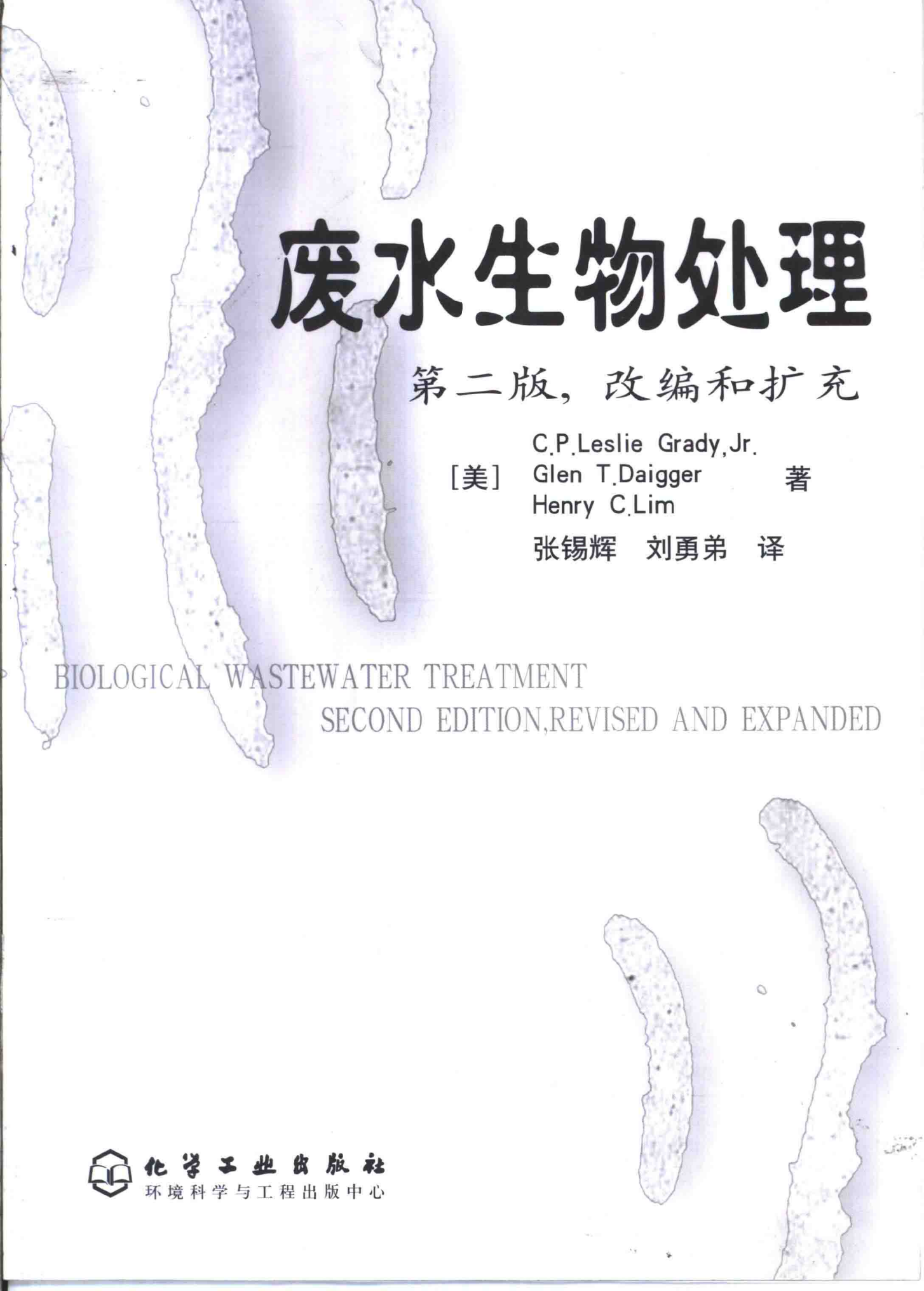




废水生物处理

第二版，改编和扩充

[美] C.P.Leslie Grady, Jr.
Glen T. Daigger 著
Henry C. Lim

张锡辉 刘勇弟 译

BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT

SECOND EDITION, REVISED AND EXPANDED



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

废水生物处理

第二版, 改编和扩充

Biological Wastewater Treatment
Second Edition, Revised and Expanded

C. P. Leslie Grady, Jr.

[美] Glen T. Daigger 著

Henry C. Lim

张锡辉 刘勇弟 译

化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

·北 京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

废水生物处理: 改编和扩充: 第二版/[美] 格雷迪 (Grady, Jr, C.P.L.),
[美] 戴吉尔 (Daigger, G.T.), [美] 林 (Lim, H.C.) 著; 张锡辉, 刘勇弟译.
北京: 化学工业出版社, 2002. 12
ISBN 7-5025-4206-X

I. 废… II. ①格…②戴…③林…④张…⑤刘… III. 废水处理 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 069865 号

Biological Wastewater Treatment: Second Edition, Revised and Expanded/by Grady, Jr, C.P.L.,
Glen T. Daigger, Henry C. Lim
ISBN 0-824-78919-9

Copyright©1999 by Marcel Dekker, Inc. All Rights Reserved.

本书中文简体翻译版由 Marcel Dekker, Inc. 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经出版者许可, 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: 01-2001-3727

废水生物处理

第二版, 改编和扩充

Biological Wastewater Treatment

Second Edition, Revised and Expanded

C. P. Leslie Grady, Jr.

[美] Glen T. Daigger 著

Henry C. Lim

张锡辉 刘勇弟 译

责任编辑: 董琳 管德存

责任校对: 郑捷

封面设计: 张昊

*

化学工业出版社 出版发行

环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京市管庄永胜印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 43 字数 1078 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4206-X/X·207

定价: 98.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

译者序

《废水生物处理》是一本在美国众多的大学里广为采用的研究生教材，在水处理领域更是无人不晓和广为人称道。它的作者 C. P. Leslie Grady, Jr., Glen T. Daigger 和 Henry C. Lim 长期在废水生物处理领域从事研究和教学，在世界上享有很高的声誉。而且，主要作者 C. P. Leslie Grady, Jr. 参与了国际水质协会组织的任务小组，与世界上著名的专家们一起，综合建立了当今得到广泛使用的废水生物处理数学模型即活性污泥 1 号模型和 2 号模型。这一切使得这本书在废水生物处理领域拥有举足轻重的地位。

目前，废水生物处理工艺正在经历着深刻的变化。这种变化甚至使专业人员也无法凭一般的专业知识来准确地理解和把握废水生物处理工艺。而数学模型正在从原本的“锦上添花”或可有可无，变成废水生物处理系统设计和运行的“灵魂”。本书以基本原理层次为出发点，为读者掌握废水生物处理系统复杂的数学模型提供了一条捷径。

作者从反应电子迁移的角度系统地阐述了污染物在各种生化降解中的定量化学计量学关系，这是废水生物处理中一切定量考虑的基础；从微生物生命全过程即生长、衰减、溶胞、死亡和再生长等环节系统地阐述了废水生物处理中微生物的动力学和各种微生物之间的微生态，以及碳氧化还原、硝化、反硝化和除磷等过程之间的相互关系；并且将定量化学计量学关系和微生物动力学与各种构型的生物处理反应器结合起来，系统地揭示了废水污染物降解和微生物生长在各种反应器系统中的具体过程，从而使基础性的科学原理与工艺设计和运行等工程应用完美地结合了起来。对于生物处理工艺设计，本书强调了传统设计方法与现代设计方法的结合，对各种生物处理系统进行了非常详细地阐述，几乎到了“不厌其烦”的程度，这十分有利于读者掌握和应用基本原理。

需要指出的是这本书的内容主要是限于生活污水，而不完全适用于工业废水及其与生活污水形成的混合废水，对后者其中广泛存在的毒性抑制作用书中仅做了简单的介绍；虽然作者非常注重废水生物降解过程的动力学及其在处理工艺设计中的应用，但是对生物降解过程中的能量动力学及其在工艺运行中的定量应用却很少涉及，对工艺运行环节只进行了一些经验性的总结。另外，作者强调了模型的应用，但是对模型在各种情况下的剖析还嫌不够，这可能会影响读者掌握灵活应用模型的方法。

《废水生物处理》一书由清华大学副教授张锡辉博士和华东理工大学教授刘勇弟博士联合主笔翻译。张锡辉负责第 I、II、III 部分，刘勇弟负责第 IV、V、VI 及附录部分。清华大学的研究生罗启仕（第 1~3 章）、孙国芬（第 4~6 章）、朱帅（第 7~9 章）、张丽萍（第 10~11 章）和袁文权（第 12~14 章），华东理工大学的研究生张书军（第 15~17 章）、高航（第 18, 21~22 章）、轩云卿（第 19~20 章）分别参加了各个具体章节的初译工作，这些既是翻译者又是学生的研究生们的加入大大加强了本书的可读性。最后由张锡辉博士负责全书的统稿工作。本书的出版得到了化学工业出版社环境科学与工程出版中心的大力支持，谨此深表谢意。

译者

2002 年春于北京和上海

前 言

传统上，废水处理分为物理、化学和生物处理单元过程。完整地掌握废水处理原理是工艺设计成功的前提。以“单元过程方式”研究废水处理工艺已经在环境工程领域得到了广泛采用，就像在化学工程领域中的应用一样，许多专著阐述了物理和化学单元过程的原理并列举了大量应用实例。本书的目的是以类似的方式阐述废水生物处理单元过程，以此代替在1980年出版的“废水生物处理：理论和应用”。

自1980年以来，废水生物处理领域已经取得了许多进展。尤其重要的是人们发现废水生物处理同时包括了许多不同的过程，设计人员在识别主要反应过程方面起着决定性作用。这就需要未来的环境工程师在开始专业学习时就认识到处理过程的多重性，而不能再像以往那样仅仅简单地归类分析。此外，由于国际水质协会（IAWQ）专家组的努力，工艺过程模拟作为一个工具方法已经被工艺工程师们广泛采用，使他们能够直观地了解各种工艺过程之间的相互作用和影响。随着新型工艺的开发和逐渐成熟，工程实践领域也取得了许多重要的进展。因此，为了融合所有这些进展，有必要完全重新编写而不是改编原书，这就是第二版。

自本书第一版出版以来，环境工程专业学生的背景和预备知识也发生了变化。多数学生已经掌握了微生物学和反应器工程方面的知识。因此，这两个方面的专题已经被删除。但是，与本书相关的背景知识在第Ⅰ部分的三个章节进行了介绍。删除这两个专题为本书腾出了扩展空间，用以介绍自1980年以来废水生物处理领域的新进展。

本书分为六个部分：第Ⅰ部分是绪论和背景，第Ⅱ部分是理想悬浮生长式反应器理论模型，第Ⅲ部分是悬浮生长式反应器应用，第Ⅳ部分是理想附着生长式反应器理论模型，第Ⅴ部分是附着生长式反应器应用，第Ⅵ部分是未来的挑战。

第Ⅰ部分希望做三件事情。一是根据处理目的、生化环境和反应器构型介绍各种生物处理单元，帮助消除由于历史的原因对某些生物处理单元名称所产生的误解；二是介绍生物处理过程的模型方程和符号；三是介绍各种微生物反应的基本化学计量学和动力学，是定量描述生物处理单元过程的关键。第Ⅱ部分将化学计量学和动力学应用于质量平衡方程，研究了含有悬浮生长式微生物的生物处理反应器的理论性能。第Ⅱ部分是本书的核心，它向读者介绍了悬浮生长式反应器的基本原理。第Ⅲ部分则将理论应用于第Ⅰ部分介绍的各种悬浮生长式生物处理工艺，并特地指出了工艺应用在各种场合下的局限性，以保证工艺系统在实际中顺利发挥应有的作用。这样也使读者能够掌握实践中得来的知识，为废水生物处理工艺设计奠定基础。换言之，我们想方设法使第Ⅲ部分尽可能地实用。第Ⅳ部分和第Ⅴ部分与第Ⅱ部分和第Ⅲ部分平行，重点是含有附着生长式微生物的生物处理。这种生长模式分析起来更加复杂，尽管其应用起来有时比较简单。最后，第Ⅵ部分简短地介绍了生物处理在去除废水中难降解物质方面的应用，目的是使读者与作者一起共同探索解决这个世界性的环境问题。

在撰写这个新版本时，我们的计划是为环境工程研究生提供三个学分的课程教材。实际上，本书超出了一般教材所覆盖的内容范围。这为教师留下了回旋余地，也使有兴趣的学生能够掌握基本内容之外更多的知识。我们更进一步希望专业人员能够发现本书值得参考和

自修。

在此，我们谨请使用本书的学生们注意，本书主要采用模型模拟方法描述了生物处理作用过程的概念框架。尽管这些模型是基于我们目前所知的最好思路，但是必须时时牢记它们不过是一些人试图用简单方程描述复杂现象的一种方式。其目的是用“经验”帮助读者了解生物处理过程。但是，千万不能陷进去，不能用模型和模拟结果代替实际过程。工程学需要我们在缺少足够资料的情况下进行判断。读者可以用本书提供的知识作为背景帮助进行可靠的判断，但是一旦实际经验证明某些概念不正确或者不适用时就应该毫不犹豫地抛弃。

像任何一本书一样，许多人都直接或者间接地参与了本书的撰写。第一，我们首先要感谢第一版中的共同作者 Henry C. Lim。虽然他转向了另一个专业方向，他的思想仍然渗透在整个工作中。例如，本版保留了大部分他在第一版所撰写的有关附着生长式系统的模型。第二，C. P. Leslie Grady, Jr. 感谢丹麦技术大学的 M. Henze、瑞士联邦环境科学和技术学院的 W. Gujer、凯普敦大学的 G. V. R. Marais（现已退休）和东京大学的 T. Matsuo 等，在国际水质协会（IAWQ）专家组共同讨论甚至争论悬浮生长式生物反应器模型。第三，如果没有众多的研究工作者创造的知识，本书是不可能出版的。在本书第一版，我们请求那些被遗漏的人宽恕。这一次，我们则请求十倍的宽恕，因为自 1980 年以来已经出现了信息爆炸现象。仅仅两个人根本不可能阅读每一篇文章。第四，我们感谢成千上万的实际设计和运行工作者，坚持不懈地应用生物处理工艺处理各种各样的废水。他们对生物处理工艺性能和运行特征进行了观察和真实记录，为工艺设计和运行以及新工艺的开发奠定了坚实的基础。正是这些创新性的研究和应用相互结合构成了本书的真正基础。最后，我们愿意真诚感谢所有直接参与本书出版的工作人员。Clemson 大学 ESE804 班的学生亲身体验了本书初期草稿，有助于我们撰写得更加清楚简洁。其他大学的专业同行给予了我们非常有建设性的评论意见。我们尤其感谢弗基尼亚技术学院的 Nancy G. Love、伊利诺大学的 Lutgarde Raskin、Connecticut 大学的 Barth F. Smets、依阿华州立大学的 Timothy G. Ellis、Rutgers 大学的 Robert M. Cowan 和滨州大学的 Wen K. Shieh 等。我们还要感谢以下三位杰出人员，他们协助进行了艰苦的工作：Patsy A. Phillips 负责文字处理，Rebecca E. Laura 负责插图，Joni K. Grady 负责索引。

C. P. Leslie Grady, Jr.
Glen T. Daigger

内 容 提 要

本书基于专业技术文献和作者们的学识和经验编著而成。作者倾其所能介绍了废水生物处理工艺设计和运行方面的最新知识。然而，读者也应该认识到，作者的能力是有限的，废水生物处理工艺的原理还没有被完全掌握。本书适合作为教材。设计人员和运行人员的知识和经验决定着实际工作是否能够成功，不能照本宣科。所以，本书只是为读者提供了专业性的知识，但是不能代替具体实践。读者可以在实践中验证和发展本书的原理，克服本书的局限性。

目 录

第 I 部分 绪论	1
1 生物处理分类	1
1.1 生物处理的作用	2
1.2 分类	3
1.3 生物处理常用名称	6
1.4 要点	10
1.5 习题	10
参考文献	11
2 生物处理基本原理	12
2.1 生物处理概述	12
2.2 微生物主要种类和作用	13
2.3 生物处理中的微生物生态系统	16
2.4 生物处理中的重要过程	22
2.5 要点	33
2.6 习题	35
参考文献	35
3 生物处理化学计量学和动力学	40
3.1 化学计量学和广义反应速率	40
3.2 细胞生长与基质利用	43
3.3 维持、内源代谢、衰减、溶胞和死亡	63
3.4 溶解性微生物产物的生成	66
3.5 颗粒态有机物和高分子量有机物的溶解	67
3.6 氨化和氨的利用	68
3.7 磷的吸收和释放	69
3.8 化学计量式简化及其应用	71
3.9 温度的影响	73
3.10 要点	75
3.11 习题	77
参考文献	79
第 II 部分 理论：理想悬浮生长式反应器	85
4 悬浮生长式系统模型	85
4.1 微生物系统模型	85

4.2	质量平衡方程	86
4.3	反应器类型	86
4.4	非理想式反应器模型	91
4.5	要点	93
4.6	习题	93
	参考文献	94
5	单级连续搅拌式生物处理反应器	95
5.1	CSTR 基本模型	95
5.2	基本模型的延伸	105
5.3	生物量回流和排出方式	113
5.4	模型预测 CSTR 运行性能	115
5.5	要点	121
5.6	习题	122
	参考文献	123
6	单级 CSTR 中复合微生物的活性	125
6.1	IAWQ 活性污泥模型	126
6.2	颗粒基质的影响	131
6.3	硝化反应及其影响	135
6.4	反硝化及其影响	139
6.5	复合过程	143
6.6	要点	145
6.7	习题	146
	参考文献	147
7	复杂系统中的多种微生物作用	150
7.1	复杂系统模拟	150
7.2	传统的纯氧曝气活性污泥法	153
7.3	多点进水活性污泥法	159
7.4	接触稳定活性污泥法	164
7.5	Ludzack-Ettinger 改进工艺	170
7.6	Bardenpho 工艺	176
7.7	生物除磷工艺	178
7.8	序批式反应器	183
7.9	要点	189
7.10	习题	191
	参考文献	192
8	动力学参数和化学计量学参数的确定方法	194
8.1	可处理性研究	194
8.2	简单的溶解性基质模型	195
8.3	缺少活性比率数据的简单溶解性基质模型	201
8.4	利用间歇式反应器确定单一基质 Monod 动力学参数	204

8.5	复杂基质模型 (IAWQ 活性污泥 1 号模型)	206
8.6	用常规方法分析废水特征	213
8.7	动力学参数和化学计量参数的单位换算	215
8.8	要点	218
8.9	习题	219
	参考文献	221
第Ⅲ部分	应用：悬浮生长反应器	225
9	悬浮生长式工艺的设计和评价	225
9.1	指导性原则	225
9.2	工艺设计和评价的反复特性	227
9.3	设计和评价中的基本选择	228
9.4	设计和评价步骤	235
9.5	要点	242
9.6	习题	243
	参考文献	244
10	活性污泥法	246
10.1	工艺概述	246
10.2	影响因素	253
10.3	工艺设计	265
10.4	工艺运行	303
10.5	要点	309
10.6	习题	312
	参考文献	313
11	生物法去除营养物质	318
11.1	工艺概述	318
11.2	影响因素	329
11.3	工艺设计	336
11.4	工艺运行	357
11.5	要点	358
11.6	习题	360
	参考文献	362
12	好氧消化	367
12.1	工艺概述	367
12.2	影响因素	376
12.3	工艺设计	381
12.4	工艺运行	385
12.5	要点	386
12.6	习题	387
	参考文献	388
13	厌氧工艺	391

13.1	工艺概述	391
13.2	影响因素	408
13.3	工艺设计	421
13.4	工艺运行	427
13.5	要点	429
13.6	习题	432
	参考文献	434
14	氧化塘	438
14.1	工艺概述	438
14.2	影响因素	443
14.3	工艺设计	448
14.4	工艺运行	460
14.5	要点	461
14.6	习题	462
	参考文献	463
第Ⅳ部分 理论：理想附着生长式反应器		465
15	生物膜模型	465
15.1	生物膜的特性	465
15.2	传质限制的影响	469
15.3	多种限制性营养物的影响	486
15.4	多物种生物膜	487
15.5	要点	490
15.6	习题	492
	参考文献	493
16	微生物在填充塔中的好氧生长	496
16.1	填充塔基质去除模型	496
16.2	理想填充塔的性能	499
16.3	模型中未考虑的其他因素	503
16.4	其他填充塔模型	504
16.5	要点	507
16.6	习题	507
	参考文献	508
17	异养微生物在转盘反应器中的好氧生长	510
17.1	单级转盘反应器基质去除模型	510
17.2	单级转盘反应器的性能	513
17.3	多级转盘反应器基质去除模型	516
17.4	多级转盘反应器的性能	516
17.5	其他转盘反应器模型	518
17.6	要点	519
17.7	习题	520

参考文献	520
18 流化床生物反应器	522
18.1 流化床生物反应器概述	522
18.2 流化作用	525
18.3 流化床生物反应器模型	533
18.4 流化床生物反应器的理论性能	536
18.5 确定流化床生物反应器的尺寸	538
18.6 要点	539
18.7 习题	540
参考文献	541
第 V 部分 应用：附着生长式反应器	543
19 滴滤池	543
19.1 工艺概述	543
19.2 影响因素	552
19.3 工艺设计	562
19.4 工艺运行	576
19.5 要点	578
19.6 习题	579
参考文献	580
20 生物转盘接触器	584
20.1 工艺概述	584
20.2 影响因素	588
20.3 工艺设计	594
20.4 工艺运行	607
20.5 要点	607
20.6 习题	608
参考文献	609
21 淹没式附着生长生物反应器	612
21.1 工艺概述	612
21.2 影响因素	620
21.3 工艺设计	625
21.4 工艺运行	633
21.5 要点	633
21.6 习题	634
参考文献	635
第 VI 部分 未来的挑战	637
22 异型生物性有机化合物的影响和归宿	637
22.1 生物降解	637
22.2 非生物去除机理	641
22.3 生物去除与非生物去除的相对重要性	644

22.4	异型生物性有机化合物的影响.....	647
22.5	异型生物性有机化合物处理的经验.....	648
22.6	要点.....	650
22.7	习题.....	651
	参考文献.....	651
附录 A	缩写字.....	655
附录 B	符号.....	657
附录 C	单位换算.....	673

第 I 部分 绪 论

研究废水处理系统中的生物处理需要了解相关术语。第 1 章的目的是根据处理系统中进行的生化处理反应、反应所处的环境和所使用的反应器的构型，对生物处理进行分类。数学模型能够定量描述系统的性能，加快工程设计。建立生物处理数学模型必须掌握系统中进行的微生物学过程的原理。第 2 章介绍了生物处理原理，微生物生态系统中复杂的相互作用等。这是理解模型简化特性的关键，促进模型的合理应用。最后，建立数学模型需要掌握生物处理中主要反应的化学计量学和动力学。第 3 章介绍了这方面的知识。

1 生物处理分类

废水处理的目的是去除排放后可能危害水环境的污染物。传统上，废水处理工程师比较重视那些会消耗接纳水体溶解氧 (DO) 的污染物的去除，因为水中 DO 浓度降低会危及水生生物。这些所谓的需氧污染物质，是水体中微生物的食物来源，在新陈代谢过程中需要利用水中的氧气。并且，与高等水生生物相比，微生物能够在比较低的 DO 浓度下生存。多数需氧污染物是有机化合物，而氨是一种重要的无机物。因此，早期的废水处理系统被设计成为去除有机物质的系统，有时包括将氨态氮氧化为硝态氮。当今建立的许多系统仍然以此为目的。随着工业化持续发展和人口增长，人们认识到另一个问题，即富营养化问题。富营养化是指水体中植物和藻类过度生长，使湖泊和河口加速老化的现象。这是由于氮和磷等营养物排入水体引起的。因此，工程师们开始注重设计有效的、成本低廉的废水处理系统来去除这类污染物。过去 20 年中的许多研究都注重这类处理方法。直到最近，我们才开始重视有毒有机化学物质的排放问题。这些有毒物质中有许多是有机物，去除需氧物质的工艺方法也能够去除有毒有机物。因此，目前许多研究都转向更好地理解有毒有机物在处理系统中的归宿和对处理系统产生的影响。

除了污染物的上述类型之外，废水中的污染物还可以用其他许多方式进行描述。例如，可以根据污染物的物理性质（溶解性或非溶解性）、化学性质（有机或无机）、微生物降解特性（可生物降解或不可生物降解）、污染物来源（天然的或人工的）和环境影响（毒性或非毒性）等等对污染物进行分类。显然，这些分类并不是绝对的，而是相互重叠的。因此，我们可能会将污染物区分为溶解性的可生物降解有机物、不溶性的可生物降解有机物等。废水处理工程师的工作就是要设计出能够以有效和经济的方式去除这些污染物的处理工艺。这需要掌握处理工艺和其中各个单元操作的专业知识。单元操作连接在一起形成处理工艺。单元操作通常根据其内在的基本作用机理进行区分，即物理的、化学的和生物化学的。物理单元操作是指那些受物理学定律控制的操作，例如沉降。化学单元操作，正如该名称所指的一样，由化学反应控制，例如化学沉淀。生化单元操作利用活性微生物通过酶催化反应分解或转化污染物。在本书中，我们将研究废水处理工艺中生化操作的作用，建立生物处理的设计方法。

1.1 生物处理的作用

确定废水处理系统中生物处理的作用的最有效方法是制定该系统的工艺流程图，如图 1.1 所示。通过流程图可以跟踪四种类型的污染物，箭头宽度表示污染物质通量。这四类污染物是：溶解性有机物（SOM）、不溶性有机物（IOM）、溶解性无机物（SIM）和不溶性无机物（IIM）。大多数情况下，不溶性无机物的微生物转化速率很低，不具有实际意义。因此，不溶性无机物通常由初级物理单元操作分离，然后再处理处置。当废水量很大时，污染物的浓度相对比较低。工程师们以最有效的方法分离污染物，并且尽可能地进行浓缩，减少污染物的体积。对于废水中的不溶性污染物，可以由物理沉淀单元分离去除。由此，物理沉淀通常是污水处理工艺系统中的第一个单元操作。沉淀池的出水（溢流）中含有进水中的所有溶解性污染物组分和少量不溶性组分。大部分不溶性组分从沉淀池底部排出，呈浓悬浮浆状态，称作“污泥”。溢流液和沉淀污泥都需要进一步处理，生物处理这时就可以发挥作用了。

多数用来分解或转化溶解性污染物的单元操作都是生物处理单元。这是因为，在反应物

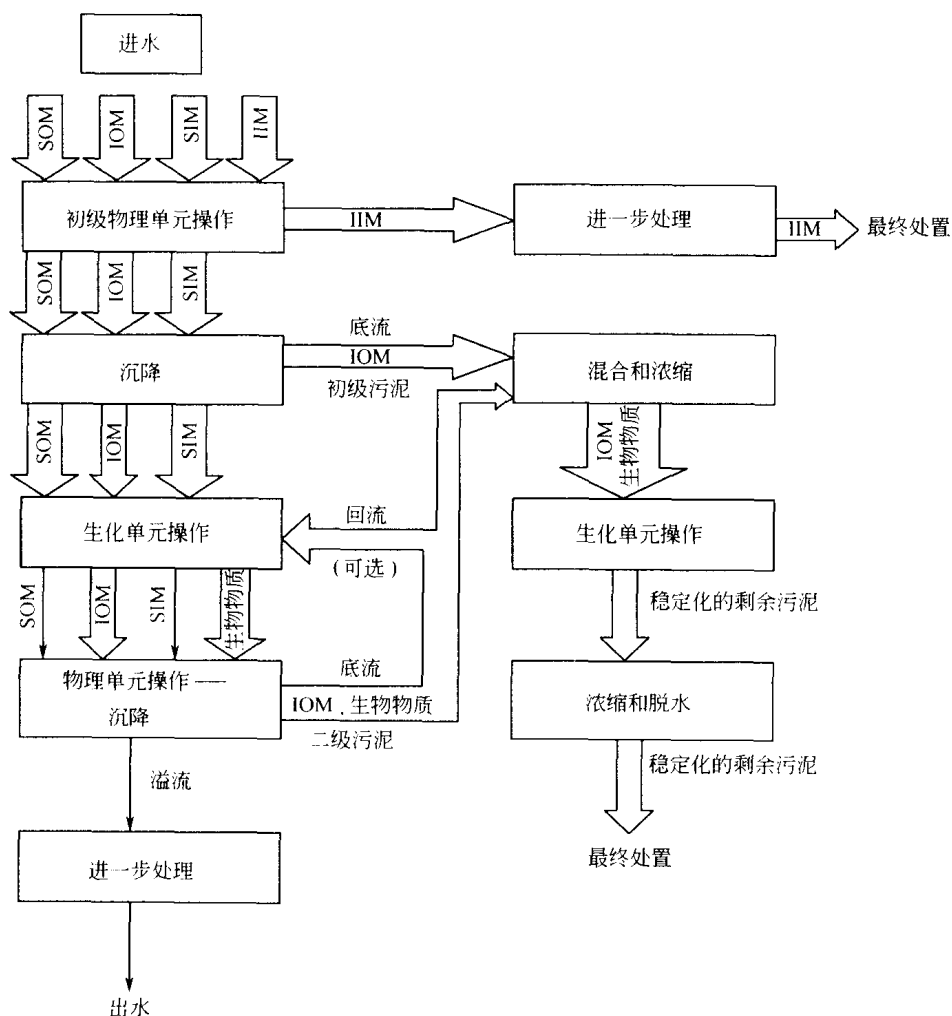


图 1.1 包括生物处理单元的废水处理典型流程示意图

SOM—可溶性有机物；IOM—不溶性有机物；SIM—可溶性无机物；IIM—不溶性无机物

浓度非常低时，生物处理比化学和物理单元更加有效。在生物处理中，溶解性污染物或者被转化为无毒形式如二氧化碳或氮气，或者被转化为容易分离的颗粒状的微生物细胞物质。此外，微生物在生长过程中，能够吸附先前的单元操作中所没能去除的不溶性有机物，并通过物理单元分离去除。所以，物理单元操作的出水相对清洁，通常只需很少或者不需任何额外处理就可以排放。用物理单元分离的不溶性物质，一部分被回流到生物处理单元中，其余部分进入后续的处理工艺，做进一步处理。

生物处理的另一个主要用途是处理污泥，如图 1.1 所示。初级污泥是在生物处理之前由沉淀单元产生的污泥。二级污泥是由生化处理单元中微生物细胞的生长以及微生物细胞吸附不溶性有机物产生的污泥。由于废水来源多样，初级污泥性质变化多样，而二级污泥性质比较单一，主要是微生物细胞。如图所示，有时将这两种污泥混合处理，也可以分别处理。在处理污泥时，生物处理单元的效率与污泥性质密切相关。

尽管生物处理在废水处理中扮演着主要的角色，但是如果向一个废水处理设施的参观者询问所使用的某一生物处理的名称，其回答往往不能表明该生物处理的原理和性质。事实上，对于活性污泥这一最常见的单元操作，甚至早在其生物处理性质弄清以前就已经被命名。因此，在开始学习各种生物处理单元之前，首先需要搞清楚生物处理是什么和它能干什么。这将是有益的。

1.2 分 类

生物处理可以从 3 个方面进行分类：(1) 生化转化；(2) 生化环境；(3) 生物反应器构型。如果同时考虑了这三方面因素，就可以得到详细的分类系统。这种分类有助于工程师根据特定需要来选择最合适的生物处理单元。

1.2.1 生化转化

溶解性有机物的去除 生物处理单元在废水中主要的用途是去除 SOM。微生物以 SOM 作为食物来源，将部分碳转化为新细胞物质，而将其余的碳转化为二氧化碳。二氧化碳以气体形式逸出，细胞物质通过沉淀分离被去除，使废水不再含有机污染物。由于有机污染物中的大部分碳被氧化成为二氧化碳，因此 SOM 的生物去除也常称为碳氧化。

好氧微生物特别适合去除可降解 COD 浓度为 50~4000mg/L 的有机物。在浓度比较低时，生物吸附常常是更为经济的处理方法，尽管生化处理单元可用于处理 COD 低于 50mg/L 的受污染地下水。厌氧微生物适合处理高浓度的废水，因为其不需要氧气，产生的细胞物质比较少，还能够产生可利用的甲烷气体。但是，厌氧处理之后，通常需要再进行好氧处理，才能使废水达到排放标准。然而，如果废水 COD 浓度超过 50000mg/L，蒸发和焚烧处理方法则可能更为经济。厌氧微生物也可用于处理中等浓度（COD 低至 1000mg/L）的废水和经过稀释的废水。需要强调的是，以上所指浓度是溶解性有机物的浓度。对于悬浮或胶体状态的有机物，用物理或化学方法通常更容易分离去除，然后经过浓缩再进行处理。然而，由溶解性、胶体和悬浮态混合组成的有机废水通常采用生化法进行处理。

不溶性有机物的稳定化 废水含有大量的胶体性有机物，不容易用沉降法去除。在应用去除 SOM 的生化工艺进行处理过程中，许多胶体性有机物质被微生物捕获利用，并最终转化为稳定的不再受微生物活动影响的稳定产物。这种稳定产物的形成过程称为稳定化。稳定化过程可以在去除溶解性有机物的生化处理中同时进行，但大多数稳定化过程是在专门设计的处理系统中进行。

不溶性有机物包括废水本身含有的以及去除溶解性有机物时由微生物生长形成的。因为这类固态物质能够通过沉降从废水中分离去除，所以在用生化处理进行稳定化之前，通常要用沉淀法进行浓缩。好氧和厌氧方法都可以完成稳定化作用，厌氧方法的能量效率更高。稳定化后的最终产物包括二氧化碳、无机性固体和不溶性有机残留物。有机残留物不再受微生物作用的影响，其性质类似腐殖质。此外，厌氧方法还可以产生甲烷气体。

溶解性无机物的转化 自 20 世纪 60 年代发现富营养化作用以来，工程师们一直关注废水中无机营养物的去除。富营养化的两个主要元素是氮和磷。多种能够去除富营养化物质的生物处理工艺已经得到开发。生活废水中的磷以无机态存在，如正磷酸盐，聚磷酸盐（如焦磷酸盐、三聚磷酸盐）和有机磷（如糖磷盐、磷脂和核苷）。聚磷酸盐和有机磷通过微生物作用转化为正磷酸盐，而正磷酸盐通过专门培养的具有独特生长性状的细菌所吸收而被去除。这种特异细菌能够将大量的正磷酸盐以颗粒形式储存于细胞内。氮在生活废水中以氨和有机氮（如氨基酸、蛋白质和核苷）的形式存在。当有机物被生物降解时，有机氮被转化为氨。氨的转化需要两种类型的细菌。首先是硝化细菌，将氨氧化为硝酸盐，称为硝化作用。然后是反硝化细菌，将硝酸盐转化为氮气，称为反硝化作用。氮气逸入大气中。在自然界中还有其他类型的转化过程，但是在生物处理单元中很少得到规模性的开发和应用。

1.2.2 生化环境

微生物生长环境的最重要特征是微生物氧化化学物质获取能量时的最终电子受体。电子受体主要有三类：氧气、无机化合物和有机化合物。当有溶解氧存在或者溶解氧供应充足而不会成为限制因素时，属好氧环境。在好氧环境中，微生物生长效率最高，降解单位污染物所生成的细胞物质非常高。严格地说，任何不是好氧的环境都属厌氧。但是，在废水处理领域，“厌氧”一般是指这样的环境，即有机化合物、二氧化碳和硫酸盐作为主要的最终电子受体，电位非常负。在厌氧条件下，微生物生长效率比较低。当环境中硝酸盐和亚硝酸盐作为主要电子受体存在，并且在没有氧时，这样的环境称为缺氧环境。在硝酸盐和亚硝酸盐存在时，电位升高，微生物生长效率比厌氧条件下高，但是比不上好氧生长效率。

生化环境对微生物群落生态有着极为深刻的影响。好氧处理能够支撑完整的食物链，包括食物链底部的细菌和顶部的轮虫。缺氧环境比较受限制，而厌氧环境最受限制，只是细菌占主导地位。生化环境影响着处理效果，因为微生物在三种环境中可能有着迥然不同的代谢途径。在工业废水处理中，生化环境变得尤其重要，因为有些降解只能够以好氧方式而非厌氧方式进行，或者相反。

1.2.3 生物反应器构型

根据生物反应器构型对生物处理进行分类是非常重要的，这是基于生物处理进行的程度受到反应器构型强烈影响这一事实。因此，需要全面地了解已有各种生物反应器类型。

根据微生物在反应器中生长方式的不同，废水生物处理反应器分为两种主要类型：悬浮于水中的和附着于固体支撑物的。在应用悬浮生长式生物反应器时，需要搅拌以便使微生物始终处于悬浮状态，而且需要用物理单元操作如沉淀，将细胞从处理水中分离，再排放出水。与之相反，附着生长式的微生物在固体支撑物上以生物膜形式生长，需要处理的废水流过生物膜。然而，由于微生物能从支撑物上脱落，通常也要求在处理出水排放前采用物理单元进行分离。

悬浮生长式生物反应器 连续搅拌池反应器（CSTR）可能是最简单的连续流悬浮生长式生物反应器。反应器由一个能充分搅拌的容器、含有污染物的入水和含有微生物的出水组