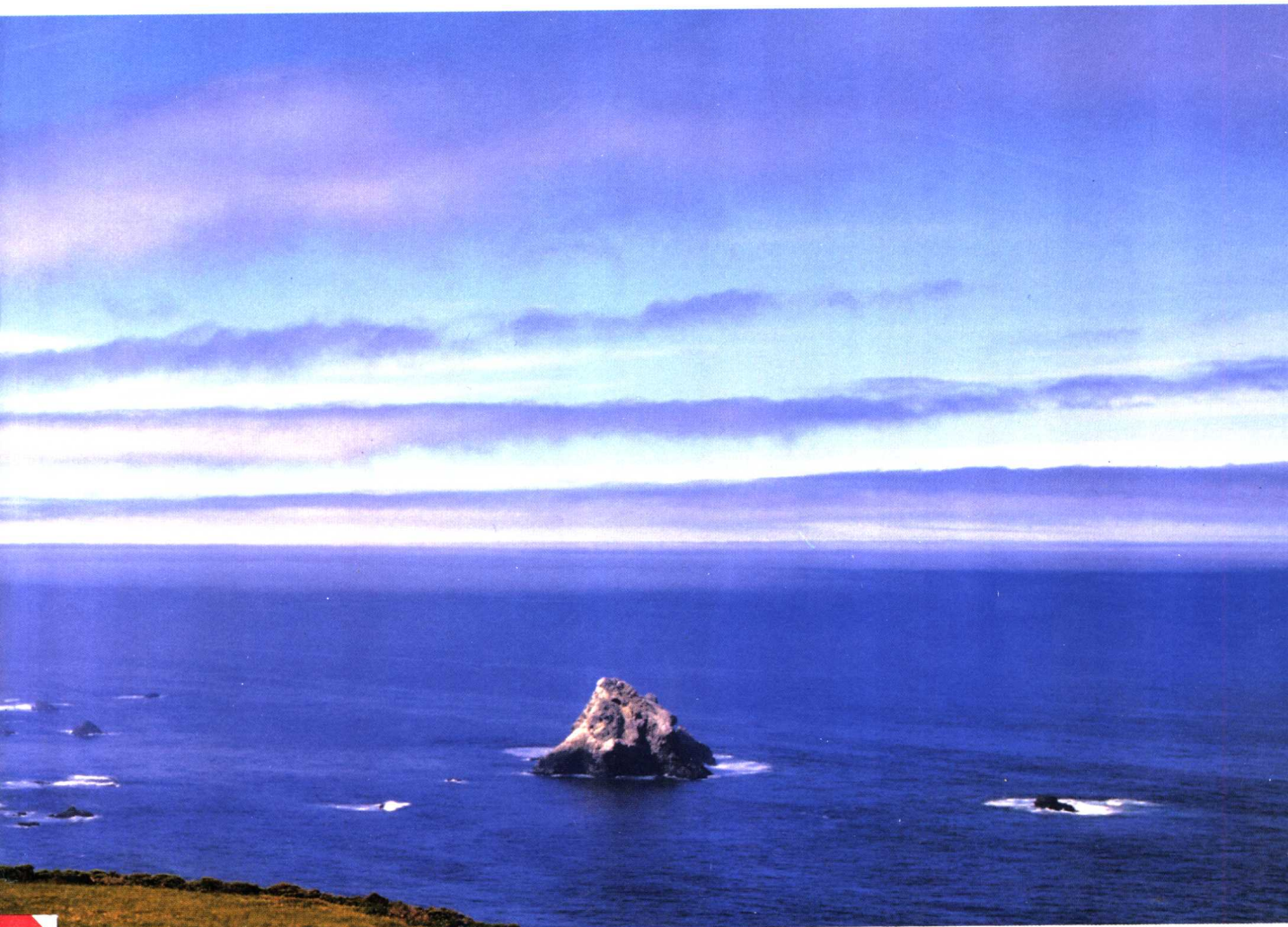


—环境生物技术—

周少奇 · 编著



 科学出版社
www.sciencep.com

环境生物技术

Environmental Biotechnology

周少奇 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

环境生物技术是现代生物技术和环境科学与工程紧密结合而发展起来的新兴交叉学科, 已具有较完整的学科体系。

本书共分 12 章。书中首先讨论了环境生物技术的产生、学科体系与结构, 然后按学科体系介绍了其生物学基础(包括微生物学基础、酶学基础、生态学基础)与理论基础(生化反应计量学、生化反应动力学、生化反应热力学), 再重点介绍了环境污染治理基因工程技术、环境污染生物治理技术、环境污染生物修复技术、环境污染预防生物技术等, 内容涉及废水好氧生物处理、废水厌氧生物处理、生物脱氮与生物除磷、固体废物生物处理、有机废气生物处理、水体与土壤的生物修复、环境生物材料(生物絮凝剂、生物吸附剂、生物可降解塑料、生物表面活性剂)及生物农药等, 既有理论分析, 也有国内外最新研究进展与发展趋势的介绍。

本书可作为高等院校环境工程及相关专业研究生或高年级本科生的教材或教学参考书, 也可供从事环境工程、生物工程及相关领域的工程技术人员、科研设计人员及管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

环境生物技术/周少奇编著. —北京: 科学出版社, 2003

ISBN 7-03-011039-0

I. 环… II. 周… III. 环境生物学 IV. X17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 106802 号

策划编辑: 刘俊来/文案编辑: 彭克里 张 臻/责任校对: 包志虹

责任印制: 安春生/封面设计: 陈 敬

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>

西康印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年7月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2003年7月第一次印刷 印张: 22

印数: 1—3 000 字数: 507 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

前 言

18世纪60年代工业革命开创的工业文明,至20世纪70年代达到鼎盛时期并走向衰落。到20世纪末,人类开始出现了人口老龄化,第一次出现了自然资源的全面紧缺,第一次出现了耕地障碍,环境污染与环境危机——特别是生态危机、水危机等已成为全球关注的焦点之一。另一方面,工业革命以来,科学技术得到了迅猛发展,到20世纪末期,整个科学技术的发展除了整体化和高度分化两大趋势外,还存在生态化趋势。这是社会经济走向可持续发展,人类社会由工业文明转向绿色文明的必然要求和重要表现,也是环境工程学科与其他科学技术相结合、相互渗透和发展的重要表现。在这样的大背景下,环境工程与现代生物技术相结合,形成了环境生物技术这样一门新兴的交叉学科,对环境高新技术体系的形成与发展有重要作用。

环境生物技术开始于20世纪初期,以活性污泥法和厌氧消化法等为主要代表。经过最近20多年的迅速发展,环境生物技术已基本形成了自己独立的学科体系。总的来说,环境生物技术主要包括4个大的方面:①利用微生物(或生态系统)对有机污染物(包括液态、气态、固态3种形式)等进行处理以最大限度地减少污染物排放的环境生物治理技术与环境污染预防生物技术(包括生态农业、清洁生产、环境友好材料等);②利用微生物(或生态系统)对已污染的环境(水体、土壤等)进行整治的生物修复技术;③利用生物技术生产有用资源(包括环境生物材料、生物能源、生物冶金等)的环境生物资源化技术;④对环境污染物及环境中微生物等进行监测或检测的环境监测生物技术与环境检测生物技术。当前,环境生物技术还在迅速发展与不断完善之中。

为了适应环境工程学科的新发展,4年前我们开始在华南理工大学环境工程学科研究生中开设《环境生物技术》选修课,得到了热烈响应。本书是以课程大纲和讲义为基础,结合自己多年的科研成果,并参考国内外有关书籍和最新进展编著而成的。本书以环境生物技术本身的学科体系为线索,将内容分为两大部分:第一部分是环境生物技术的生物学基础与理论基础;第二部分为环境生物技术的技术体系。本书对四大技术,即环境污染治理基因工程技术、环境污染生物治理技术、环境污染生物修复技术、环境污染预防生物技术,进行了较系统详细的介绍。本书承蒙中国工程院院士、清华大学钱易教授审阅指导,谨此深表谢忱!作者衷心感谢历年来给予指导和帮助的各位导师和老师!衷心感谢科学出版社林鹏副总编及刘俊来先生对本书出版给予的支持和帮助!感谢广东省自然科学基金会对有关电子计量学研究项目的资助(980598,020959)。

由于编者水平有限,书中错误与缺点在所难免,敬请各位读者和同行专家批评指正。

周少奇

2003年1月

目 录

前言

第 1 章 环境生物技术引论	(1)
1.1 生物技术的学科体系与发展简史	(1)
1.1.1 生物技术的定义	(1)
1.1.2 生物技术的学科体系	(1)
1.1.3 生物技术发展简史	(3)
1.1.4 生物技术的高技术特征与应用	(8)
1.2 环境生物技术的学科体系	(10)
1.2.1 环境生物技术的定义	(10)
1.2.2 环境生物技术的技术体系与学科结构	(10)
1.3 本书的主要内容与结构	(13)
参考文献	(14)
第 2 章 环境生物技术的生物学基础	(15)
2.1 微生物学基础知识	(15)
2.1.1 微生物的类群	(15)
2.1.2 微生物的营养	(27)
2.1.3 微生物的代谢	(30)
2.2 酶学基础知识	(36)
2.2.1 酶的分类	(36)
2.2.2 酶催化反应的特点	(37)
2.2.3 酶蛋白的结构与功能	(38)
2.2.4 酶与细胞的固定化技术	(39)
2.3 生态学基础知识	(41)
2.3.1 生态系统及其基本特性	(41)
2.3.2 生态系统的基本结构与主要功能	(43)
2.3.3 生态系统的环境功能与自净作用	(48)
参考文献	(52)
第 3 章 环境生物技术的理论基础	(53)
3.1 生化反应计量学	(53)
3.1.1 原子矩阵法	(53)
3.1.2 电子流守恒原理与电子计量学方法	(55)
3.1.3 好氧过程的生化反应计量学	(56)
3.1.4 厌氧过程的生化反应计量学	(61)
3.2 生化反应动力学	(67)

3.2.1	反应速度与反应级数	(67)
3.2.2	酶促反应动力学	(69)
3.2.3	分批培养生化反应动力学	(72)
3.2.4	废水生物处理生化反应动力学	(73)
3.2.5	生物膜生化反应动力学	(80)
3.3	生化反应热力学	(85)
3.3.1	热力学第三定律	(85)
3.3.2	反应热力学与计量学关系	(86)
	参考文献	(88)
第 4 章	环境污染治理基因工程技术	(90)
4.1	细胞学说与分子生物学	(90)
4.1.1	细胞学说与基因学说	(90)
4.1.2	遗传的分子基础	(93)
4.1.3	DNA 重组技术	(96)
4.2	细胞融合技术与环境污染治理	(100)
4.2.1	细胞融合技术	(100)
4.2.2	细胞融合技术构建环境工程菌举例	(102)
4.3	基因工程与环境污染治理	(103)
4.3.1	环境工程微生物的分子生物学研究	(103)
4.3.2	环境工程基因工程菌的研究开发	(106)
4.3.3	非生物污染物质的基因工程菌开发	(108)
4.4	基因工程技术的安全性问题	(109)
	参考文献	(109)
第 5 章	废水好氧生物处理技术	(111)
5.1	活性污泥法的产生	(111)
5.1.1	活性污泥法的产生	(111)
5.1.2	活性污泥法的反应机理与基本流程	(112)
5.1.3	活性污泥法的工艺类型	(113)
5.1.4	活性污泥法的动力学与设计运行	(118)
5.2	生物膜法	(119)
5.2.1	生物膜法的产生与特点	(119)
5.2.2	生物膜反应器的类型	(120)
5.2.3	生物滤池法	(121)
5.2.4	生物转盘法	(129)
5.2.5	生物接触氧化法	(132)
5.2.6	生物流化床	(134)
5.3	好氧生物处理技术进展	(136)
5.3.1	好氧过程曝气技术进展	(136)
5.3.2	吸附-生物降解污水生物处理技术	(139)

5.3.3	氧化沟污水处理生物技术	(141)
5.3.4	序批式反应器污水生物处理技术	(147)
	参考文献	(152)
第 6 章	废水厌氧生物处理技术	(154)
6.1	废水厌氧生物处理的微生物学与生化反应原理	(154)
6.1.1	厌氧微生物与厌氧生物处理过程	(154)
6.1.2	厌氧生物处理过程的生化反应计量方程式	(156)
6.1.3	厌氧生物处理过程的生化反应动力学	(156)
6.2	厌氧生物处理工艺的特点与影响因素	(157)
6.2.1	废水厌氧处理技术的产生与发展	(157)
6.2.2	废水厌氧生物处理工艺的特点	(157)
6.2.3	影响废水厌氧生物处理的环境因素	(159)
6.3	厌氧生物反应器与工艺	(166)
6.3.1	厌氧生物反应器类型	(166)
6.3.2	厌氧消化池	(167)
6.3.3	厌氧接触工艺	(171)
6.3.4	厌氧滤池	(172)
6.3.5	上流式厌氧污泥床	(175)
6.3.6	厌氧生物处理技术的新发展	(179)
6.3.7	废水厌氧生物处理的后处理工艺	(185)
	参考文献	(186)
第 7 章	废水生物脱氮除磷技术	(188)
7.1	生物脱氮过程和原理	(188)
7.1.1	氨化作用	(189)
7.1.2	硝化作用	(190)
7.1.3	反硝化作用	(191)
7.1.4	反硝化反应动力学	(191)
7.2	生物除磷原理	(192)
7.2.1	厌氧放磷	(193)
7.2.2	好氧聚磷	(194)
7.2.3	聚磷菌及其作用特性	(194)
7.3	生物脱氮除磷工艺	(195)
7.3.1	生物脱氮工艺	(195)
7.3.2	生物除磷工艺	(197)
7.3.3	废水同步除磷脱氮工艺	(199)
7.4	生物脱氮新技术	(203)
7.4.1	短程硝化-反硝化	(203)
7.4.2	同时硝化-反硝化	(205)
7.4.3	厌氧氨氧化	(207)

7.4.4 其他生物脱氮新技术	(209)
参考文献	(211)
第 8 章 固体废物处理处置生物技术	(214)
8.1 固体废物处理处置与资源化方法概论	(214)
8.2 固体废物的堆肥法生物处理技术	(216)
8.2.1 堆肥法技术发展概况	(216)
8.2.2 生物固体的堆肥化处理	(217)
8.3 固体废物的填埋处置技术	(226)
8.3.1 固体废物的填埋方法与类型	(226)
8.3.2 填埋场反应器生态系统的特征	(227)
8.3.3 垃圾填埋渗滤水的处理技术	(229)
参考文献	(233)
第 9 章 有机废气生物处理技术	(234)
9.1 有机废气的类型与特点	(234)
9.1.1 恶臭气体的分类与危害	(234)
9.1.2 臭味的检测与去除效率	(235)
9.2 有机废气生物处理的基本原理	(236)
9.2.1 有机废气治理的基本方法	(236)
9.2.2 有机废气生物处理法的基本原理	(237)
9.3 有机废气生物处理的方法与工艺	(240)
9.3.1 生物滤池法	(240)
9.3.2 生物滴滤法	(243)
9.3.3 生物洗涤法	(244)
9.3.4 生物曝气吸收法	(246)
9.4 有机废气生物处理技术的应用	(246)
9.4.1 有机废气的净化	(246)
9.4.2 恶臭去除	(247)
9.4.3 SO ₂ 的生物处理	(248)
9.4.4 NO _x 的生物处理	(248)
9.4.5 废气生物处理技术的发展展望	(249)
参考文献	(250)
第 10 章 环境污染生物修复技术	(252)
10.1 生物修复技术与生物恢复	(252)
10.1.1 生物修复技术的基本概念	(252)
10.1.2 生物修复技术的分类	(253)
10.1.3 应用生物修复的条件与优点	(253)
10.1.4 生物修复的影响因素与基本措施	(254)
10.2 生物修复技术的主要工艺	(257)
10.2.1 原位生物修复工艺	(257)

10.2.2	异位生物修复工艺	(260)
10.3	水体污染的生物修复技术	(262)
10.3.1	地下水污染的特征与危害	(262)
10.3.2	地下水污染的生物修复技术	(264)
10.3.3	地表水污染的特征与危害	(266)
10.3.4	地表水污染的生物修复技术	(268)
10.4	土壤污染的生物修复技术	(272)
10.4.1	土壤污染的特征与危害	(272)
10.4.2	土壤污染的堆肥法生物修复技术	(273)
10.4.3	土壤污染的植物修复技术	(274)
10.4.4	土壤中多环芳烃污染的生物修复技术	(277)
10.4.5	土壤中含氯有机物的生物修复技术	(279)
10.5	石油污染的生物修复技术	(283)
10.5.1	微生物对石油降解的基本原理	(283)
10.5.2	石油污染生物修复技术及应用	(285)
	参考文献	(287)
第 11 章	环境生物材料	(289)
11.1	微生物絮凝剂	(289)
11.1.1	微生物絮凝剂的概念	(289)
11.1.2	微生物絮凝剂的产生与分离纯化	(292)
11.1.3	微生物絮凝剂的絮凝机理	(296)
11.1.4	微生物絮凝剂的应用	(298)
11.1.5	微生物絮凝剂的研究趋势	(300)
11.2	可生物降解塑料	(301)
11.2.1	可生物降解塑料的种类	(301)
11.2.2	PHA 的合成与生产	(302)
11.2.3	生物降解塑料的降解机理	(309)
11.3	生物吸附剂	(311)
11.3.1	生物吸附剂的种类	(311)
11.3.2	生物吸附剂的制备	(313)
11.3.3	生物吸附剂的吸附机理	(315)
11.3.4	生物吸附剂的应用	(316)
11.4	生物表面活性剂	(317)
11.4.1	生物表面活性剂及其分类	(317)
11.4.2	生物表面活性剂的性质	(318)
11.4.3	生物表面活性剂的合成	(319)
11.4.4	生物表面活性剂的应用	(322)
	参考文献	(324)
第 12 章	环境污染预防生物技术	(326)

12.1	农药环境污染与生物农药开发概述	(326)
12.1.1	农药的分类与发展概况	(326)
12.1.2	农药的作用及其对环境的污染	(327)
12.1.3	生物农药的分类及其特点	(328)
12.2	微生物农药	(329)
12.2.1	细菌杀虫剂	(329)
12.2.2	病毒杀虫剂	(332)
12.2.3	真菌杀虫剂	(333)
12.2.4	线虫杀菌剂	(334)
12.2.5	拮抗微生物	(335)
12.2.6	微生物除草剂	(336)
12.3	农用抗生素	(337)
12.4	源于植物的生理活性物质	(338)
12.4.1	具杀虫作用的植物次生物质	(338)
12.4.2	生物碱对害虫的作用机制	(338)
12.4.3	生物碱杀虫剂的开发前景	(339)
12.5	昆虫生长调节剂	(339)
12.5.1	几丁质合成抑制剂	(339)
12.5.2	保幼激素化合物	(340)
12.5.3	蜕皮激素化合物	(340)
12.5.4	其他昆虫生长调节剂	(340)
12.6	作物病虫害的生物防治技术	(341)
	参考文献	(342)

第 1 章 环境生物技术引论

1.1 生物技术的学科体系与发展简史

1.1.1 生物技术的定义

生物技术 (biotechnology) 是一门既有悠久历史又有崭新内容的科学技术和生产工艺, 曾有不少学术组织和学者对生物技术赋以各种定义。“生物技术”一词最初由匈牙利工程师 Karl Ereky 于 1917 年提出, 其涵义是指用甜菜作为饲料大规模养猪, 利用生物将原材料转变为产品。

1981 年, 国际纯粹及应用化学联合会将生物技术定义为“将生物化学、生物学、微生物学和化学工程应用于工业生产过程 (包括医药卫生、能源及农业产品) 及环境保护的技术”。

1982 年, 国际经济合作及发展组织提出了当时能广泛接受的生物技术定义, 即“生物技术是应用自然科学及工程学原理, 依靠生物作用剂 (biological agent) 的作用将物料进行加工以提供产品为社会服务的技术”。这里所谓的生物作用剂可以是酶、整体细胞或各细胞生物体, 一般也称生物催化剂。

1986 年, 我国国家科委制订《中国生物技术政策纲要》时, 将生物技术定义为: 以现代生命科学为基础, 结合先进的工程技术手段和其他基础学科的科学原理, 按照预先的设计改造生物体或加工生物原料, 为人类生产出所需产品或达到某种目的。这里, 先进的工程技术手段指基因工程、酶工程、细胞工程、发酵工程等新技术; 生物体包括动物、植物、微生物品系; 生物原料包括生物体的一部分或生物生活过程中所能利用的物质, 诸如各种有机物、某些无机物乃至矿石; 为人类生产出所需产品包括粮食、医药、食品、能源、化工原料、金属及其他材料等; 某种目的则包括疾病预防、诊断与治疗, 环境污染物监测、环境污染治理与控制、环境修复等。实际上, 这一定义已基本反映了现代生物技术的学科内涵。

1.1.2 生物技术的学科体系

1. 生物技术的多学科性

1953 年, 美国生物学家沃森 (D. J. Watson) 和英国物理学家克里克 (F. H. C. Crick) 在 *Nature* 杂志上发表了关于 DNA 双螺旋结构的论文, 标志着分子生物学的诞生, 并为后来以 DNA 重组为主要手段的基因工程奠定了基础。

1973 年, 美国加利福尼亚大学的 Herber Boyer 教授和斯坦福大学的 Stanley Cohen 教授合作进行了第一次有目的的基因重组实验, 推动了现代生物技术的产生。

现代生物技术是一门多学科相互交叉、渗透的新兴的综合性学科。它涉及的学科主

要有生物学（包括生物化学、分子生物学、微生物学、细胞学、遗传学、免疫学、生理学等）、化学（包括有机化学、物理化学、分析化学等）、工程学（包括化学工程、机械工程、电子工程、控制工程、环境工程、医学工程等）、医学、药学、营养学、农学、环境学、生态学等。

这些学科中，既有基础理论学科，又有技术学科，通过相互交叉、渗透、综合形成了现代生物技术的学科体系——基因工程、酶工程、细胞工程、发酵工程、蛋白质工程、生化工程等，并通过广泛应用而形成现代生物技术的各个分支学科。

2. 现代生物技术的学科结构

现代生物技术的学科结构包括3个方面：现代生物技术的理论、技术基础；现代生物技术本身包含的核心技术与关键技术；现代生物技术的分支学科。它们三者之间具有内在的联系，体现了各学科的交叉与渗透，因而具有一定的学科结构。有人将现代生物技术的学科结构形象地以生物技术树形图表示，如图1-1所示。

现代生物技术的学科结构也可以用表1-1表示。

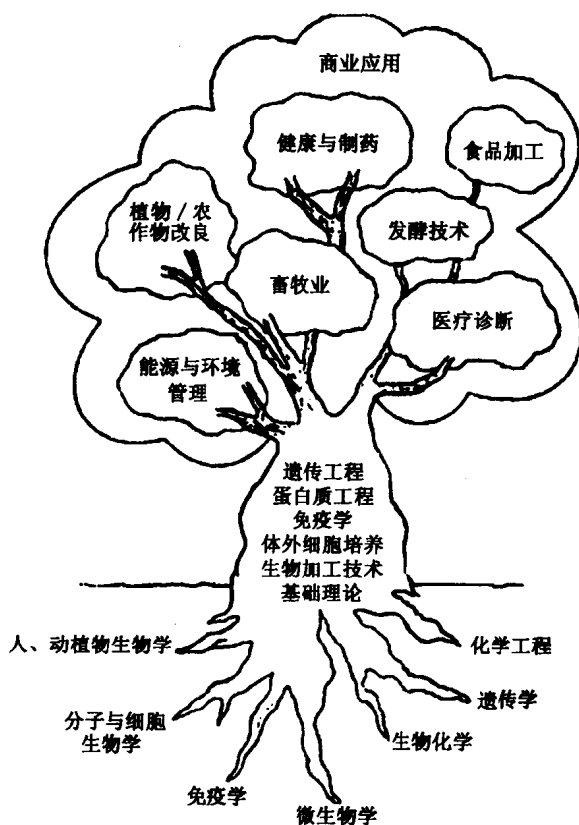


图 1-1 生物技术树形图

表 1-1 现代生物技术的学科组成与结构

科学技术基础 (来源)		技术组成	分支学科与应用领域
科学基础	技术基础		
分子生物学	化学工程	基因工程	农业生物技术
微生物学	机械工程	细胞工程	医药生物技术
植物学	电子工程	酶工程	食品生物技术
生物化学	系统工程	发酵工程	海洋生物技术
细胞学	控制工程	蛋白质工程	生物技术疫苗
遗传学	医学工程	生化工程	生物技术诊断
免疫学	环境工程		家畜生物技术
生理学	计算机技术		环境生物技术
化学			
医学			
药学			
营养学			
农学			
生态学			
海洋学			

根据科学学的原理，科学的发展取决于社会生产力的发展和制约，但又有其自身的规律性，学科的结构对科学的发展有时也起决定性的作用。另外，科学的发展又表现为不平衡性，学科的结构可以随着学科的发展发生一定的变化。生物技术是在现代科学革命中产生的新兴综合性学科，其各分支学科的发展有不平衡性。尽管目前有的分支领域还比较薄弱，但随着时间的推移，不久的将来就可能成为发展的热点和重点。

1.1.3 生物技术发展简史

一般认为，传统的生物技术可以上溯到古代的酿酒技术。据考古发掘证实，我国在龙山文化（距今 4000~4200 年）时已有酒器出现。所以，生物技术的历史几乎与人类文明的发展史一样源远流长，经历了数千年的发展。有学者将生物技术的发展史分为 4 个发展时期。

1. 古老（传统）生物技术阶段（公元前 6000~17 世纪）

早在石器时代，我国的祖先就掌握了酿酒技术。除了龙山文化的考古实据外，夏代禹王命仪狄酿旨酒、夏代少康（即杜康）造秫酒（公元前 21~公元前 20 世纪）均有文献记载。公元前 221 年，我国人民就能制作酱油、酿醋。公元前 200 年，我国《诗经》中就已提到用厌氧细菌浸渍处理亚麻。国外酿酒的传统则可追溯到更早。公元前 6000 年，古巴比伦人已掌握了啤酒酿造技术。相传埃及在公元前 40~公元前 30 世纪已

开始酿酒，用发酵手段烤制面包。古埃及石刻还显示，古埃及人能对枣椰树进行交叉授粉，以改善果实的质量。另外，泡菜、奶酪、干酪的制作以及面团发酵、粪便和秸秆的沤制、以霉制痲等技术都属于“古老生物技术”的产品或实践。虽然这些原始的生物技术被使用了数千年，但人们并不知道其中的道理。

2. 初期（第一代）生物技术阶段（17世纪~20世纪40年代）

这一阶段以了解了微生物在发酵过程中的作用为标志。发酵过程处于非无菌操作状态，过程较为简单，对生产设备要求不高，规模一般不大。这一时期的产品属于初级代谢产物。

1676年，荷兰人列文虎克（Anton van Leeuwenhoek）制成了显微镜，首次观察到微生物的存在并系统阐明了发酵是由微生物（酵母菌）作用而产生的原理。1857~1876，法国著名生物学家巴斯德（Pasteur）通过研究给出了酵母发酵能力的确凿证据。因此，巴斯德可以被认为是“生物技术”之父。1897年，德国的布赫纳（Buchner）发现磨碎了的酵母仍能使糖发酵成酒精，并将此具有发酵能力的物质称为酶，进一步认清了发酵现象的本质。

由于上述科研成果的取得，从19世纪末开始，不少工业发酵产品（如乙醇、醋酸、有机物、丁醇、丙酮等）陆续出现，开创了工业微生物发酵的新世纪。这个时期的生物技术产品都是在敞开环境下经发酵获得的，控制染菌是通过仔细而小心的操作来实现的。随着石油时代的来临，由于上述产品可以从石油生产过程的副产品中廉价地获得，导致了这些正在成长的工业衰退和消失。后来由于石油危机的出现，这些发酵工业又重新得以重视。因发酵技术在实际生产中具有相对简单且易于大规模生产的特点，所以比从石油化工产品中提炼生产更具有商业利润。

此外，另一个非无菌生物技术的典型是废水处理和固体废弃物的堆肥处理。长期以来，微生物早就被开发应用于最大限度地分解人类垃圾与去除有毒物，只是人们很少意识到废水生物处理占整个发酵处理容量的绝大部分，如表1-2所示。可见，生物技术在早期就是一项涉足于环境保护领域的工程技术。

表 1-2 1981年英国的整个发酵处理容量

产 品	总处理容量/m ³
废 水	2 800 000
啤 酒	128 000
面包酵母	19 000
抗 生 素	10 000
奶 酪	3000
面 包	700

3. 近代（第二代）生物技术阶段（20世纪40年代~70年代）

这一阶段的主要标志是抗生素（如青霉素、链霉素、金霉素、新霉素等）工业的兴

起。其发酵过程发生了重要改变即无菌操作状态，规模大大扩大，对生产设备要求高，过程日趋复杂，控制日显重要。

1939年，第二次世界大战爆发，医生们急需抗细菌感染药物来治疗伤员因创伤引起的感染和继发性疾病。1941年，美国和英国合作开始对弗莱明（Fleming）早在1928年发现的青霉素进行更深入的研究开发。通过采用液体培养获得突破，并于1943年研制成全套的工艺设备，使工业微生物发酵进入一个新的发展阶段。

该技术很快应用到其他抗生素的生产，大大促进了其他发酵产品的发展，最突出的是20世纪50年代的氨基酸发酵工业和60年代的酶制剂工业。

近代生物技术阶段的主要有4个特点。

(1) 产品类型多

不但有初级代谢产物（如氨基酸、酶制剂、有机酸等），也出现了次级代谢产物（如抗生素、多糖等），还有生物转化产品（如甾体化合物）、酶反应（如6-氨基青霉烷酸等）。

(2) 技术要求高

发酵过程技术在纯种或无菌条件下进行，大多属好气发酵，在发酵中要通入无菌空气。作为药品或食品的发酶产品，质量要求严格。

(3) 规模巨大

这一时期技术要求最高，通气搅拌罐可大至500m³，规模最大的单细胞蛋白（SCP）工厂的气升式容积发酵罐容积已超过2000m³。

(4) 技术发展速度快

一方面，作为发酵工业中能提高产量和质量的关键一种，其活力和性能都得到了惊人的提高。另一方面，产品品种的更新、新技术及新设备的应用等都达到了前所未有的程度。

与此同时，在理论和实践相结合的基础上，20世纪40年代由化学工程与生物反应过程的交叉与结合产生了一门新的交叉学科——生化工程，并获得迅速发展。

4. 现代（第三代）生物技术阶段（20世纪70年代~现在）

这一阶段的主要标志是DNA重组技术的建立。

1944年，Avery等阐明了DNA是遗传信息的携带者。1953年，Watson和Crick提出了DNA的双螺旋结构模型，开辟了分子生物学时代。1961年，M. Nirenberg等破译了遗传密码，揭开了DNA编码遗传信息及其如何传递给蛋白质这一秘密。1972年，Berg首先实现了DNA体外重组技术。1973年，Boyer和Cohen实现了基因转移，为基因工程开启了通向现实的大门。

基因工程指按人的意志把外源（目标）基因（特定的DNA片段）在体外与载体DNA（质粒、噬菌体等）嵌合后导入宿主细胞，使之形成能复制和表达外源基因的克隆（clone，即无性繁殖系或重组体），再通过重组体的培养而获得所需的目标产品。基因工程的宿主细胞除了大肠杆菌、枯草杆菌、酵母等微生物外，近年来在动物细胞方面也已取得重大突破，出现了克隆羊、克隆牛等。

基因工程技术的出现为人们提供了一种全新的技术手段，使人们可以按照意愿切割

DNA、分离基因并重组后，导入其他生物或细胞、以改造农作物或畜牧品种，也可以导入细菌以生产大量的有用蛋白质或药物、疫苗，也可以导入人体内进行基因治疗。这是一项技术上的革命，带动了发酵工程、酶工程、细胞工程和蛋白质工程的发展，形成了具有划时代意义和战略价值的现代生物技术。

发酵工程也称微生物工程，是利用微生物在适当条件下生产特定产品的一种技术。它可分为发酵和提纯两大部分。发酵部分包括：菌种的特性与选育，培养基的特性、选择及灭菌理论，发酵醪的特性，发酵机理，发酵过程动力学，空气中悬浮细菌微粒的滤除，氧的传递、溶解、吸收理论，连续培养和连续发酵的控制与自动化等有关理论。根据微生物对氧的需要与利用特征，又可将发酵分为传统的嫌气发酵和通风发酵。提纯部分（也称后处理）包括：细胞破碎、分离，醪液输送、过滤、除杂，离子交换、电渗析、反渗透、超滤、凝胶过滤、沉淀分离，溶媒萃取、蒸发、蒸馏、结晶、干燥、包装等过程和单元操作，以及发酵产物的分离提纯过程的控制与自动化等有关内容。目前，发酵工程的产品已相当广泛，如酵母、食用菌等，酶类、曲霉类，各种代谢产物如有机酸、氨基酸、维生素、抗生素、多糖、核苷酸、激素疫苗等，以及单细胞蛋白、调味品等。微生物工程越来越广泛地同国民经济各部门发生关系，涉及范围越来越大，如表 1-3 所示。

表 1-3 微生物工程在国民经济中的工业应用

工业领域	产品举例
酿酒工业	啤酒、葡萄酒、白酒等
食品工业	酱、酱油、食醋、腐乳、面包、酸乳等
有机溶剂发酵工业	酒精、丙酮、丁醇等
抗生素发酵工业	青霉素、链霉素、土霉素等
有机酸发酵工业	柠檬酸、葡萄糖酸等
酶制剂发酵工业	淀粉酶、蛋白酶等
氨基酸发酵工业	谷氨酸、赖氨酸等
核苷酸类物质发酵工业	肌苷酸、肌苷等
维生素发酵工业	维生素 B ₂ 、B ₁₂ 等
生理活性物质发酵工业	激素、赤霉素等
微生物菌体蛋白发酵工业	酵母、单细胞蛋白等
微生物环境净化工业	生物废水处理
生物能源工业	沼气、纤维素发酵酒精、乙烯等
微生物冶金工业	微生物探矿、冶金、石油脱硫、脱蜡等

酶工程是利用生物有机体内的酶所具有的某些特异催化功能，借助固定化、生物反应器和生物传感器等，高效优质地生产特定产品的一种技术。实际上，酶工程是发酵工程的一部分，有人将酶工程称为“分子水平的发酵工程”。它包括酶的生产、分离提取、精制，酶在游离状态下的利用，固定化酶和固定化细胞的制备和利用，酶反应器的应

用，酶反应动力学等技术和理论。简单地说，酶工程就是酶和酶制剂的生产和应用的技术。

细胞工程是指动、植物细胞的人工培养技术，主要包括原生质体融合技术、植物细胞培养技术、动物细胞培养技术。其特征是利用一切生物类型的基本单位——细胞（有时也包括器官或组织）进行离体培养、繁殖、再生、融合，以及细胞核、细胞质乃至染色体与细胞器（如线粒体、叶绿体等）的移植与改建等操作技术。目前，利用细胞融合技术应用于农业已取得实际进展，培育得到了番茄、马铃薯、烟草和短牵牛等杂种植株，把亲缘关系较远的一些植物的有益遗传性状（如高蛋白、高赖氨酸含量和抗病、抗旱能力）转移到粮食作物中去也已有成功的例子。利用植物细胞培养可以获得许多特殊的产物如生物碱类（如尼古丁）、色素、激素、抗肿瘤药物等，动物细胞培养可以用来大规模地生产贵重药品如干扰素、人体激素、疫苗、单克隆抗体等。可见，细胞工程在医学和免疫学方面具有诱人的前景。

基因工程主要涉及生物的遗传物质——核酸的分离提取、体外剪切、拼接重组以及扩增与表达等技术。它是将人们所需要的基因从 DNA 或染色体上切割下来，通过人工合成，在细胞体外将该基因连接到载体上，经过转化或转导将重组的基因组送入受体细胞，使后者获得复制该基因的能力，从而达到定向改变物（菌）种遗传特性或创造新物（菌）种的目的。目前，基因工程主要在细菌方面取得了较大成功，如利用微生物生产动物蛋白、胰岛素、人体生长激素、干扰素等。在食品工业上，利用该技术对细菌或真菌的菌株进行改良从而改进传统的面包烘烤和干酪的制备过程，并对发酵食品的风味和组织进行控制。在农业上，基因工程技术也已用于品种改良，如玉米、番茄等。基因工程技术在其他有机体（如酵母、植物、动物）中的应用也正在迅速发展，使微生物可以获得只有动、植物细胞才具有的生产特性。

蛋白质工程最早于 1981 年由美国基因公司的 Ulmer 提出。随着分子生物学、晶体学及计算机技术的迅猛发展，最近 10 多年来，蛋白质工程取得了长足发展。

目前蛋白质工程主要集中在改造现有的蛋白质方面。蛋白质的改造一般需经过以下步骤：①分离纯化需改造的目的蛋白；②对分离纯化的蛋白进行氨基酸测序、X 射线晶体衍射分析、核磁共振分析等，获取其结构与功能方面的数据；③通过蛋白序列设计核酸引物或探针，从 cDNA 文库或核基因文库中获取基因序列；④设计改造方案；⑤对基因序列进行改造；⑥将经过改造的基因片段插入适当的表达载体，并加以表达；⑦分离纯化表达产物并对其进行功能检测。

总之，基因工程、发酵工程、酶工程、细胞工程和蛋白质工程等现代生物技术并不是各自独立的，而是相互联系、相互渗透的。其中，基因工程技术是核心技术，通过它能带动其他技术的发展。现代生物技术经历了丰富的发展历程，一些重要事件如表 1-4 所示。