

Mc
Graw
Hill Education

大学环境教育丛书

翻译版

Bruce E. Rittmann Perry L. McCarty

Environmental Biotechnology Principles and Applications

环境生物技术 原理与应用

文湘华 王建龙 等 译



清华大学出版社

Mc
Graw
Hill

大学环境教育丛书

(翻译版)

Bruce E. Rittmann Perry L. McCarty

Environmental Biotechnology
Principles and Applications

环境生物技术
原理与应用

文湘华 王建龙 等 译

清华大学出版社
北京

Bruce E. Rittmann, Perry L. McCarty
Environmental Biotechnology: Principles and Applications
EISBN 0-07-118184-9

Copyright © 2001 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by McGraw-Hill Education(Asia) Co., within the territory of the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经许可之出口视为违反著作权法,将受法律之制裁。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2004-3598

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

环境生物技术:原理与应用/(美)里特曼(Rittmann, B. E.), (美)麦卡蒂(McCarty, P. L.)著;文湘华等译. —北京:清华大学出版社,2004.8

(大学环境教育丛书:翻译版)

书名原文:Environmental Biotechnology: Principles and Applications

ISBN 7-302-08942-6

I. 环… II. ①里… ②麦… ③文… III. 环境生物学—高等学校—教材 IV. X17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 062833 号

出版者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

地址:北京清华大学学研大厦

邮编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:柳萍

文稿编辑:李艳青

印刷者:北京季蜂印刷有限公司

装订者:三河市李旗庄少明装订厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:185×230 印张:42.25 字数:885千字

版次:2004年8月第1版 2004年8月第1次印刷

书号:ISBN 7-302-08942-6/X·59

印数:1~3000

定价:68.00元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

出版前言

在 21 世纪之初,面临不断恶化的生存环境,人类清醒地认识到要走可持续发展之路,而发展环境教育是解决环境问题和实施可持续发展战略的根本。高等学校的环境教育,是提高新世纪建设者的环境意识,并向社会输送环境保护专门人才的重要途径。为了反映国外环境类教材的最新内容和编写风格,同时也为了提高学生阅读专业文献和获取信息的能力,我们精选了一些国外优秀的环境类教材,加以影印或翻译,组成大学环境教育丛书。本书即为其中的一册。所选教材均在国外被广泛采用,多数已再版。书中不仅介绍了有关概念、原理及技术方法,给出了丰富的数据,也反映了作者不同的学术观点。

我们希望这套丛书的出版能对高等院校师生和广大科技人员有所帮助,并为我国的环境教育事业作出贡献。

清华大学出版社

2004 年 6 月

中文版序言

首先, McCarty 教授和我衷心地感谢王建龙教授、文湘华教授以及其他参与该书翻译工作的人员。我们也特别感谢清华大学钱易教授倡导开展本书的翻译工作,这是一个具有挑战性而且非常耗时的工作。并且,我们感谢清华大学出版社和 McGraw-Hill 出版公司的一贯支持。

出版本书中文版,意味着该书影响到其最重要的读者。在 21 世纪初,中国正在经济和技术领域取得惊人的进展。尽管这种快速发展将提高中国这个世界上拥有最多人口的国家的生活水平,但同时也可能带来严重的污染,影响人类健康和生态系统平衡。

当我最近访问清华大学的时候,几位教授问我这样一个问题,中国应当如何在经济发展的利益与环境破坏的代价之间寻求平衡? 我的回答是,我希望中国借鉴发达国家 19 世纪 50 年代及之后积累的教训和经验。

本书中译本的出版,是向着我建议的方向迈进的一小步,但却是非常重要的一步。本书有两个特殊价值:第一,它描述了我们已知的、可以成功地解决多种水污染问题的微生物过程,因此,它指明了应用前人研究成果的途径;第二,它提供了微生物和工程实践的基本原理,这些原理是环境生物技术的坚实基础。应用建立在坚实基础之上的策略,使得人们可以预见成功之所在,避免重大失误。

再一次,我深深地感谢清华大学出版社和 McGraw-Hill 出版公司的有关人员,他们以热情和才干,将《环境生物技术》中文版带给中国读者。

Bruce E. Rittmann

John Evans 环境工程教授,西北大学

Evanston, 伊利诺伊, 美国

2002 年 10 月

译 者 序

《环境生物技术:原理与应用》中译本就要和读者见面了!我们怀着十分激动的心情向读者推荐此书。

本书是美国环境专业的权威教材,它阐述了微生物学及工程学的基本原理,并综合讨论了其在主要环境领域中的重要应用,内容既包括传统技术,如活性污泥技术和厌氧消化技术,又包括现代技术,如有毒化学物质的脱毒技术。书中提供了大量的实例,说明如何将生物技术应用于环境工程实践中的分析和设计。我们期待本书成为学生、工程师、研究人员的重要参考书。

特别希望提请读者关注的是,该书体系独特,不同于国内出版的环境生物技术教材,作者既强调基础理论,又重视实际工程应用。书中详细介绍了化学反应的计量学、能力学和动力学,注重利用化学计量方程、电子转移平衡方程、物料平衡方程来描述生物反应过程,并将这种理念贯穿于所有生物处理工艺的分析并用于指导工程设计。这为读者提供了新的思路和方法。

本书的翻译工作是在清华大学钱易教授的倡导下开展的,她一直关注着我们的翻译工作,鼓励我们坚持不懈。

原书作者 Rittmann 教授专门为本书中译本写了序言,表达了他对中国读者的敬意以及对对中国环境事业的良好祝愿。

清华大学环境科学与工程系的多位研究生参与了本书的初译工作。他们是:付莉燕,第1章 微生物学基础;余阳,第2章 化学计量学和细菌能量学,第3章 微生物动力学;吴盈喜,第4章 生物膜动力学;梁鹏,第5章 反应器;席劲瑛,第6章 活性污泥法;王荣昌,第7章 氧化塘;田文华,第8章 好氧生物膜处理工艺;丘勇,第9章 硝化过程,第10章 反硝化过程;丁文明,第11章 除磷;莫罹,第12章 给水处理;杨宁,第13章 产甲烷厌氧处理工艺;王小毛,第14章 有害化学物质的脱毒;罗启仕,第15章 生物修复。在此,向他们表示深深的谢意。

全书第1~3章,第14,15章由王建龙译校,第4~13章由文湘华译校。全书由文湘华、王建龙统稿。

6 环境生物技术：原理与应用

正如在许多中译本专著的前言中所述,翻译是一项十分复杂的工作。限于译校者的水平,又因工作时间紧迫,译著中难免会有一些不准确甚至错误之处,请读者不吝指正。

文湘华 王建龙

2003年8月于北京清华大学

前 言

环境生物技术利用微生物来改善环境质量。这些改善包括防止污染物向外界排放,净化受污染的环境以及为人类创造有价值的资源。环境生物技术是社会必需的,而且作为一个技术学科,它也是独一无二的。

环境生物技术既是传统技术,又是现代技术。在 20 世纪初发展起来的微生物处理技术(如活性污泥技术、厌氧消化技术)至今仍是核心技术。为解决不断产生的新问题(如有毒化学物质的脱毒),新技术也层出不穷。在环境技术中,用于描述过程特征及其控制的重要工具,沿用了几十年。例如,尽管分子生物学工具可以用于探索微生物群落的多样性,但传统的生物量测量方法,如挥发性悬浮固体物的测量,仍然在应用。

环境生物技术中的各种工艺,按照微生物学和工程学原理运行,但是,应用这些原理通常需要一定程度的经验。尽管这些经验不能代替理论原理,但由于环境生物技术所处理的对象十分复杂,而且随时随地发生变化,所以必须应用经验。

工程学原理主要用于定量分析,而微生物学原理更多地用于观测。只有进行定量分析,才能保证工艺过程可靠、经济。然而,环境生物技术中涉及的微生物群落的复杂性通常难以定量描述,此时非定量观测尤其重要。

本书中,我们将环境生物技术的各个方面联系起来。在前 5 章里,我们将介绍基本概念和定量方法,这是本书的原理部分。第 6~15 章讲述环境生物技术的应用,在这些章节中会经常回顾前 5 章中相对应的原理。我们的观点是,所有的微生物过程都是可以理解、可以预测、并且是统一的。同时,我们必须理解,每种应用都有它自己的特点。这些特点并不推翻和违背一般原理,相反,可以作为一般原理的补充,根据一般原理,能够更有价值地理解这些特点。

本书可作为研究生教材,供致力于开发微生物过程并应用于环境质量控制方面的研究生使用,也可以作为高年级本科生的教材,或者作为环境生物技术专业的研究和应用人员的综合性参考书。

本书中的内容可供一门或几门课程使用。对于没有微生物学背景知识的学生,第 1

章提供了微生物分类、代谢、遗传和生态方面的基础知识。第1章强调了微生物学的基本概念,对于理解后续章节的原理和应用是非常必需的。第1章也可作为环境微生物学基础课程的教材,或供需要更新知识、准备学习更注重工艺的课程、研究或实习的学生作为参考书。

原理部分的“核心”在第2~5章。第2章介绍了描述微生物反应过程的化学计量学和热力学的定量方法,主要解决各过程中微生物消耗和产生何种物质以及有多少物质转变的问题。化学计量学是最基本的定量方法。第3章和第4章系统地介绍了动力学定量方法,解决物质消耗和产生速度究竟有多快的问题。反应系统的可靠性和经济有效性取决于对反应动力学的正确应用。第5章讲述了如何应用物料守恒原理,建立描述实际应用的各種反应器的化学计量学和动力学方程。

第6~15章是实际应用部分。每章都同时讨论了主要微生物化学计量学和动力学方面的内容,以及化学计量学和动力学都不易描述的一些特征。各章都解释了如何构建各种工艺过程以达到处理目标,并介绍了设计中的关键参数。目的是尽可能将原理和应用直接联系起来。

关于应用方面的各章,按照从传统到现代的顺序排列。例如,第6~8章讲述了可生物降解有机物(如废水的BOD)废水的好氧处理,而在第14,15章中讲述了危害性化学物质的生物降解。废水好氧处理可追溯到20世纪早期,所以它是一种很传统的技术。而对危害性化学物质的脱毒在20世纪80年代才成为一个主要的处理目标。另一方面,第6~8章讨论了为达到传统目标而采用的一些最新技术。因此,尽管目标是传统的,但是为达到目标所使用的科学与技术可能是非常现代的。

我们还准备了一章介绍复杂系统,但是为了控制本书的长度没有把它加入进来。在网络版的这一章中,通过系统地处理非稳态系统(悬浮的或生物膜系统)和复杂的多物种相互作用系统,我们对第1~5章的原理进行了扩展。本书出版商 McGraw Hill 公司已经同意将这一章放到网站上,对此有兴趣的读者可以从网站上获得这些内容。为该书建立一个网站的另一个好处是,我们可以方便地在网站上对书中存在的一些不可避免的错误进行更正,也许还可以在此发表一些与该书有关的其他信息;我们鼓励读者浏览我们的网页。

本书一个重要的特点是有许多例题。这些例题讨论了应用基本原理的每一个步骤,以利于理解微生物系统的工作原理以及进行处理系统的设计。在大多数情况下,通过例题来学习是最有效的方法,我们很强调这一点。

每章中都有很多习题,可以作为课外作业、课堂补充例题或者作为学习工具。这些习题范围很广。其中有一些很容易解决,仅需简单的计算或者简短的解释。而另一些则是较深入的问题,解决它们需要很多步骤。其他绝大多数是中等难度的。所以,教师或者学生可以从简单的、涉及单个概念的问题入手,逐步向高综合度的问题迈进。有时使用电子计算表格很有帮助,尤其当需要进行比较复杂的或者迭代计算时。

为了促进符号的统一,我们选择了国际认同的《废水生物处理过程描述推荐使用符号》,发表在1982年《Water Research》第16期,1501~1505页。我们希望这可以促进大家使用同样的符号,以利于交流。

由于本书篇幅有限,所以对一般性原理、环境生物技术的应用以及很多在生物系统设计中必须考虑的特殊细节,本书没有全面论述,而是将重点放在原理及其应用方面。对于特殊的设计细节,我们推荐其他参考书,如两卷本的《城市废水处理厂设计》,由水环境协会(应用手册,第8册)和美国土木工程师学会(工程应用手册及报告,第76册)联合出版。

我们借此机会感谢很多优秀的学生和同事,他们不但向我们提供新思想,使我们看得更深远,而且更正了一些错误。要感谢的人太多了,无法将他们的名字一一列出。我们特别感谢在过去几年里选修环境生物技术课程的同学,他们使用了本书的初稿,并且提出很多有益的修改意见。感谢他们所做的一切!

还有以下人员的特别贡献直接促进了本书的出版。Viraj deSilva 和 Matthew Pettis 提供了网络版中“复杂系统”一章的模型计算部分。Gene F. Parkin 和 Jeanne M. VanBriesen 两位博士对本书的内容提出了详细的建议和修改意见。Pablo Pastén 和 Chrysi Laspidou 提供了解题指南中许多习题的答案。Janet Soule 和 Rose Bartosch 将 BER 的手稿转为电子文档,内容包括第1,3,4,6,8~12,15 章的部分或全部。Saburo Matsui 博士和环境质量控制研究中心(京都大学)为 BER 提供学术休假的位置,使他能够完成本书的所有细节,并准时交付给出版商 McGraw-Hill。

最后,我们还要感谢 Marylee 和 Martha。她们在我们全力完成书稿的过程中一直关心和支持着我们。

Bruce E. Rittmann
Evanston, 伊利诺伊
Perry L. McCarty
Stanford, 加利福尼亚

目 录

第 1 章 微生物学基础.....	1
1.1 细胞	2
1.2 分类学与系统发育	4
1.3 原核生物	5
1.3.1 细菌.....	6
1.3.2 古细菌	17
1.4 真核生物.....	19
1.4.1 真菌	19
1.4.2 藻类	23
1.4.3 原生动物	27
1.4.4 其他多细胞微生物	30
1.5 病毒.....	31
1.6 传染病.....	32
1.7 生物化学.....	37
1.8 酶.....	37
1.8.1 酶的反应性	40
1.8.2 酶活性的调节	44
1.9 能量捕获.....	44
1.9.1 电子与能量载体	44
1.9.2 能量与电子投入	46
1.10 新陈代谢	47
1.10.1 分解代谢	50
1.10.2 合成代谢	66

1.10.3 新陈代谢与营养种群	69
1.11 遗传学与信息流	70
1.12 脱氧核糖核酸(DNA)	71
1.12.1 染色体	75
1.12.2 质粒	75
1.12.3 DNA 复制	76
1.13 核糖核酸(RNA)	76
1.13.1 转录	77
1.13.2 信使 RNA(mRNA)	78
1.13.3 转运 RNA(tRNA)	78
1.13.4 翻译与核糖体 RNA(rRNA)	79
1.13.5 翻译	81
1.13.6 调节	81
1.14 系统发育	82
1.14.1 系统发育分类的基础	84
1.15 微生物生态学	86
1.15.1 选择	86
1.15.2 物质交换	88
1.15.3 适应	93
1.16 微生物生态学研究工具	95
1.16.1 传统富集工具	96
1.16.2 分子生物学工具	97
1.16.3 多物种模型	103
参考文献	104
习题	106
第 2 章 化学计量学和细菌能量学	110
2.1 化学计量方程式举例	110
2.2 微生物细胞的经验分子式	111
2.3 基质分配和细胞产率	113
2.4 能量反应	115
2.5 生物生长的总反应	122
2.5.1 发酵反应	127
2.6 能量学和细菌生长	131
2.6.1 能量反应的自由能	132

2.7 产率系数和反应能量学	135
2.8 氧化态氮源	138
参考文献	140
习题	141
第3章 微生物动力学	144
3.1 基本速率表达式	144
3.2 参数估值	146
3.3 基本质量平衡	149
3.4 惰性菌体和挥发性固体的质量平衡	152
3.5 溶解性微生物产物	153
3.6 营养物和电子受体	160
3.7 输入的活性菌体	162
3.8 颗粒物和多聚物的水解	165
3.9 抑制作用	167
3.10 其他形式的速率表达式	172
参考文献	173
习题	174
第4章 生物膜动力学	181
4.1 微生物的聚集	181
4.2 为什么要用生物膜	181
4.3 理想化的生物膜	182
4.3.1 基质现象	184
4.3.2 生物膜本身	186
4.4 稳态生物膜	187
4.5 稳态生物膜的解	187
4.6 参数估值	192
4.7 生物膜平均 SRT	195
4.8 完全混合生物膜反应器	196
4.9 溶解性微生物产物(SMP)与惰性生物体	198
4.10 CMBR 工艺特性	201
4.11 表面负荷的标准化	203
4.12 非稳态生物膜	208
4.13 生物膜模型解的特例	213

14 环境生物技术：原理与应用

4.13.1 厚生物膜·····	214
4.13.2 零级反应动力学·····	214
参考文献·····	215
习题·····	216
第5章 反应器·····	227
5.1 反应器型式·····	227
5.1.1 悬浮生长式反应器·····	228
5.1.2 生物膜反应器·····	230
5.1.3 反应器组合·····	231
5.2 物料衡算·····	232
5.3 间歇反应器·····	234
5.4 带有回流的连续搅拌式反应器·····	236
5.5 推流式反应器·····	237
5.6 带有回流的推流式反应器·····	239
5.7 沉淀后细胞回流的反应器系统·····	242
5.7.1 带有沉淀和细胞回流的连续搅拌式反应器·····	242
5.7.2 对假设的评价·····	247
5.7.3 带有沉淀和细胞回流的推流式反应器·····	248
5.8 利用其他的速率模型·····	249
5.9 化学当量方程与物料平衡方程的关系·····	249
5.10 反应器的工程设计·····	252
5.11 串联反应器·····	255
参考文献·····	258
习题·····	258
第6章 活性污泥法·····	264
6.1 活性污泥法的工艺特性·····	265
6.1.1 微生物生态·····	265
6.1.2 氧气和营养需求·····	267
6.1.3 污泥停留时间的影响·····	268
6.2 工艺类型·····	269
6.2.1 反应器类型·····	270
6.2.2 供氧类型·····	274
6.2.3 负荷类型·····	276

6.3	设计与运行参数	277
6.3.1	历史背景	277
6.3.2	食料微生物比	278
6.3.3	污泥停留时间	280
6.3.4	负荷因子的比较	282
6.3.5	混合液悬浮固体浓度、污泥体积指数 SVI 和回流比	283
6.3.6	Eckenfelder 和 McKinney 方程	286
6.4	曝气系统	287
6.4.1	传氧与混合速率	287
6.4.2	鼓风曝气系统	289
6.4.3	机械曝气系统	290
6.5	污泥膨胀与污泥沉降性问题	291
6.5.1	污泥膨胀	292
6.5.2	泡沫和浮渣的控制	294
6.5.3	污泥上浮	294
6.5.4	分散生长和针状污泥	295
6.5.5	黏性污泥膨胀	295
6.5.6	加入聚合物	296
6.6	活性污泥工艺设计与分析	296
6.7	沉淀池的设计与分析	302
6.7.1	活性污泥特性	303
6.7.2	沉淀池组成部分	304
6.7.3	负荷基准	308
6.7.4	通量理论要点	310
6.7.5	状态点分析	314
6.7.6	沉淀池与曝气池的联系	320
6.7.7	状态点分析的局限性	320
6.8	离心分离	320
6.9	膜分离	321
	参考文献	323
	习题	325
第 7 章	氧化塘	338
7.1	曝气塘	338
7.2	稳定塘	344

7.3	稳定塘的类型	344
7.4	好氧稳定塘	345
7.4.1	基本方程	345
7.4.2	太阳能的输入和利用效率	347
7.4.3	BOD _L 的去除	349
7.4.4	光合自养生物生长动力学	354
7.4.5	兼性稳定塘	357
7.4.6	BOD ₅ 表面去除负荷率	358
7.4.7	一级反应动力学	359
7.5	厌氧稳定塘	362
7.6	串联运行	364
7.7	大肠杆菌的减量	364
7.8	稳定塘设计细节	367
7.9	稳定塘出水中悬浮固体的去除	367
7.10	湿地处理系统	368
	参考文献	369
	习题	371
第 8 章	好氧生物膜处理工艺	374
8.1	生物膜处理工艺需要考虑的事项	375
8.2	滴滤池和塔式生物滤池	377
8.3	生物转盘	388
8.4	颗粒滤料滤池	392
8.5	生物流化床和循环床生物膜反应器	393
8.6	生物膜-悬浮生长复合工艺	398
	参考文献	399
	习题	400
第 9 章	硝化过程	405
9.1	硝化细菌的生化和生理特性	405
9.2	普通工艺考虑事项	409
9.3	活性污泥硝化工艺:单污泥与双污泥系统	409
9.4	生物膜硝化工艺	417
9.5	复合工艺	420
9.6	进水 BOD _L : TKN 比率的作用	422

9.7 ANAMMOX 工艺	422
参考文献	423
习题	424
第 10 章 反硝化过程	430
10.1 反硝化细菌的生理学	430
10.2 三级反硝化工艺	433
10.2.1 活性污泥	437
10.2.2 生物膜工艺	439
10.3 单污泥反硝化工艺	440
10.3.1 单污泥的基本工艺	441
10.3.2 单污泥基本工艺的变形	443
10.3.3 单污泥反硝化工艺的定量分析	446
参考文献	454
习题	455
第 11 章 除磷	463
11.1 正常生物体对磷的吸收作用	463
11.2 在生物处理系统中投加金属盐进行沉淀除磷	465
11.3 强化生物除磷过程	467
参考文献	472
习题	473
第 12 章 给水处理	476
12.1 去除生物不稳定物质的好氧生物膜法工艺	477
12.1.1 BOM 测定方法	478
12.1.2 去除无机生物不稳定物质	479
12.1.3 生物膜预处理	480
12.1.4 复合生物滤池	482
12.1.5 慢速生物滤池	485
12.2 微生物的释放	486
12.3 特殊有机物的生物降解	486
12.4 反硝化	487
参考文献	489
习题	491