



世纪高等教育环境科学与工程类系列规划教材



# 环境生物化学





赵景联 主编

 **机械工业出版社**  
CHINA MACHINE PRESS

  
配套教师课件



# 21世纪高等教育环境科学与工程类系列规划教材

环境科学导论 第2版	赵景联 等	主编
 大气污染控制工程	童志权	主编
 水污染控制工程	孙体昌 等	主编
环境生态学	石 辉 等	主编
 环境微生物学	殷世学	主编
现代环境工程原理	李永峰 等	主编
现代环境工程材料	李永峰 等	主编
环境工程设计基础	邱贤华 等	主编
环境规划与管理	丁忠浩	主编
 环境监测原理与技术	孙春宝	主编
环境工程概论	曲向荣 等	编
循环经济	曲向荣 等	编著
环境工程CAD 第3版	李 颖 等	编著
声学测量	陈克安 等	编著
清洁生产	曲向荣	主编
环境保护概论	曲向荣	主编
固体废物资源化利用技术	李 颖	主编
环境经济学	李永峰 等	主编
环境工程施工技术与管理	于玲红	主编
环境生物化学	赵景联	主编
环境修复工程	赵景联 等	主编



机工教育微信服务号

ISBN 978-7-111-63714-1

策划编辑◎马军平 / 封面设计◎张静



定价：69.00元

21 世纪高等教育环境科学与工程类系列规划教材

# 环境生物化学

主编 赵景联

参编 何 焯 史小妹 赵 靛 陈 梦

机械工业出版社

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物化学基础理论,促进环境污染治理和整个环境科学的发展。

本书内容由生物化学基础(第1~4章)、现代环境生物化学技术原理(第5章)和典型环境污染物生物净化的生物化学原理(第6~10章)三部分组成。全书共分为10章,内容包括绪论、细胞内的生物分子化学、新陈代谢催化剂——酶化学、细胞内生物分子的新陈代谢、现代环境生物技术原理、水环境污染控制与治理中的生物化学、有害有机物微生物降解中的生物化学、工业污染物微生物治理中的生物化学、污染环境微生物修复的生物化学原理和环境毒理学。

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:机械工业出版社, 2018. 6  
21世纪高等教育环境科学与工程类系列规划教材  
ISBN 978-7-111-63714-1

I. ①环… II. ①赵… III. ①环境化学-生物化学-高等学校-教材  
IV. ①X13

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第200992号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平

责任校对:王明欣 封面设计:张静

责任印制:李昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2020年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·23.5印张·583千字

标准书号:ISBN 978-7-111-63714-1

定价:69.00元

电话服务

网络服务

客服电话:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

010-88379833 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-68326294 金书网:www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版 机工教育服务网:www.cmpedu.com

# 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，该学科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，该学科主要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学科，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，但目前对这方面的内容的探讨多半是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了环境生物化学的问题，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稍显不足。

许多环境工程师被认为是生化工程师，这是因为他们花费大量的时间和精力设计和操作各种利用生物法去除或转化有机和无机污染物的设施。因此，他们所受教育的一个重要方面是生物化学，这样的教育背景在他们理解发生在环境和工程反应器中的外来化学物质的生物转化作用方面就显得更为重要。所以，自 20 世纪末以来，环境生物化学的发展甚为迅速。我国目前已有近三百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骨干课程，但在教学实践中深感相关专业教材的缺乏。为适应该课程的教学需求，编者曾以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《环境生物化学》（化学工业出版社，2007 年）。

近年来，随着科学技术的不断发展，环境科学领域也在不断扩展，研究内容更丰富，涉及更广、更深层次的理论问题和更先进的污染治理技术。特别是我国的高等教育在新时期，正酝酿着一场在教学内容、课程体系，以至教学手段、方式和培养目标方面的重大变革。为适应新时期高等教育的新要求及科学技术发展的需要，及时反映环境生物化学研究的新进展及新技术等，以便使学生用环境生物化学理论、原理、技术分析和解决环境问题，为培养合格的环保事业人才，并为学生后续学习和科研工作打下扎实的基础，我们新编了《环境生物化学》。

本书由西安交通大学赵景联教授主编，何焯副教授、史小妹副教授、赵靓博士、陈梦博士参与编写。

本书在编写过程中参考了相关领域的著作，已在每一章后参考文献列出。在此向所有参考文献的作者致以诚挚的谢意！

由于环境生物化学是一门新兴学科，限于编者的水平，书中难免有不完善之处和错误，恳请读者予以批评指正。

# 目 录

## 前 言

## 第 1 章 绪论 ..... 1

### 1.1 生物化学概述 ..... 1

#### 1.1.1 生物化学研究的主要内容 ..... 1

#### 1.1.2 生物化学与其他科学的关系 ..... 2

#### 1.1.3 生物化学的应用和发展前景 ..... 3

### 1.2 环境生物化学概述 ..... 4

#### 1.2.1 环境生物化学的研究对象与任务 ..... 4

#### 1.2.2 环境生物化学的由来 ..... 4

#### 1.2.3 环境生物化学的学习方法 ..... 5

### 复习题 ..... 5

### 参考文献 ..... 5

## 第 2 章 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 ..... 12

#### 2.1.5 生物分子高层次结构的同一性 ..... 15

### 2.2 糖类化学 ..... 16

#### 2.2.1 糖的概述 ..... 16

#### 2.2.2 单糖 ..... 17

#### 2.2.3 寡糖 ..... 28

#### 2.2.4 多糖 ..... 30

### 2.3 脂类化学 ..... 34

#### 2.3.1 脂类概述 ..... 34

#### 2.3.2 单脂 ..... 35

#### 2.3.3 复合脂 ..... 39

#### 2.3.4 非皂化脂 ..... 43

### 2.4 蛋白质化学 ..... 46

#### 2.4.1 蛋白质概述 ..... 46

#### 2.4.2 氨基酸化学 ..... 49

#### 2.4.3 蛋白质的分子结构 ..... 57

#### 2.4.4 蛋白质的重要性质 ..... 61

#### 2.4.5 蛋白质的分离提纯 ..... 65

### 2.5 核酸化学 ..... 66

#### 2.5.1 核酸概述 ..... 66

#### 2.5.2 核苷与核苷酸 ..... 69

#### 2.5.3 核酸的结构 ..... 72

#### 2.5.4 核酸的物化性质 ..... 77

### 复习题 ..... 79

### 参考文献 ..... 80

## 第 3 章 新陈代谢催化剂——酶化学 ..... 81

### 3.1 酶的概述 ..... 81

#### 3.1.1 酶的概念 ..... 81

#### 3.1.2 酶催化作用的特点 ..... 81

#### 3.1.3 酶的组成 ..... 83

#### 3.1.4 酶的分类 ..... 85

#### 3.1.5 酶的命名法 ..... 87

### 3.2 酶的化学本质及结构功能特点 ..... 88

#### 3.2.1 酶的一级结构与催化功能的关系 ..... 88

#### 3.2.2 酶的活性与其高级结构的关系 ..... 90

### 3.3 酶作用的机制 ..... 92

#### 3.3.1 酶催化作用的实质——降低分子活化能 ..... 92

#### 3.3.2 酶的工作方式——中间络合物学说 ..... 93

#### 3.3.3 酶作用专一性的机制——诱导契合学说 ..... 94

#### 3.3.4 酶作用高效性的机制——共价催化与酸碱催化 ..... 95

### 3.4 酶促反应的动力学 ..... 96

#### 3.4.1 酶促反应的速度 ..... 97

#### 3.4.2 影响酶促反应速度的因素 ..... 97

### 3.5 酶活力测定 ..... 104

### 复习题 ..... 106

### 参考文献 ..... 106



<b>第4章 细胞内生物分子的新陈代谢</b> .....	107	5.3.5 重组体的构建 .....	222
4.1 新陈代谢概论 .....	107	5.3.6 重组体 DNA 导入受体细胞 .....	224
4.1.1 同化作用和异化作用 .....	107	5.3.7 重组体的筛选 .....	226
4.1.2 中间代谢 .....	108	5.3.8 DNA 序列分析 .....	231
4.1.3 自由能与高能化合物 .....	109	5.3.9 外源基因在宿主中的表达 .....	234
4.2 糖分解代谢 .....	111	5.3.10 基因工程在环境污染治理中的 应用 .....	236
4.2.1 糖代谢概述 .....	111	5.4 微生物细胞工程 .....	239
4.2.2 多糖和双糖的分解 .....	112	5.4.1 细胞工程概述 .....	239
4.2.3 葡萄糖的分解 .....	115	5.4.2 微生物细胞工程 .....	241
4.3 脂肪分解代谢 .....	130	5.4.3 细胞融合构建环境工程菌 .....	244
4.3.1 脂肪的酶促水解 .....	130	5.5 发酵工程 .....	247
4.3.2 脂肪的分解代谢 .....	131	5.5.1 发酵工程概述 .....	247
4.4 蛋白质代谢 .....	134	5.5.2 发酵工程的内容 .....	247
4.4.1 蛋白质代谢概述 .....	134	5.5.3 发酵过程及其控制 .....	250
4.4.2 蛋白质的酶解 .....	134	5.5.4 发酵生物反应器 .....	255
4.4.3 氨基酸分解的共同途径 .....	136	5.5.5 发酵工程在环境污染治理中的 应用 .....	257
4.4.4 氨基酸分解产物的代谢途径 .....	139	复习题 .....	258
4.5 核酸分解代谢 .....	141	参考文献 .....	259
4.5.1 核酸的分解 .....	141	<b>第6章 水环境污染控制与治理中的     生物化学</b> .....	260
4.5.2 核苷酸的降解 .....	142	6.1 污、废水生物控制与治理生物化学 .....	260
4.5.3 嘌呤的分解 .....	142	6.1.1 水的生物化学处理概念 .....	260
4.5.4 嘧啶的分解 .....	144	6.1.2 好氧生物处理生物化学 .....	260
4.6 生物氧化与能量代谢 .....	145	6.1.3 厌氧生物处理生物化学 .....	266
4.6.1 生物氧化概述 .....	145	6.2 污、废水深度处理生物化学 .....	270
4.6.2 生物氧化体系和酶类 .....	147	6.2.1 生物脱氮生物化学 .....	270
4.6.3 生物氧化过程中能量的转移和 利用 .....	153	6.2.2 生物除磷生物化学 .....	278
复习题 .....	157	复习题 .....	282
参考文献 .....	157	参考文献 .....	283
<b>第5章 现代环境生物技术原理</b> .....	158	<b>第7章 有害有机物微生物降解中的     生物化学</b> .....	284
5.1 概述 .....	158	7.1 微生物降解概述 .....	284
5.2 酶工程基本原理 .....	161	7.1.1 微生物降解的基本概念 .....	284
5.2.1 酶的生产 .....	161	7.1.2 微生物降解有机污染物的作用 .....	286
5.2.2 酶的提取与分离纯化 .....	162	7.1.3 污染物生物降解的动力学 .....	288
5.2.3 酶分子修饰 .....	173	7.2 典型有害有机污染物微生物降解的 生物化学 .....	291
5.2.4 酶固定化 .....	176	7.2.1 卤代烃类微生物降解的生物 化学 .....	291
5.2.5 酶反应器 .....	185	7.2.2 农药微生物降解的生物化学 .....	297
5.2.6 酶在污染治理中的应用 .....	196		
5.3 基因工程基本原理 .....	200		
5.3.1 基因工程概述 .....	200		
5.3.2 目的基因的获得 .....	203		
5.3.3 基因工程载体 .....	208		
5.3.4 基因工程工具酶 .....	216		

7.2.3 洗涤剂微生物降解的生物 化学 .....	299	<b>第9章 污染环境微生物修复的生物 化学原理</b> .....	329	
7.2.4 石油污染物微生物降解的生物 化学 .....	300		9.1 污染环境微生物修复概念 .....	329
复习题 .....	306		9.2 污染环境微生物修复的机理 .....	329
参考文献 .....	306		9.2.1 用于生物修复的微生物 .....	329
<b>第8章 工业污染物微生物治理中的 生物化学</b> .....	307		9.2.2 微生物对有机污染物的修复 机理 .....	331
8.1 造纸废水微生物治理中的生物 化学 .....	307		9.3 污染环境微生物修复中的生物化学 原理 .....	337
8.1.1 造纸废水概述 .....	307		9.3.1 土壤污染微生物修复中的生物 化学原理 .....	337
8.1.2 造纸废水微生物处理中的生物 化学法原理 .....	307		9.3.2 地下水污染修复中的生物化学 原理 .....	341
8.2 染料废水微生物治理中的生物 化学 .....	312		9.3.3 大气污染的微生物修复原理 .....	343
8.2.1 染料废水概述 .....	312		9.3.4 固体废弃物生物处理中的生物 化学原理 .....	347
8.2.2 染料废水好氧生物处理中的生物 化学原理 .....	312		复习题 .....	351
8.2.3 染料废水厌氧生物处理中的生物 化学原理 .....	314		参考文献 .....	351
8.3 冶金废水微生物治理中的生物化学 ..	315		<b>第10章 环境毒理学</b> .....	352
8.3.1 冶金废水概述 .....	315		10.1 环境毒理学概述 .....	352
8.3.2 含酚废水微生物治理中的生物 化学原理 .....	315		10.1.1 环境毒理学概念 .....	352
8.3.3 含氰废水微生物治理中的生物 化学原理 .....	316		10.1.2 有毒化学物质 .....	352
8.3.4 酸性废水微生物治理中的生物 化学原理 .....	318		10.2 有毒化学物质在生物体内的转运和 代谢 .....	354
8.3.5 重金属废水微生物治理中的生物 化学原理 .....	318		10.2.1 有毒化学物质进入人体的 途径 .....	354
8.4 燃料微生物脱硫预防治理中的生物 化学 .....	320	10.2.2 有毒化学物质在体内的分布 .....	354	
8.4.1 燃料中的硫概述 .....	320	10.2.3 有毒化学物质代谢 .....	355	
8.4.2 燃料微生物脱硫的生物化学 机理 .....	322	10.2.4 有毒化学物质干扰酶功能的 机制 .....	356	
8.5 化石燃料微生物脱氮预防治理中的 生物化学 .....	326	10.3 环境有毒物化学 .....	358	
8.5.1 化石燃料中的芳香氮化合物 .....	326	10.3.1 有毒物剂量和相对毒性 .....	358	
8.5.2 含氮污染物的微生物脱氮的生物 化学机理 .....	327	10.3.2 有毒物联合作用 .....	359	
复习题 .....	328	10.3.3 严重致毒作用机制 .....	360	
参考文献 .....	328	10.4 环境有毒物质的生物化学效应 .....	364	
		10.4.1 金属有毒物质的生物化学 效应 .....	364	
		10.4.2 有毒无机化合物的生物化学 效应 .....	366	
		10.4.3 农药的生物化学效应 .....	368	
		复习题 .....	369	
		参考文献 .....	370	

# 第 1 章

# 1

## 绪 论

### 1.1 生物化学概述

生物化学 (Biochemistry) 是介于生物与化学之间的一门交叉学科。它采用化学的理论和方法来研究生命现象, 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 (Metabolism) 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。按研究对象分类, 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或植物, 而是一般生物, 则称普通生物化学。如果以生物 (特别是动物) 的不同进化阶段的化学特征 (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。以生理为研究对象则称生理化学。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。

#### 1.1.1 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 (静态生化)、研究体内物质代谢 (动态生化)、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, 每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少的物质。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的组成规律, 从而构成能够体现多种生物功能的生物学结构 (Biological structure)。

蛋白质和核酸是实现生命活动的主要物质基础, 而且相对分子质量很大, 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 (Component molecules)。这些构件分子除构成生物大分子发挥作用外,



它们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，也是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，为人类做出了重大贡献。

## 2. 物质代谢及其调控

生物体不断地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有规律的化学反应，这些过程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，以保证满足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中间代谢 (Intermediary metabolism)。中间代谢的化学反应绝大部分都在细胞内进行。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作合成代谢 (Anabolism)，反之，由大分子物质变成小分子物质的过程叫作分解代谢 (Catabolism)。从生物学意义上来说，从外界吸收来的物质转变成体内组成成分的过程叫作同化作用 (Assimilation)，反之，使体内组成成分转变成可排出体外成分的过程叫作异化作用 (Disassimilation)。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，将这种连锁反应叫作代谢途径 (Metabolic pathway)。这些反应是在多种酶的催化下进行的。一个细胞内有近两千种酶，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？是通过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，这是在一个细胞内各代谢途径有序进行的基础。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。一切生命现象都是在具体的物质结构和物质代谢的基础上体现出来的。

1953 年，美国科学家 Watson 和英国科学家 Crick 发现了 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。几乎与此同时，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。后来，科学家们又相继阐明 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。

### 1.1.2 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,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。

### 1.1.3 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化角度和用生化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科学的重要手段之一。

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、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、生物碱及其他化合物在植物体内的合成规律,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。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

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。

从狭义上讲，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。它是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。

### 1.2.1 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，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以及有毒物质的生物化学效应，这是环境医学及毒理力学研究的基础。

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、原理介绍和讨论目前这一领域的最新成果，有助于读者对这方面知识的全面了解，有助于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。

### 1.2.2 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。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。但这方面的内容大都是单纯从化学或生物学的角度讨论的，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。

西安交通大学从2000年起已将环境生物化学作为环境工程和环境科学专业本科生、研究生学位必修课,国内近200余所院校也相继在环境科学和工程专业开设了环境生物化学,为了满足教学需要,2007年我们曾主持编写了《环境生物化学》,首次定义了环境生物化学及其研究内容,从而形成了独立的环境生物化学体系。

### 1.2.3 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,在体内就不一定能照样进行,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(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] 赵景联. 环境生物化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] 沈同. 生物化学: 上册 [M]. 2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 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1980.
- [4] 郑集. 普通生物化学 [M]. 3版. 北京: 人民教育出版社, 1990.
- [5] 王建龙, 文湘华. 现代环境生物技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [6] 孔繁翔. 环境生物学 [M]. 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 (Organic compound)。典型的细胞含有  $10^4 \sim 10^5$  种生物分子，其中近半数是小分子，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，相对分子质量很大，一般在  $10^4$  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，它们的相对分子质量都很大，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

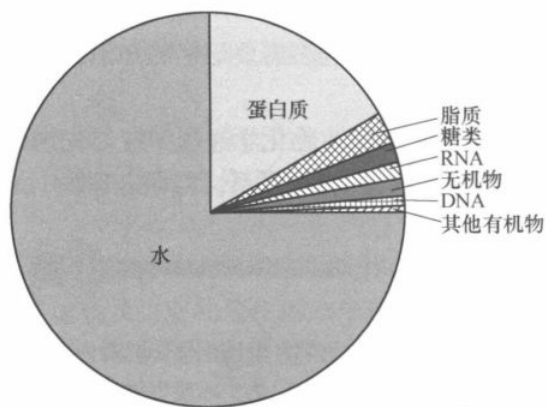


图 2-1 生命物体的物质组成

注：水占 65% ~ 75%；蛋白质占 10% ~ 15%；脂质占 3% ~ 7%；糖类占 2% ~ 4%；核酸占 3% ~ 5%；无机物占 2% ~ 3%；其他有机物 < 1%。



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) 生物分子都具有专一的生物功能 糖能提供能量,相对分子质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形式专一的催化、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。

(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。有些可以叫作基本元素,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(Bioelement)。

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Cl5种元素在生物体内虽然较少,但也是必需的。Mn、Fe、Co、Cu、Zn、Se、I、Cr、Si、V、F、B、Mo、Sn、Ni和Br16种微量元素(Microelement)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,所以构成生物体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个元素中就有21个元素是动物生活必需的,这样就使生物体有较轻的重量。



图2-2 生物分子的层次

注:在国际计量制中用 Dalton (缩写 Da) 表示原子质量单位, $^{13}\text{C}$  原子量的  $1/12$  称为  $1\text{Da}$ 。  
 $1\text{Da} = 1.6905655 \times 10^{-27}\text{kg}$ 。



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，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 所示为生物分子中碳、氢、氧、氮、硫、磷元素的含量。

(1) 碳、氢是生物分子的主体元素 碳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。碳原子的原子核对其价电子有一定的控制能力，既难得到电子，也难失去电子，最适合形成稳定的共价键。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。

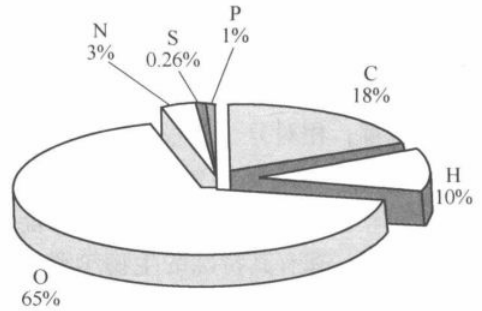


图 2-3 生物分子中碳、氢、氧、氮、硫、磷元素的含量

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酸酯键是高能键。

### 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	钒	23	铜	29	碘	53
硅	14	铬	24	锌	30		

生物体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。不同的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。过渡元素的络合效应在



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 1/3 以上的酶含有金属元素，其中仅含锌的酶就有百余种。

$\text{Fe}^{2+}$  ( $\text{Fe}^{3+}$ ) 和  $\text{Cu}$  ( $\text{Cu}^{2+}$ ) 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，4 个锰原子构成一个电荷累积器，可以累积失去 4 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. 常量离子具有电化效应

$\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等常量离子在生物体的体液中含有较高，具有电化效应。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噬细胞，后者能诱导肿瘤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，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降低，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、键角和极性等参数来描述，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。