

高等学校“十一五”规划教材

环境生物化学

赵景联 主编



化学工业出版社

高等学校“十一五”规划教材

环境生物化学

赵景联 主编

崔进 王淑伟 参编



化学工业出版社

· 北京 ·

X13-43/2

本书基于环境科学和工程专业的特点,系统地阐明了环境污染及其工程处理中的生物化学原理,旨在培养学生对环境污染工程技术的理解与认识,充实环境科学和工程应用的生化基础理论,促进环境污染治理和整个环境科学的发展。全书广泛参考国内外有关书籍及该领域的最新进展,注重理论基础与应用技术相结合。

本书内容由生物化学基础和环境污染物净化的生物化学两部分组成。全书囊括了生物分子化学、酶化学、新陈代谢、现代环境生物技术原理、环境污染控制与治理中的生物化学、微生物修复及环境毒理生物化学等内容。

本书适合作为高等院校师生的教材及教学参考书,并可供从事环境保护、环境科学、环境工程、环境微生物学、环境化学以及生命科学的研究人员、工程设计人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境生物化学/赵景联主编. —北京:化学工业出版社,
2007.7

高等学校“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-00527-4

I. 环… II. 赵… III. 环境化学:生物化学-高等学校-
教材 IV. X13 Q5

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第077553号

责任编辑:满悦芝

文字编辑:汲永臻

责任校对:洪雅姝

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京市振南印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张18¼ 字数488千字 2007年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00元

版权所有 违者必究

前言

环境生物化学是一门介于环境污染化学与生物化学之间的新兴前沿学科，也是当今环境科学研究的热点领域。从广义上来讲，该学科主要研究天、地、生物相互作用中的基本化学反应，特别是人与生物对外来物质和能量所做的应答，以及人类生产、生活活动对环境影响的化学基础。从狭义上来讲，它主要研究环境中的污染物质在生物体内的代谢转化规律。从环境保护角度出发，它主要是研究生物对污染物质降解与转化的能力，讨论生物代谢污染物质的途径。

环境生物化学是一门年轻的科学，迄今为止尚未有严格而公认的定义与概念。近年来，在环境科学的发展中，逐渐形成了环境化学、环境微生物学和环境生物学等分支并渐成体系，但目前对这方面内容的探讨多半单纯从化学或生物学的角度出发；而涉及工程方面问题的工程生物化学，其内容则又多半局限于与发酵工业相关的生物及生物化学原理。总体观之，虽然一些论著中也涉及环境生物化学问题，但尚欠缺全面而系统的阐述，适合环境科学和环境工程专业的参考内容也仍显不足。在本书中，我们希望通过对环境污染及其工程处理中的生物化学基础理论、原理的系统阐述，以及对该领域最新成果的介绍与讨论，使读者能够在这方面知识有较全面的了解，进而促进环境污染治理工程技术的改进和提高，推动环境污染治理乃至整个环境科学的发展。

自 20 世纪末以来，环境生物化学的发展甚为迅速。我国目前已有 200 多所院校开设环境科学和环境工程专业，我校与国内众多高等院校都将环境生物化学作为环境科学与工程专业的主干必修课程。在教学实践中，作者深感相关教材的缺乏。为提高该课程的教学水平，一本系统的教材是必不可少的。为此，作者以针对本科生和研究生的授课提纲为骨架，参考国内外相关书籍和文献编写了本书，以满足环境生物化学课程教学之所需。

本书由西安交通大学赵景联教授主持编写，研究生崔进和王淑伟同学参与编写，李厚宝和苏慈同学参与了图表的绘制。

本书在编写过程中参考了相关领域的著作，在此致以诚挚的谢意！

由于环境生物化学是一门新兴学科，可供参考的图书资料尚比较匮乏。限于编者的水平，书中不完善之处，恳请读者予以批评指正。

赵景联

2007 年 7 月于西安交通大学

目 录

 绪论	1
1.1 生物化学概述	1
1.1.1 生物化学的涵义	1
1.1.2 生物化学研究的主要内容	1
1.1.3 生物化学与其他科学的关系	2
1.1.4 生物化学的应用和发展前景	3
1.2 环境生物化学概述	3
1.2.1 环境生物化学定义	3
1.2.2 环境生物化学的研究对象与任务	4
1.2.3 环境生物化学的由来	4
1.2.4 环境生物化学的学习方法	4
复习题	4
参考文献	5
 细胞内的生物分子化学	6
2.1 生物分子概论	6
2.1.1 概述	6
2.1.2 生物元素	7
2.1.3 生物分子中的作用力	9
2.1.4 生物分子低层次结构的同一性	11
2.1.5 生物分子高层次结构的同一性	14
2.2 糖类化学	15
2.2.1 糖的概述	15
2.2.2 单糖	16
2.2.3 寡糖	26
2.2.4 多糖	28
2.3 脂类化学	31
2.3.1 脂类概述	31
2.3.2 单脂	32
2.3.3 复合脂	36
2.3.4 非皂化脂	40
2.4 蛋白质化学	43
2.4.1 蛋白质概述	43
2.4.2 氨基酸化学	45
2.4.3 蛋白质的分子结构	52
2.4.4 蛋白质的重要性质	56
2.4.5 蛋白质的分离提纯	59
2.5 核酸化学	60
2.5.1 核酸概述	60
2.5.2 核苷与核苷酸	63
2.5.3 核酸的结构	66
2.5.4 核酸的性质	70
复习题	72
参考文献	73
 新陈代谢催化剂——酶化学	74
3.1 酶的概述	74
3.1.1 酶的概念	74
3.1.2 酶催化作用的特点	74
3.1.3 酶的组成	76
3.1.4 酶的分类	77
3.1.5 酶的命名	79
3.2 酶的化学本质及结构功能特点	80
3.2.1 酶的一级结构与催化功能的关系	80
3.2.2 酶的活性与其高级结构的关系	82
3.3 酶作用的机制	84
3.3.1 酶的催化作用实质	84
3.3.2 酶的工作方式——中间产物学说	84
3.3.3 酶作用专一性的机制——诱导契合学说	85
3.3.4 酶作用高效性的机制	86
3.4 酶促反应的动力学	88
3.4.1 酶促反应的速度	88
3.4.2 影响酶促反应速度的因素	88
3.5 酶的分离纯化与酶活力测定	96
3.5.1 酶的分离纯化	96
3.5.2 酶活力的测定	97
复习题	99
参考文献	99
 细胞内生物分子的新陈代谢	100

4.1 新陈代谢概论	100	4.4.3 氨基酸分解的共同途径	127
4.1.1 同化作用和异化作用	100	4.4.4 氨基酸分解产物的代谢途径	130
4.1.2 中间代谢	101	4.5 核酸分解代谢	132
4.1.3 自由能与高能化合物	102	4.5.1 核酸的分解	132
4.2 糖分解代谢	104	4.5.2 核苷酸的降解	132
4.2.1 糖代谢概述	104	4.5.3 嘌呤的分解	133
4.2.2 多糖和双糖的分解	104	4.5.4 嘧啶的分解	135
4.2.3 葡萄糖的分解	107	4.6 生物氧化与能量代谢	135
4.3 脂肪分解代谢	121	4.6.1 生物氧化概述	135
4.3.1 脂肪的酶促水解	121	4.6.2 生物氧化体系和酶类	137
4.3.2 脂肪的分解代谢	122	4.6.3 生物氧化过程中能量的转移和利用	143
4.4 蛋白质代谢	125	复习题	146
4.4.1 概述	125	参考文献	147
4.4.2 蛋白质的酶解	125		
 现代环境生物技术原理	148		
5.1 现代生物技术概述	148	5.3.6 重组体 DNA 导入受体细胞	171
5.1.1 现代生物技术定义	148	5.3.7 重组体的筛选	172
5.1.2 现代生物技术及应用	148	5.3.8 外源基因在宿主中的表达	173
5.1.3 现代环境生物技术	148	5.3.9 基因工程在环境污染治理中的应用	174
5.2 酶工程基本原理	150	5.4 微生物细胞工程	177
5.2.1 酶固定化概念	151	5.4.1 细胞工程概述	177
5.2.2 固定化酶反应动力学	154	5.4.2 细胞融合构建环境工程菌	178
5.2.3 酶在污染治理中的应用	158	5.5 发酵工程	180
5.3 基因工程基本原理	162	5.5.1 发酵概述	180
5.3.1 基因工程概述	162	5.5.2 发酵工程在环境污染治理中的应用	181
5.3.2 目的基因的获得	164	复习题	182
5.3.3 基因工程载体	167	参考文献	182
5.3.4 基因工程工具酶	168		
5.3.5 重组体的构建	170		
 水环境污染控制与治理中的生物化学	183		
6.1 污水、废水生物控制与治理生物化学	183	6.2.1 生物脱氮生物化学	192
6.1.1 水的生物化学处理概念	183	6.2.2 生物除磷生物化学	200
6.1.2 好氧生物处理生物化学	183	复习题	204
6.1.3 厌氧生物处理生物化学	188	参考文献	204
6.2 污水、废水深度处理生物化学	192		
 有害有机物微生物降解中的生物化学	205		
7.1 微生物降解概述	205	7.2.1 卤代烃类微生物降解的生物化学	211
7.1.1 微生物降解的基本概念	205	7.2.2 农药微生物降解的生物化学	216
7.1.2 微生物降解有机污染物的作用	206	7.2.3 洗涤剂微生物降解的生物化学	218
7.1.3 污染物生物降解的动力学	209	7.2.4 石油污染物微生物降解的生物化学	219
7.2 典型有害有机污染物微生物降解的生物化学	211	复习题	225
		参考文献	225
 工业污染物微生物治理中的生物化学	226		
8.1 造纸废水微生物治理中的生物化学	226	8.1.2 造纸废水微生物处理中的生物化学原理	226
8.1.1 造纸废水概述	226		

8.2 染料废水微生物治理中的生物化学	230	8.4.1 燃料中的硫概述	239
8.2.1 染料废水概述	230	8.4.2 燃料微生物脱硫的生物化学机理	240
8.2.2 染料废水微生物处理中的生物化学 原理	231	8.5 化石燃料微生物脱氮预防治理中的生物 化学	243
8.3 冶金废水微生物治理中的生物化学	233	8.5.1 化石燃料中的芳香氮化合物	244
8.3.1 冶金废水概述	233	8.5.2 含氮污染物的微生物脱氮的生物化学 机理	244
8.3.2 冶金废水的微生物治理中的生物化学 原理	234	复习题	246
8.4 燃料微生物脱硫预防治理中的生物 化学	239	参考文献	246
 污染环境微生物修复的生物化学原理	247		
9.1 污染环境微生物修复概念	247	原理	255
9.2 污染环境微生物修复的机理	247	9.3.2 地下水污染修复中的生物化学原理	258
9.2.1 用于生物修复的微生物	247	9.3.3 大气污染的微生物修复原理	261
9.2.2 微生物对有机污染物的修复机理	249	9.3.4 固体废弃物生物处理中的生物化学 原理	264
9.3 污染环境微生物修复中的生物化学 原理	255	复习题	267
9.3.1 土壤污染微生物修复中的生物化学		参考文献	268
 环境毒理生物化学	269		
10.1 环境毒理学概述	269	10.3.1 有毒物剂量和相对毒性	274
10.1.1 环境毒理学概念	269	10.3.2 有毒物联合作用	275
10.1.2 环境有毒化学物质	269	10.3.3 严重毒作用机制	275
10.2 环境有毒物质在生物体内的转运和 代谢	270	10.4 环境有毒物质的生物化学效应	279
10.2.1 有毒化学物质进入人体途径	270	10.4.1 金属有毒物质的生物化学效应	279
10.2.2 有毒化学物质在体内的分布	270	10.4.2 有毒无机化合物的生物化学效应	281
10.2.3 环境有毒物质代谢	271	10.4.3 农药的生物化学效应	282
10.2.4 环境有毒物干扰酶功能的机制	272	复习题	284
10.3 环境有毒物化学	274	参考文献	284



绪 论

1.1 生物化学概述

1.1.1 生物化学的涵义

生物化学 (biochemistry) 是介于生物与化学之间的一门边缘科学。它是用化学的理论和作为主要手段来研究生命现象, 从而揭示生命的奥秘。其任务主要有两个方面: 一方面研究构成生物体的基本物质 (糖类、脂类、蛋白质、核酸) 及对体内的生物化学反应起催化和调节作用的酶、维生素和激素的结构、性质和功能, 这部分内容通常称为静态生物化学; 另一方面研究构成生物体的基本物质在生命活动过程中进行的化学变化, 也就是新陈代谢及在代谢过程中能量的转换和调节规律, 这部分内容通常称为动态生物化学。

可以说, 生物化学研究的是生命现象的化学本质, 一切与生命有关的化学现象都是生物化学的研究对象。从研究对象分类, 可分为动物生物化学及植物生物化学。前者以人体及动物为研究对象, 后者以植物为研究对象。如果研究对象不局限于动物、植物和一般生物, 则称普通生物化学。如果以生物 (特别是动物) 的不同进化阶段为化学特征 (包括化学组成和代谢方式) 为研究对象, 则称进化生物化学或比较生物化学。以生理为研究对象者称生理化学。此外, 根据不同的研究对象和目的, 生物化学还可有许多分支, 如微生物生物化学、医学生物化学、农业生物化学和工业生物化学等。

1.1.2 生物化学研究的主要内容

生物化学研究的内容可大体分为三个部分, 即研究体内的物质组成 (叙述生物化学)、研究体内物质代谢 (动态生物化学)、研究生物大分子的结构与功能 (分子生物学)。这三个部分是紧密联系的。

(1) 生物体的物质组成

生物体是由许多物质按严格的规律组建起来的。在生物体内除水外, 每一类物质又包括很多种化合物。如人体蛋白质就有 10 万种以上。各种蛋白质的结构不同, 因而也就有各种不同的功能。此外, 人体内还含有核酸、激素、微量元素等, 它们占体重的分量虽少, 但也是维持正常生命活动不可缺乏的物质。所有这些物质不是杂乱堆积在一起的, 它们彼此之间有一定组成规律, 从而构成能够体现多种生物功能的生物学结构。

蛋白质和核酸是实现生命活动的主要物质基础, 而且分子量很大, 通常称为生物高分子 (biomacromolecule)。这些生物高分子化合物由较简单的小分子物质构成, 常将这些小分子称为构件分子。这些构件分子除构成生物大分子发挥作用外, 它单独存在时也有某些特殊的作用。

研究生物体物质组成的另一个重要方面, 是用人工方法来合成生物大分子, 其目的不仅是验证对体内物质进行化学分析的结果, 更重要的是在于深入认识分子结构与生物功能的关系, 探索生命现象的奥秘, 追溯生命的起源, 还可制备极难获得的生物活性物质。我国科学家在 1965 年首先人工合成了胰岛素, 1981 年合成了酵母丙氨酸 tRNA, 这些都是国际上的

首创成果，为人类做出的重大贡献。

(2) 物质代谢及其调控

生物体不断与外界环境进行着物质交换，生物体内时时刻刻都在进行着极其有规律的化学反应，将这些过程总的称为物质代谢或新陈代谢 (metabolism)。生物体通过消化吸收新摄取的营养物质，在体内一部分被转变成其组成成分，以保证生长发育和组织更新的需要，另一部分被氧化分解释放能量以维持生命活动。

体内进行的物质代谢叫做中间代谢，中间代谢的化学反应绝大多数都在细胞内进行。从分子大小变化来分，由小分子物质变成大分子物质的过程叫做合成代谢，反之，由大分子物质变成小分子物质的过程叫做分解代谢。从生物学意义上来说，将从外界吸收来的物质转变成体内组成成分的过程叫做同化作用，反之，使体内组成成分转变成可排出体外的形式的过程叫做异化作用。一般来说，同化作用以合成代谢为主，异化作用以分解代谢为主。

中间代谢中的化学反应绝大多数是连锁反应，将这种连锁反应叫做代谢途径。它在许多种酶的催化下进行。一个细胞内有近 2000 种酶，在同一时间内催化着各种不同代谢途径中的各种化学反应，这些化学反应彼此密切配合并与机体的需要精确地对应，构成非常协调的统一体系。生物体内的化学反应为什么能如此巧妙地进行呢？这是由于多种调节因素进行调节控制来实现的。首先，酶的催化作用有严格专一性和可控性，又有区域分布和多酶体等特点。这些是在一个细胞内各条代谢途径能有序进行的基础。此外，动物和人体内还有神经系统、激素及其他调节物质，通过调节酶的活力来调节代谢途径的方向和强度。

(3) 物质的分子结构与功能的关系

组成生物体的各种物质都与其生理功能密切相关，尤其是生物高分子显得格外突出，可以说，结构是功能的基础，功能是结构的体现。一切生命现象都是从具体的物质结构和物质代谢的基础上体现出来的。

1953 年，两名年轻的科学家 Watson、Crick 发表了 DNA 分子结构的双螺旋模型。这个卓越的成就，首次从分子水平上揭开了遗传的秘密，开创了分子生物学 (molecular biology) 时代，几乎与之同时 Sanger 发表了胰岛素分子中氨基酸残基的排列顺序，揭示出蛋白质分子中氨基酸残基排列顺序是其空间结构与生物功能的重要基础。从那时以来，研究人员又相继阐明 DNA 半保留复制机理，破译了遗传密码，证实了反转录作用，从而提出了遗传中心法则的现代见解，这些都是分子生物学的辉煌成就，在此基础上发展起来的基因重组技术，为改造生物性状、揭开生命奥秘又向前跨进了一大步。因此，生物高分子的结构与功能的研究是生物化学-分子生物学中最引人注目的内容。

1.1.3 生物化学与其他科学的关系

(1) 生物化学与化学的关系

在 19 世纪末期以前，生物化学的问题主要由化学（特别是有机化学）及生理学分别研究，在 19 世纪末和 20 世纪初，生物化学才成为一门独立科学。研究生物体的化学成分必须应用化学的方法把它分离出来，加以纯化，确定它的性质，认识它的结构，并把它合成出来，因此，生物化学的发展与有机化学及分析化学的发展有密切的关系。此外，近年来在生物化合物的结构、性质、功能以及物质代谢的研究上已经广泛应用了物理化学的理论及技术。应用物理学、化学及生物学的方法而发展起来的生物物理化学，也是解决生命现象问题的非常有用的科学。

(2) 生物化学与其他生物科学的关系

生物化学是在生理学基础上发展起来的一门科学。生物化学的一个目的就是通过体内的化学变化来认识生物体的生理机能，找出其化学依据。因此生物化学的研究工作不能脱离生理学，生理学的研究也离不开生物化学。微生物学的研究更需要广泛应用生物化学的原理与

技术,例如微生物的生理活动、病毒的本质、免疫的化学程序、抗体的生成机制等均与生物化学有密切关系。此外,细胞生物学、遗传学、胚胎学、组织学、进化论甚至分类学的研究都离不开生物化学。

生物化学与有机化学、生理学、物理化学、分析化学等虽然有密切的联系,但是作为一门独立的科学,生物化学本身具有独特的研究对象和研究方法。今天人们根据一定的研究对象和目的以及人类生活的需要,把生物化学分为植物生物化学、动物生物化学、人体生物化学、微生物生物化学、病理生物化学、临床生物化学、工业生物化学、农业生物化学、环境生物化学、生物物理化学等,因此生物化学的研究和发展是多方面的。

1.1.4 生物化学的应用和发展前景

生物化学向其他学科的渗透越来越明显,它几乎渗透到了一切生命科学的领域,绝大多数生物学问题都需要从生物化学角度和用生物化学方法才可能较深入地得到了解。可以说,生物化学的原理与技术是研究现代生物学的重要手段之一。

生物化学的原理和技术在生产实践中也得到了广泛的应用。如食品、发酵、制药及皮革工业,预防医学、治疗医学等都与生物化学有着密切的关系。

生物化学是农业科学的重要理论基础之一,如研究植物的新陈代谢的各种过程,就有可能控制植物的发育,如能明确糖、脂类、蛋白质、维生素、生物碱以及其他化合物在植物体内合成规律,就有可能创造一定的条件,以获得优质高产的某种农作物。或在了解了某种作物的遗传特性之后,可利用基因重组技术,培育出优良的作物新品种。此外,农产品的储藏与加工,植物病虫害的防治,除草剂和植物激素的应用,家畜的营养问题和畜牧业生产率的提高,土壤微生物学,土壤的肥力提高和养分的吸收等都需要应用生物化学的理论和科学技术手段。

生物化学在 20 世纪 80 年代发展了生物工程或生物高新技术的崭新领域,包括遗传工程或基因工程,蛋白质工程和酶工程,以及细胞培养、组织培养等体外技术,用于改造物种和生产对人类有用的产物。以生物化学的理论和技术为基础的生物工程具有广阔的前景。首先,利用生物工程的方法和技术可以改造物种,培育高抗逆性、具有特殊品质的转基因植物。其次,人们正在试图利用植物建造“植物工厂”,生产对人类有用的特殊生物化学物质。利用生物工程来生产新型的药物和疫苗,对于治疗疾病、维护人类健康有着重要的意义,将会大大提高劳动生产率、降低生产成本。生物化学理论还可以与工业技术领域学科相结合,在材料工业、污水和废物处理方面发挥作用。目前已产生了生物化学和电子学的边缘学科——分子生物电子学,研究生物芯片和生物传感器,对电子计算机制造、疾病防治和生物模拟都有重要的推动作用。因此,生物工程产业的崛起将会极大地改变社会产业结构和人们的劳动生产方式。

1.2 环境生物化学概述

1.2.1 环境生物化学定义

环境科学向化学提出的基本问题已经从早期的分析监测方法和环境治理方法转向环境过程研究。

从广义来讲,环境生物化学(environmental biochemistry)主要研究天、地、生物相互作用的基本化学反应,特别是人和生物对外来物质和能量所做的应答以及人类生活生产活动对环境影响的化学基础。

从狭义来讲,环境生物化学是介于环境污染化学与生物化学之间的一门科学。它研究环境中的污染物质在生物体内的代谢转化规律。

从环境保护角度出发,环境生物化学主要是研究生物对污染物质降解与转化的能力,讨论生物代谢污染物质的途径。

1.2.2 环境生物化学的研究对象与任务

① 产能物质糖类、脂类和蛋白质的化学、代谢规律和基本理论,这是生活污水中有机物生物处理的基本原理;

② 生物催化剂酶的化学、作用机理和应用技术,这是环境生物技术的核心;

③ 遗传物质核酸的化学、作用机理和应用技术,这是将分子生物学应用于环境生物技术的基础理论;

④ 酶工程、基因工程、微生物细胞工程和发酵工程四大现代环境生物技术原理、作用机理及应用技术,这是提高污染物降解效率、拓宽降解途径及工业化应用的未来趋势;

⑤ 研究烃、有机农药、石油及环境激素等不易降解物质的生物代谢与转化规律及其生物降解的分子机制;

⑥ 研究有毒污染物的生物积累与生物转化与有毒物质的生物化学效应,这是环境医学及毒理学研究的基础。

环境生物化学是一门年轻的科学,我们希望通过系统地阐明环境污染及其工程处理中的生物化学基础理论、原理和对目前这一领域的最新成果的介绍和讨论,促进环境污染工程技术的改进和提高,促进环境污染的治理和整个环境科学的发展。

1.2.3 环境生物化学的由来

环境生物化学是生物化学的一个分支学科,迄今为止,还没有一个完整的定义和概念。近年来,随着环境科学的发展,逐渐形成了环境化学、环境微生物学和环境生物学等分支,而且正在形成独立的体系。但目前这方面的内容多半是单纯从化学或生物学的角度讨论较多,在工程方面还出现了工程生物化学,内容多半局限于发酵工业方面的生物与生物化学原理,尽管有的论著中也涉及一些环境生物化学问题,但仍欠全面系统,特别是在适合环境科学和环境工程专业参考内容方面更显不足。

1.2.4 环境生物化学的学习方法

生物化学虽然与化学,特别是有机化学密切相关,但性质毕竟有所不同,主要区别是生物化学反应是在生物体内进行的,反应的环境比体外复杂,一般由生物催化剂(酶)参加。有些在体外发生的反应,在体内就不一定照样进行,因此,不能简单地根据体外的化学反应去理解体内的反应。

生物化学分为动态(代谢)和静态(结构)两大部分,两部分之间是互相联系的。结构是代谢的基础,而在学习结构时,往往也涉及一些代谢的知识。学完代谢之后,如果再复习一下结构的知识,会有更深刻的理解。

学习生物化学时,应对教师指定的教材内容做全面了解,分析比较,明确概念;对糖类、脂类、蛋白质、核酸以及其他有关化学物质的学习,要从化学本质和结构特点出发,联系它的性质和功能。

生物化学有许多需要记忆的知识,也有许多需要理解的知识,既需要记忆,又不能完全死记硬背。

在学习环境生物化学过程中应与先修和并修课程(例如有机化学、微生物学、环境科学、环境工程等)内容相联系,以促进理解、加强记忆。

复 习 题

1. 什么叫生物化学?生物化学研究的内容、对象和任务是什么?

2. 什么叫环境生物化学? 环境生物化学研究的内容、对象和任务是什么?
3. 应该如何学习环境生物化学?

参 考 文 献

- [1] 郑集. 普通生物化学. 第三版. 北京: 人民教育出版社, 1990.
- [2] 沈同. 生物化学(上册) 第二版. 北京: 人民教育出版社, 1990.
- [3] 大连轻工业学院. 生物化学(工业发酵专业用). 北京: 轻工业出版社, 1980.
- [4] 王建龙, 文湘华. 现代环境生物技术. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [5] 孔繁翔. 环境生物学. 北京: 高等教育出版社, 2000.

细胞内的生物分子化学

2.1 生物分子概论

2.1.1 概述

自然界所有的生命物体都由三类物质组成：水、无机离子和生物分子，各自所占的比例如图 2-1 所示。

(1) 生物分子是生物特有的有机化合物

生物分子 (biomolecule) 泛指生物体特有的各类分子，它们都属于所谓的有机化合物。

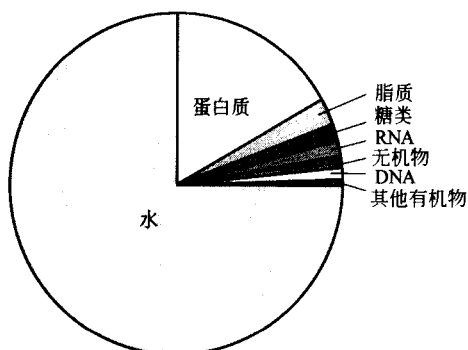


图 2-1 生命物体的物质组成

水：65%~75%，蛋白质：10%~15%，脂质：3%~7%，糖类：2%~4%，核酸：3%~5%，其他有机物：<1%，无机物：2%~3%

典型的细胞含有 10000~100000 种生物分子，其中近半数是小分子，分子量（本书中特指“相对分子质量”）一般在 500 以下。其余都是生物小分子的聚合物，分子量很大，一般在 10000 以上，有的高达 10^{12} ，因而称为生物大分子。构成生物大分子的小分子单元，称为构件。氨基酸、核苷酸、单糖和脂肪酸分别是组成蛋白质、核酸、多糖和脂肪的构件。

虽然自然界存在着千千万万不同的生物，但是组成这些生物体的生物分子类型并不多，主要是蛋白质、核酸、糖和脂这四类生物大分子以及某些特殊的小分子化合物，如维生素、辅酶和激素等，它们是构成生物体和维持生命现象最基本的物质基础和功能基础。

(2) 生物分子具有复杂有序的结构

所有的生命过程都以生物分子一定的结构为基础。种类繁多的生物分子都有自己特有的结构。尤其是生物大分子，它们的分子量都很大，构件种类多，数量大，排列顺序千变万化，因而其结构十分复杂。估计仅蛋白质就有 $10^{10} \sim 10^{12}$ 种。生物分子又是有序的，每种生物分子都有自己的结构特点，所有的生物分子都以一定的有序性（组织性）存在于生命体系中。

(3) 生物结构具有特殊的层次

生物用少数几种生物元素 (C、H、O、N、S、P) 构成小分子构件，如氨基酸、核苷酸、单糖、脂肪酸等，再用简单的构件构成复杂的生物大分子，由生物大分子构成超分子集合体，进而形成细胞器、细胞、组织、器官、系统和生物体 (图 2-2)。生物的不同结构层次有着质的区别：低层次结构简单，没有种属专一性，结合力强；高层次结构复杂，有种属专一性，结合力弱。生物大分子是生命的物质基础，生命是生物大分子的存在形式。生物大分子的特殊运动体现着生命现象。

(4) 生物分子都行使专一的功能

每种生物分子都具有专一的生物功能。糖能提供能量,分子量极大的核酸能储存和携带遗传信息,种类繁多的蛋白质分子行使专一的催化、调节、运输、换能、运动等功能。任何生物分子的存在,都有其特殊的生物学意义。人们研究某种生物分子,就是为了了解和利用它的功能。

(5) 代谢是生物分子存在的条件

代谢不仅产生了生物分子,而且使生物分子以一定的有序性处于稳定的状态中,并不断得到自我更新。一旦代谢停止,稳定的生物分子体系就要向无序发展,在变化中解体,进入非生命世界。

(6) 生物分子体系有自我复制的能力

遗传物质 DNA 能自我复制,其他生物分子在 DNA 的直接或间接指导下合成。生物分子的复制合成,是生物体繁殖的基础。

(7) 生物分子能够人工合成和改造

自然界的生物分子是通过漫长的进化产生的。随着生命科学的发展,人们已能在体外人工合成各类生物分子,包括合成复杂的生物大分子蛋白质、核酸等,以合成和改造生物大分子为目标的生物技术方兴未艾。

2.1.2 生物元素

在生物体中能维持生命活动的必需元素称为生命元素,它们的重要性、数量和分布方式相差很大。有些可以叫做基本元素,因为在所有的生物体中都有;有些元素却只存在于某种生物中。迄今为止,在生物体中发现的元素有 60 多种。其中有 27 种是细胞中所具有的,也是生物体所必需的,称为生物元素。

在这 27 种元素中有 6 种,即 C、H、O、N、P 和 S 对生命起着特别重要的作用,大部分有机物是由这 6 种元素构成的。Ca、K、Na、Mg 和 Cl 5 种元素在生物体内虽然较少,但也是必需的。此外 Mn、Fe、Co、Cu、Zn、Se、I、Cr、Si、V、F、B、Mo、Sn、Ni 和 Br 16 种微量元素也是生命不可缺少的。构成生物体的元素具有下列特点。

(1) 生物元素都是环境中存在的丰度较高的元素

生物体是在地球上产生的,并同环境变化一起沿着生态系统的稳定性,有选择地取舍环境中的物质而进化发展的,所以生物体采用的构成自身的元素都是环境中存在的,是经过长期的选择确定的。生物元素都是在自然界丰度较高,容易得到,又能满足生命过程需要的元素。

(2) 主要生物元素都是轻元素

生物体所必需的元素绝大多数为轻元素,如周期表中开头的 34 个元素中即有 21 个元素是动物生活所必需的,这样就使生物体有较轻的重量。

主要生物元素 C、H、O、N 占生物元素总量的 95% 以上,其原子序数均在 8 以内。它们和 S、P、K、Na、Ca、Mg、Cl 共 11 种元素,构成生物体全部质量的 99% 以上,称为常量元素,其原子序数均在 20 以内。另外 16 种元素称为微量元素,包括 B、F、Si、Se、As、I、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Sn、Mo,原子序数在 53 以内。

(3) 碳氢氧氮硫磷是生物分子的基本素材

图 2-3 是生物分子中 C、H、O、N、S、P 元素含量。

① C、H 是生物分子的主体元素 碳元素是构成生物分子的主要基础元素。它是Ⅳ族中最轻的元素,位于典型金属元素和非金属元素中间,价电子数为 4。碳原子的原子核对

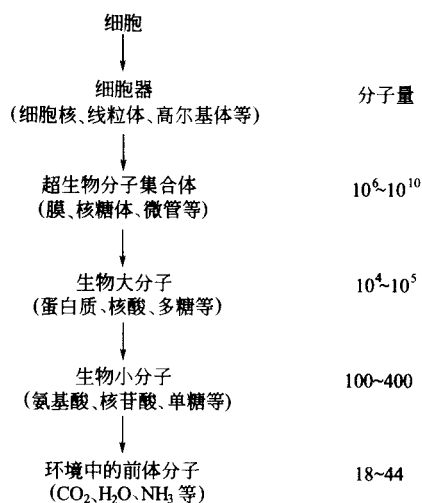


图 2-2 生物分子的层次

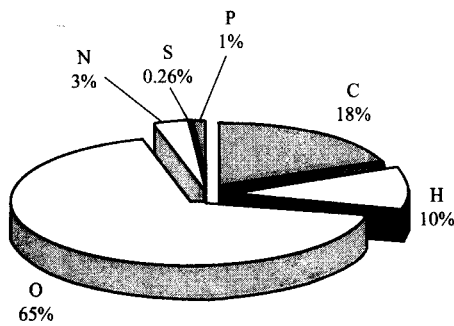


图 2-3 生物分子中 C、H、O、N、S、P 元素含量

其价电子有一定的控制能力，既难得到电子，又难失去电子，最适于形成稳定的共价键。碳原子非凡的成键能力和它的四面体构型，使它可以自相结合，形成结构各异的生物分子骨架。碳原子又可通过共价键与其他元素结合，形成化学性质活泼的官能团。

氢是 I 主族，也是一切元素中最轻的元素，它作为另一种生物元素，借稳定的共价键与碳原子结合，构成生物分子的骨架。生物分子的某些氢原子具有还原能力，它们被氧化时可放出能量。生物分子含氢量的多少（以 H/C 表示）与它们的供能价值直接相关。氢原子还参与许多官能团的

构成。与电负性强的氧氮等原子结合的氢原子还参与氢键的构成。氢键是维持生物大分子的高级结构的重要作用力。

② 氧氮硫磷构成官能团 氮、磷和氧、硫分别是 V 和 VI 主族最轻的元素。它们是除碳以外仅有的能形成多价共价键的元素，可形成各种官能团和杂环结构，对决定生物分子的性质和功能具有重要意义。

此外，硫磷还与能量交换直接相关。生物体内重要的能量转换反应，常与硫磷的某些化学键的形成及断裂有关。一些高能分子中的磷酸苷键和硫酯键是高能键。

(4) 微量无机生物元素大多为过渡元素

表 2-1 是生物体内的微量元素及其原子序数。

表 2-1 生物体内的微量元素及其原子序数

元素	原子序数	元素	原子序数	元素	原子序数	元素	原子序数
硼	5	氯	17	锰	25	硒	34
氟	9	钾	19	铁	26	钼	42
钠	11	钙	20	钴	27	锡	50
镁	12	钪	23	铜	29	碘	53
硅	14	铬	24	锌	30		

生物体所必需的微量元素大多为过渡元素，这与它们核外的原子轨道中有未被填满的 d 轨道有关。过渡元素具有空轨道，能与具有孤对电子的原子以配位键结合。不同过渡元素有不同的配位数，可形成各种配位结构，如三角形、四面体、六面体等。过渡元素的络和效应在形成并稳定生物分子的构象中，具有特别重要的意义。

过渡元素对电子的吸引作用，还可导致配体分子的共价键发生极化，这对酶的催化很有用。已发现三分之一以上的酶含有金属元素，其中仅含锌酶就有百余种。

Fe^{2+} (Fe^{3+}) 和 Cu (Cu^{2+}) 等多价金属离子还可作为氧化还原载体，担负传递电子的作用。在光系统 II 中，四个锰原子构成一个电荷累积器，可以累积失去四个电子，从而一次氧化两分子水，释放出一分子氧，避免有害中间产物的形成。细胞色素氧化酶中的铁-铜中心也有类似功能。

(5) 常量离子具有电化学效应

K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等常量离子，在生物体的体液中含有较高，具有电化学效应。它们在保持体液的渗透压、酸碱平衡、形成膜电位及稳定生物大分子的胶体状态等方面有重要意义。

各种生物元素对生命过程都有不可替代的作用，必须保持其代谢平衡。

某些非生物元素进入体内，能干扰生物元素的正常功能，从而表现出毒性作用。如镉能置换

锌,使含锌酶失活,从而使人中毒。某些非生物元素对人体有益,如有机锗可激活小鼠腹腔巨嗜细胞,后者能诱导细胞分泌白细胞介素和干扰素,从而发挥免疫监视、防御和抗肿瘤作用。

2.1.3 生物分子中的作用力

(1) 两类不同水平的作用力

物质间的相互作用是电磁力,引力与斥力都起作用。原子、分子与生物高层次结构,都是引力和斥力的统一体。原子与原子、分子与分子,相互结合形成高级层次结构时,体系的能量降低,伴随能量的释放,所释放的能量称为结合能(binding energy)。不同物质层次的相互作用不同,结合能的大小不一。一般来说,物质的层次越低,尺度越小,其相互作用力越强。物质层次越高,尺度越大,相互作用力越弱。不同水平的作用力在不同的结构层次上起着不同的作用。

生物体系有两类不同的作用力:一类是生物元素借以结合成为生物分子的强作用力——共价键;另一类是决定生物分子高层次结构和生物分子之间借以相互识别、结合、作用的弱作用力——非共价相互作用。

(2) 共价键是生物分子的基本形成力

共价键(covalent bond)是两个电负性相差不大的原子,借共用电子对所形成的化学键。具有自旋反平行的单电子的两个原子,接近到一定距离时,两者之间的作用为相互吸引。体系的能量随核间距离的缩小而减低,核间距离缩小到引力与斥力达到平衡时,体系的能量最低,即形成稳定的共价键。这时两原子的成键电子云重叠,电子运动主要集中到核间,把两个带正电荷的原子紧紧地结合在一起。通过共价键,分子中的各个原子结合成为具有一定共价结构的分子。只有通过化学反应,破坏一些共价键和形成一些共价键,才能改变分子的共价结构。

共价键的属性由键能、键长、键角和极性 etc 参数来描述,这些参数决定着分子的基本结构和性质。

① 键能 两个原子借共价键相结合时,体系的能量降低,放出能量(结合能)。要破坏这个键,就必须供给相应的能量。键能(bond energy)就等于破坏某一共价键所需的能量。键能越大,键越稳定。生物分子中常见的共价键的键能一般在 300~800kJ/mol 之间(表 2-2)。

② 键长 两个成键原子相互接近到一定程度时,价电子云相互重叠程度最佳,密度最大,体系的能量最低,键最稳定。如果两原子再靠近,就会受到核间斥力而被推开。在引力与斥力的共同作用下,成键原子核间距离保持不变,这一距离就是键长(bond length)。一般讲,键长越长,键能越弱,容易受外界电场的影响发生极化,稳定性也越差。生物分子中键长多在 0.1~0.18nm 之间(表 2-2)。

表 2-2 常见共价键的键能与键长

键	键能/(kJ/mol)	键长/nm	键	键能/(kJ/mol)	键长/nm
$\begin{array}{c} \\ -C-H \\ \end{array}$	414	0.109	$\begin{array}{c} \diagup \\ C=C \\ \diagdown \end{array}$	607	0.140
$\begin{array}{c} \diagup \\ N-H \\ \diagdown \end{array}$	389	0.103	$-C \equiv C-$	803	0.121
$-O-H$	464	0.097	$-C-O-$	335	0.143
$-S-H$	347		$\begin{array}{c} \diagup \\ C=O \\ \diagdown \end{array}$	694	0.120
$\begin{array}{c} & \\ -C & -C- \\ & \end{array}$	347	0.154	$\begin{array}{c} \\ -C-S- \\ \end{array}$	272	0.182
			$\begin{array}{c} & \\ -C & -N- \\ & \end{array}$	284	0.147

③ 键角 共价键具有方向性，一个原子和另外两个原子所形成的键之间的夹角即为键角 (bond angle)。根据键长和键角，可了解分子中各个原子的排列情况和分子的极性。

④ 键的极性 共价键的极性是指两原子间电子云的不对称分布。极性大小取决于成键原子电负性的差。多原子分子的极性状态是各原子电负性的矢量和。常见共价键极性大小的顺序是



在外界电场的影响下，共价键的极性会发生改变。这种由于外界电场作用引起共价键极性改变的现象称为键的极化。键的极性与极化，同化学键的反应性有密切关系。

⑤ 配位键对生物分子有特殊意义 配位键 (coordinate bond) 是特殊的共价键，它的共用电子对是由一个原子提供的。在生物分子中，常以过渡元素为电子受体，以化学基团中的 O、N、S、P 等为电子供体，形成多配位络合物。过渡元素都有固定的配位数和配位结构。

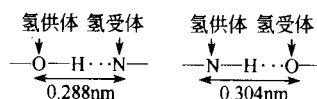
在生物体系中，形成的多配位体，对稳定生物大分子的构象，形成特定的生物分子复合物具有重要意义。由多配位体所产生的立体异构现象，甚至比手性碳所引起的立体异构现象更为复杂。金属元素的络合效应，因能导致配体生物分子内键发生极化，增强其反应性，而与酶的催化作用有关。

(3) 非共价相互作用是生物高层次结构主要作用力

① 非共价作用力对生物体系意义重大 非共价相互作用是生物高层次结构的主要作用力。非共价作用力包括氢键、静电作用力、范德瓦耳斯力和疏水作用力。这些力属于弱作用力，其强度比共价键低一两个数量级。这些力单独作用时，的确很弱，极不稳定，但在生物高层次结构中，许多弱作用力协同作用，往往起到决定生物大分子构象的作用。可以毫不夸张地说，没有对非共价相互作用的理解，就不可能对生命现象有深刻的认识。

各种非共价相互作用结合能的大小也有差别，在不同级别生物结构中的地位也有不同。结合能较大的氢键，在较低的结构级别（如蛋白质的二级结构），较小的尺度间，把氢受体基团与氢供体基团结合起来。结合能较小的范德瓦耳斯力则主要在更高的结构级别、较大的尺度间把分子的局部结构或不同分子结合起来。

② 氢键 氢原子与半径小、电负性大的原子形成共价键时，共用电子对偏离氢原子，使氢原子核几乎裸露出来。当另一个电负性强的原子与之接近时，即可与之结合形成氢键 (hydrogen bond)。



氢键是一种弱作用力，键能只相当于共价键的 $1/30 \sim 1/20$ ($12 \sim 30 \text{ kJ/mol}$)，容易被破坏，并具有一定的柔性，容易弯曲。氢原子与两侧的电负性强的原子呈直线排列时，键能最大，当键角发生 20° 偏转时，键能降低 20% 。氢键的键长比共价键长，比范德瓦耳斯距离短，约为 $0.26 \sim 0.31 \text{ nm}$ 。

氢键对生物体系有重大意义，特别是在稳定生物大分子的二级结构中起主导作用。

③ 范德瓦耳斯力 范德瓦耳斯力是普遍存在于原子和分子间的弱作用力，是范德瓦耳斯引力与范德瓦耳斯斥力的统一。引力和斥力分别和原子间距离的 6 次方和 12 次方成反比。二者达到平衡时，两原子或原子团间保持一定的距离，即范德瓦耳斯距离，它等于两原子范德瓦耳斯半径的和。每个原子或基团都有各自的范德瓦耳斯半径。

范德瓦耳斯力的本质是偶极子之间的作用力，包括定向力、诱导力和色散力。极性基团或分子是永久偶极，它们之间的作用力称为定向力。非极性基团或分子在永久偶极子的诱导