组织培养、胚胎移植、动物克隆等一系列新技术将再一次改变农业的面貌，新技术群将更有利于人们创造新品种、生产人类所急需的粮食、药物和工业用品，推动第二次绿色革命。

(4) 创造生物新品种，改善生态环境。植物抗旱、抗盐基因的发现与应用，将有可能彻底改变10亿亩(1亩 \approx 666.67m²)干旱地区的生态环境，使5亿亩不毛之地、盐碱地变为良田。用于废气、废水、废渣处理的基因工程极端微生物的应用，可降解生物塑料产品的产业化推广，将会解决工业排放、白色垃圾等环保难题，有效改善生态环境。

(5) 发展绿色能源，解决能源危机。煤、石油等化石能源的枯竭已经是众所周知的危机，替代能源的开发具有十分重要的战略意义。全球生物质能的储量为18000亿吨，相当于640亿吨石油。生物能源将会使作物秸秆等废弃的有机物成为能源，缓解化石能源不足的危机，为石油短缺国家解决能源危机找到一个较为经济的途径。利用“绿金”代替“黑金”，开发生物乙醇、生物柴油、生物发电、生物氢等替代部分化石能源，已经

成为许多国家的能源战略。除此之外，植物光合作用机制研究取得重大突破，人工光解水产生的氢气将成为继化石燃料之后主要的能源。

(6) 生物安全关系到国家安全。必须认识到生物技术是一柄双刃剑，生物工程武器将彻底改变传统战争的方式与后果，没有对生物战剂、生物恐怖和外来入侵物种的防御与应对能力，就不能从根本上保障国家安全。

(7) 冲击传统伦理观念。转基因动植物、克隆动物、胚胎干细胞、组织工程、器官移植技术的应用及“合成生命”的出现，将对传统伦理观念产生强烈冲击。

可以预见，分子细胞生物学仍然是未来生命科学的领头学科，是支撑生物技术发展的基础科学。尽管发现细胞已经 300 多年，但人类对细胞在整体层次上的工作机制并未获得一个完整清晰的认识。分子细胞生物学未来的一些重要发现将为生物技术带来新的发展动力。例如，对干细胞生长和分化的控制机制的认识或许会带来治疗应用方面的重大突破；对遗传基因和生化途径调控机制的认识将催生更先进的遗传修饰方法；理解细胞感知环境的机制会有助于研发具有广泛应用前景的生物传感器；了解细胞骨架和分子马达的协同工作机制将可能在下半个世纪中引领纳米技术的生物应用。

分子细胞生物学的新突破将成为未来以生物经济为主体的社会发展的主要推动力。不妨通过一段科幻式想象来描绘一下我们将面临的未来世界。我们可以基于组织干细胞技术，通过获取患者身体中任意活细胞的 DNA，培养出身体任意部分组织结构的器官，从而达到医学上真正的器官再生。再如，电脑与互联网已经成为与人们日常的工作、学习、生产、生活以及科学研究、航空航天等各行各业都息息相关的必备品，当今的电脑基本模式都是冯·诺依曼模式，制造材料是金属材料居多，从本质上来说从电脑诞生的第一天到今天，它的运行模式没有发生任何实质变化。而生物学的发展则有可能在未来彻底解决这个问题。用生物材料制造类似人类大脑运行模式的超级电脑，让电脑像人类一样地思考和工作，真正意义上实现运行原理的飞跃。还有，坚硬“骨头”构成的房屋，高度仿生化汽车、飞机以及如同《超能陆战队》中小宏发明的通过意识控制的机器人一般的各种智能化设备，相信都会随着分子细胞生物学、生命科学及其相关交叉学科的发展而在未来的某一天成为现实。

第 1 章 细胞的物质基础

在生物学科研究的初期，人们认为生物体系与化学体系属于不同的类别。通常的化学体系，如气体、液体、固体等的存在及相互转化是相对固定的、单一的。而相反，生物的活动非常复杂，能够生存、复制、繁殖和死亡，以至于最初人们认为有“生命力”的存在。然而和其他任何的非生命体一样，从化学角度看，一切生命体系均为普通原子的聚集体，细胞同样要基于一定的物质基础，同样要遵循基本的物理和化学原理。细胞的生存依赖于其内部在时间和空间上都被精细调控着的成千上万的分子间相互作用和化学反应。本章将讲授生命的化学基础，从组成细胞的基本元素开始，逐步介绍组成生物分子的各种化学键类型及主要的糖类、脂类、蛋白质、核酸等生物分子的种类和性质。

1.1 组成细胞的基本元素及化学键

1.1.1 组成细胞的基本元素

从宏观角度看，生物作为组成地球环境的一份子，其元素构成应与环境类似（使用同一套元素，也称为统一性），即机体应包含所处环境中所存在的元素种类。而生命体的元素组成其实是有选择性的，即生命体中各元素的含量与其所处环境中各元素含量的比例具有差异性。图 1-1 和表 1-1 给出了生命体与非生命体在元素组成方面的区别。

由图 1-1 可知，生命体对元素的需求是窄范围的（20 多种元素），含量最高的元素有 4 种，分别是 H、C、O、N。由表 1-1 可知，元素的选择有倾向性（丰度差异）。例如，碳元素的含量：地球环境中碳元素的含量较低（0.19%），而生命体中碳元素比例大幅度增加（9.5%）。生命体几乎完全是建立在含有这些元素的有机化合物基础上。这也体现了有机生命体和非生命物质世界的差别。

原子数		原子量																																		
1	H		He																																	
3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																					
11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																					
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr	
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe	
55	Cs	56	Ba	57	La	58	Hf	59	Ta	60	W	61	Re	62	Os	63	Ir	64	Pt	65	Au	66	Hg	67	Tl	68	Pb	69	Bi	70	Po	71	At	72	Rn	
87	Fr	88	Ra	89	Ac	90	Rf	91	Ha																											

图 1-1 生命体包含的元素在周期表中的分布（深色背景部分）

表 1-1 生物体与地球环境中各元素的比例

岩石圈的成分 /%	氧	硅	铝	铁	钙	钠	钾	镁	钛	氢	碳	所有其他成分
	47	28	7.9	4.5	3.5	2.5	2.5	2.2	0.46	0.22	0.19	<0.1
人体的成分 /%	氢	氧	碳	氮	钙	磷	氯	锌	硫	钠	镁	所有其他成分
	63	25.5	9.5	1.4	0.31	0.22	0.03	0.06	0.05	0.03	0.01	<0.1

1.1.2 细胞中常见化学键的类型

在构成生命体元素组成确定的背景下，这些原子之间又是以何种方式组合出生命相关的分子和基本结构中的呢？首先简要回顾原子的基本结构及成键轨道相关知识要点，再从原子形成化学键这一共性特点出发，宏观地讲述构成生命体相关物质的形式。

1. 原子的基本结构

原子由致密的原子核（图 1-2A 中圆形区域的中心小点，占几乎 100% 的质量）和四周飞速运动的电子（电子云，浅灰色分布）构成。理论上讲，电子应该按照圆形轨道绕原子核旋转，但事实上只有 s 层等轨道是类球形的，原子的基本形态（图 1-2A）以及最简单的氢原子的 $1\sim 5s$ 层的电子云分布情况如图 1-2B 所示。很多电子的运行空间被限制在一定的区域，即电子运动轨道内，如 p_x 、 p_z 等，如图 1-2C 碳原子第二层电子轨道示意图所示。

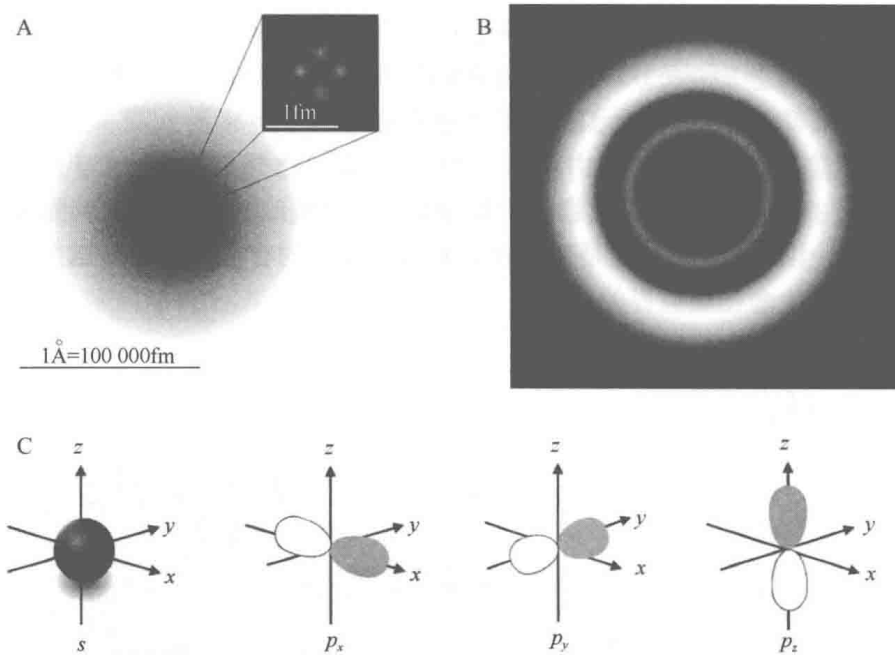


图 1-2 原子的基本结构

A. 原子结构示意图；B. 氢原子的 $1\sim 5s$ 层形态；C. 碳原子的 s 、 p 杂化轨道示意图

2. 常见化学键

组成生命体的原子相互靠近过程中，可以发生原子间外层电子共享、转移等现

象，形成了原子间相互强作用力，这种相邻两个或多个原子（或离子）间强烈的相互作用力统称为化学键，两个或多个原子通过化学键结合在一起形成分子。组成生命体分子的化学键包括离子键、共价键、氢键等，其各自有不同的形成机制，下面逐一介绍。

离子键 (ionic bond): 指带相反电荷离子之间的相互作用，属于静电作用。离子键的形成伴随电子的得失，即有不同带电中心形成。常见的以离子键为主的生命相关的化合物有氯化钠、氯化镁、氯化钙、溴化钾等（图 1-3A）。

共价键 (covalent bond): 两个或多个原子共同使用它们的外层电子从而达到电子饱和状态，由此组成比较稳定和坚固的化学结构称为共价键。形成共价键时，原子的相应电子轨道是有方向性 / 区域性和数目特异性的，图 1-4 所示为不同元素（氧、氮、碳元素）形成共价键时常见轨道形态示意图。

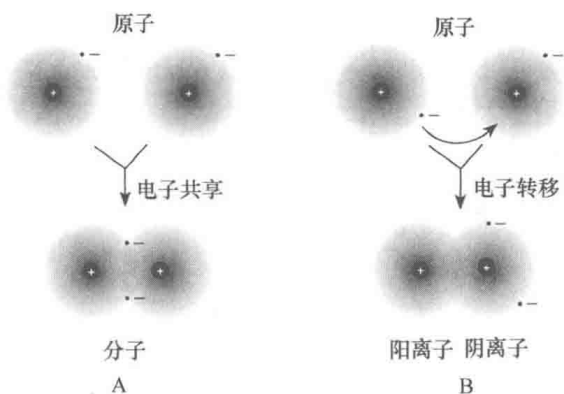


图 1-3 共价键 (A) 和离子键 (B) 示意图

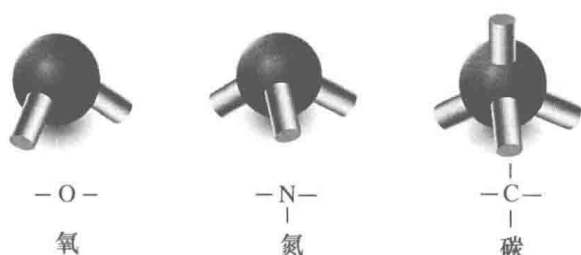


图 1-4 氧、氮、碳元素的共成共价键轨道方向和数目示意图

共价键可以是同种原子形成（如氧分子），也可在不同种原子间形成（如水分子）；可只在两个原子间形成，也可通过多轨道原子（碳原子、氮原子等）连接多个其他原子形成复杂的分子结构（乙烷等）。此外，还有双键（乙烯）、三键（乙炔）的情况。图 1-5 给出了一些常见含共价键的分子，供对比参考。

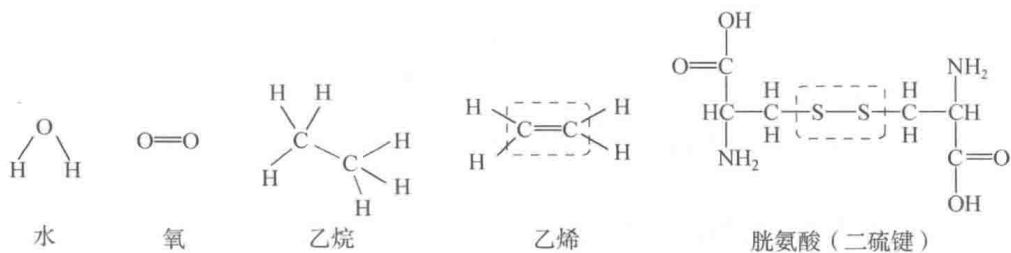


图 1-5 常见共价键示意图

氢键 (hydrogen bond): 除过离子键和共价键外，氢键是另一类生物体内存在的原子-原子间的相互作用，是电负性原子和与另一个电负性原子共价结合的氢原子间形成的键，与电负性强的原子连接的氢原子趋向带部分正电。氢键中氢原子在两个电负性原子间不等分配，与氢原子共价结合的原子为氢供体 (X)，另一个电负性原子为氢受体 (Y)，表示为 X—H···Y。生命体内能够形成氢键的物质很多，图 1-6 为生命科学中常见的氢键存在形式举例。氢键的存在对核酸及蛋白质等生物大分子结构及功能的稳定也是非常重要的。

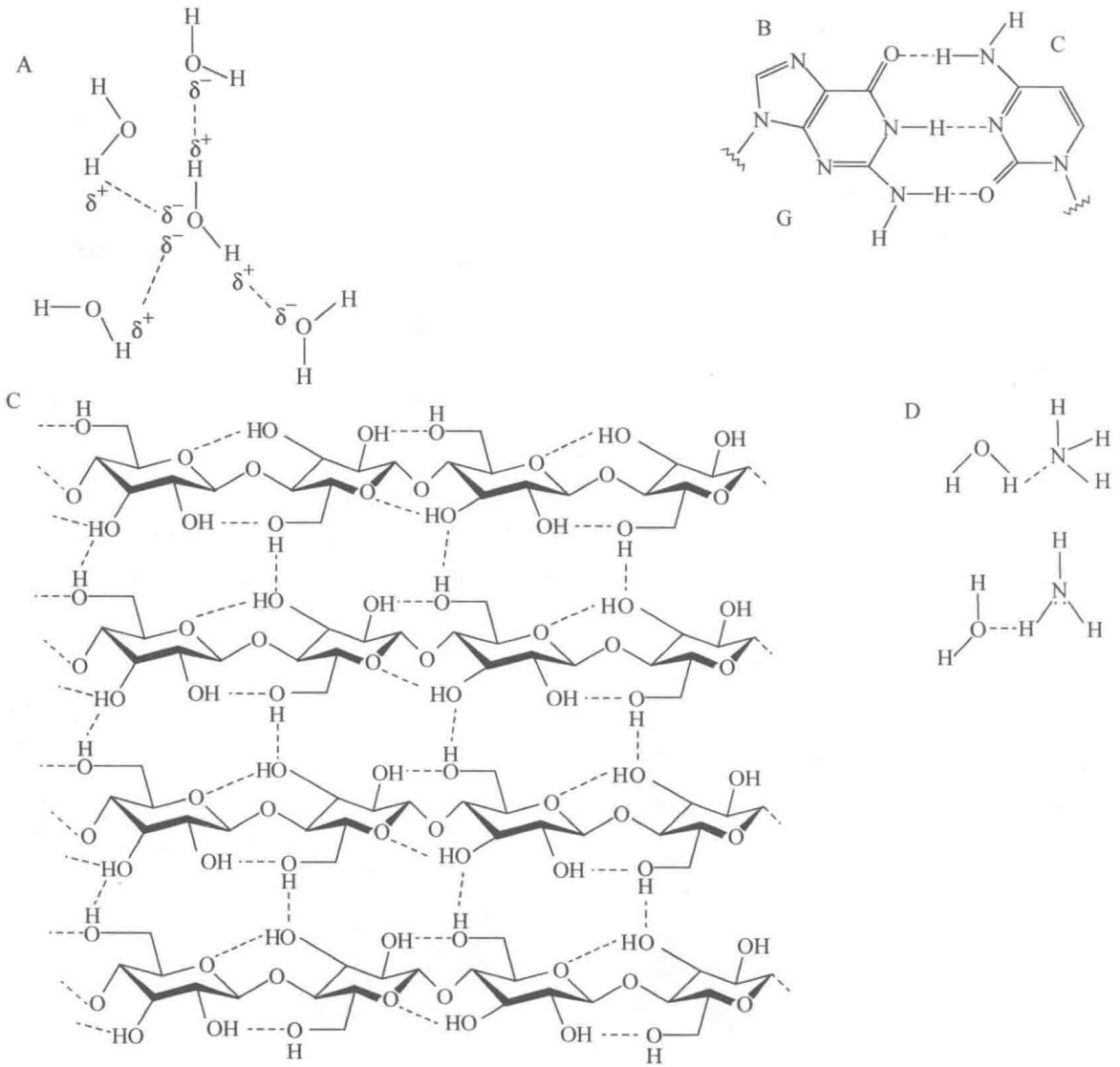


图 1-6 常见的氢键存在形式举例

A. 水分子之间；B. 碱基之间；C. 纤维素的糖结构单元间；D. 水分子与氨分子之间

各种化学键的形成方式不同，导致成键原子间的距离和反映出的键能也不同，表 1-2 列出了生命体中常见化学键的键能情况，可为理解各类化学键强度和稳定性提供参考。由表 1-2 可见共价键和离子键的键能较强，即形成的化合物稳定；而氢键和范德瓦耳斯力属于弱作用，容易形成也易受环境干扰。

表 1-2 各种化学键的键长和键能

化学键类型	亚类	键长 /nm	键能 (真空) / (kcal/mol)
共价键	饱和双原子	0.15	21.5
非共价键	离子键	0.25	19.1
	氢键	0.30	4.0
	范德瓦耳斯力	0.35	0.1

组成生物体的基本元素通过各种化学键的连接形成了数目众多、功能各异的生物分子，其中构成细胞的最主要的生物分子包括糖类 (saccharides)、核酸 (nucleic acid)、蛋白质 (protein)、脂肪 (fat) 等。这些生物分子均可由一些基本的结构单元 (单体) 通过一定的方式连接组成分子质量巨大的生物大分子物质 (表 1-3)，如多糖由单糖通过糖苷键相连构成，蛋白质由氨基酸通过肽键相连构成等。各类物质在细胞中所占的比例如表 1-4 所示，而它们在细胞中发挥的作用也各不相同。

表 1-3 生物大分子的结构单元

结构单元	生物大分子
糖	多糖
脂肪酸	脂肪、脂质、膜
氨基酸	蛋白质
核苷酸	核酸

表 1-4 常见四大物质构成比例 (干重)

物质种类	比例 /%
水	85.0
蛋白质	10.0
核酸	1.1
脂类	2.0
糖类	0.4
其他物质 (含无机物)	1.5

1.2 糖 类

糖类 (saccharides) 在自然界中分布广泛，每年由光合作用固定二氧化碳生成的糖就有 1000 亿吨。日常食用的蔗糖、粮食中的淀粉、植物体中的纤维素、血液中的葡萄糖等均属糖类。糖类是一切生命体维持生命活动所需能量的主要来源，也是细胞内能量物质的储存形式之一，如植物细胞中的淀粉及动物细胞中的糖原。糖类也参与构成细菌及植物细胞的细胞壁，此外，一些糖类分子还可以与蛋白质或脂类物质相连接形成糖蛋白、蛋白聚糖或糖脂，作为细胞外基质成分或信号分子发挥作用。

1.2.1 糖类的结构及分类

糖类物质是以 C、H、O 元素为主构成的多羟基醛或多羟基酮类化合物。不能水解为更小分子的糖类称为单糖，可以用 $(\text{CH}_2\text{O})_n$ 来表示其结构通式，因而又可以称为碳水化合物。细胞代谢中常见的单糖如含 3 个碳原子的丙糖、含 5 个碳原子的戊糖和含 6 个碳的己糖等。作为细胞最主要能源物质的葡萄糖就是最常见的己糖，图 1-7 显示了几种单糖的结构式，其中核酮糖和果糖属于酮糖，核糖与葡萄糖属于醛糖。单糖通过糖苷键相连形成聚糖。其中，寡糖指水解后产生 2~20 个单糖分子的糖类，如双糖 (如蔗糖、乳糖、麦芽糖)；多糖指水解后产生 20 个以上单糖的分子，如图 1-8 所示的淀粉。由相同单糖组成的多糖又称为同多糖 (如糖原、淀粉、壳多糖)，含有多种单糖组分的多糖称为杂多糖 (如透明质酸、半纤维素)，糖与非糖物质共价结合形成的叫做复合糖 (如糖蛋白、蛋白多糖、糖脂等)，而糖类物质的衍生物称为衍生糖 (如糖酸、糖胺、糖脂等)。

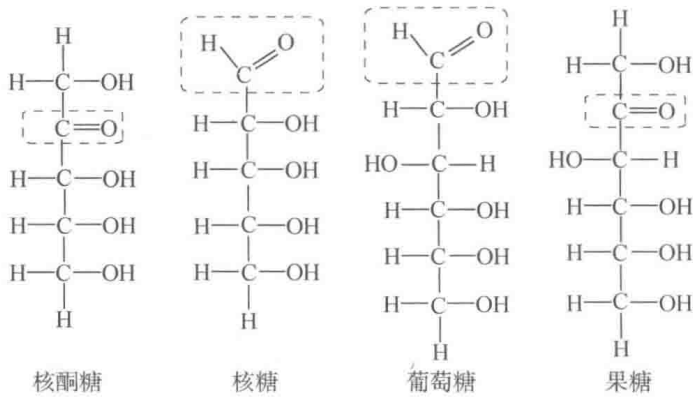


图 1-7 单糖结构示意图

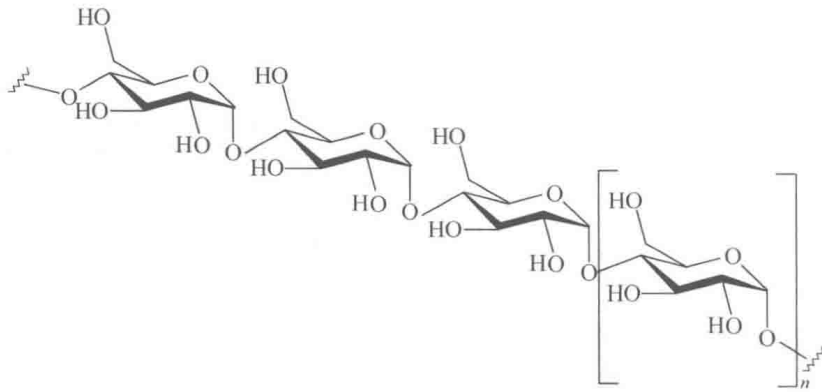


图 1-8 多糖（淀粉）分子式



知识扩展 1-1

单糖结构的表示方法

图 1-BOX1 中单糖的链状结构采用了 Fischer 投影式表示，能够较方便地比较不同糖的结构，但其不能反映 5 个或 5 个以上碳原子的单糖自发反应而形成的封闭的环状结构。单糖在自然界中基本都是环状存在的。在水溶液中，会有环状与链状同时存在的现象。以葡萄糖为例，水溶液中约 90% 的葡萄糖为环状，10% 为链状，它们之间不断互相转化，达到动态平衡。糖类的环形结构可用 Haworth 投影式来表示（图 1-BOX1）。单糖的 Haworth 式有一定的书写规则：Fischer 投影式中右侧—OH 放在环平面下方，左侧—OH 放在环平面上方；D 型糖 5 位 C 的醇羟基（羟甲基）放在环平面上方，L 型的放在环平面下方。新生成的羟基（由醛基或羰基形成）与末端羟甲基顺式为 β 型（均在右边，即上方），反式是 α 型。