
废水生物处理

(原著第三版)

Biological Wastewater Treatment

C·P·莱斯利·格雷迪

【美】 格伦·T·戴杰

南希·G·洛夫

著

【加】 卡洛斯·D·M·菲利普

张锡辉 刘勇弟 吴光学

译

中国建筑工业出版社

— 废水生物处理

(原著第三版)

Biological Wastewater Treatment

C·P·莱斯利·格雷迪

[美] 格伦·T·戴杰

南希·G·洛夫

[加] 卡洛斯·D·M·菲利普

著

张锡辉 刘勇弟 吴光学 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2015-5879 号

图书在版编目(CIP)数据

废水生物处理 (原著第三版)/(美) 格雷迪等著;
张锡辉等译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016.7
ISBN 978-7-112-19297-7

I. ①废… II. ①格…②张… III. ①废水处理-生
物处理 IV. ①X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 060890 号

Biological Wastewater Treatment, 3rd Edition

Copyright © C. P. Leslie Grady, Jr. Glen T. Daigger and Nanncy G Love

All rights reserved. Authorized translation from English language edition published by CRC Press, an imprint of Taylor & Francis Group LLC.

Chinese Translation Copyright © 2016 China Architecture & Building Press

China Architecture & Building Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the 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.

本书中文简体字翻译版由英国 Taylor & Francis Group 出版公司授权由中国建筑工业出版社独家出版并在中国销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

责任编辑: 石枫华 程素荣 兰丽婷

责任校对: 陈晶晶 姜小莲

废水生物处理

(原著第三版)

[美] C·P·莱斯利·格雷迪

格伦·T·戴杰 南希·G·洛夫 著

[加] 卡洛斯·D·M·菲利普

张锡辉 刘勇弟 吴光学 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京画中画印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 54¼ 字数: 1351 千字

2017年2月第一版 2017年2月第一次印刷

定价: 188.00 元

ISBN 978-7-112-19297-7

(28016)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



谨将此书献给 Francisco, Jack, Rita, Ryan, Sophia, 以及居住在这个越来越拥挤的
世界上的所有孩子们。希望本书可以使这个世界少些污染, 多些可持续性。

声 明

本书基于专业技术文献中的信息及各位作者自身的知识经验而成。作者旨在倾其所能和所知，呈现废水生物处理工艺设计和运行。然而，读者必须认识到，作者对前沿技术的理解，及生物处理工艺专业本身的发展，都不可避免地存在着不完善之处。本书编撰主要目的是教学之用，生物处理工艺设计及运行成功的关键是废水处理工艺设计人员及运行人员的知识和经验，而不是具体设计和运行程序。尽管本书可以为专业人士提供专业知识，但不能替代一切。读者有必要在运用本书过程中，独立地进行诠释和考证。因而，使用本书所可能产生的任何性质的损失或损害，本书作者、出版商及作者的雇主概不承担任何法律责任。

译者序（原著第三版）

《废水生物处理》（原著第三版）的中译本终于面世了。

第三版的作者，在第二版作者 C·P·莱斯利·格雷迪（C. P. Leslie Grady, Jr.）和格伦·T·戴杰（Glen T. Daigger）之外，增加了南希·G·洛夫（Nancy G. Love）和卡洛斯·D·M·菲利普（Carlos D. M. Filipe）两位作者——他们为第三版补充了近年来污水生物处理工艺的内容。本书的主要作者格伦·T·戴杰先生是美国工程院院士，并于 2010 年至 2014 年间担任国际水协（IWA）协会主席。

在内容方面，第三版保持了第二版的基本框架和论述风格，重点增加了低氧活性污泥工艺方面的内容。书中并提供大量实例数据以证明活性污泥工艺在低氧状态下运行具有一些独特的效果，能耗因曝气量减少而降低，脱氮效率提高，活性污泥微生物群落结构发生了显著变化。

目前，污水生物处理技术已然跨入了膜生物反应器（MBR）时代。虽然还有大量的理论和技术问题需要探索 and 解决，我国越来越多的大型污水处理厂开始采用 MBR 技术。我国产业界也对 MBR 技术进行了创新性的发展，典型例子是兼氧式 MBR 工艺（简称 FM-BR）。这种工艺突破了超滤膜仅作为分离手段的局限性，将超滤膜与生物处理过程进行了一体化集成，能够实现短流程脱氮，将磷酸盐转化成磷化氢，同时去除污水中的 COD、TN、TP；老化的污泥被作为碳源通过内消化利用，因为几乎没有剩余污泥，所以基本不需要进行污泥处理处置。

尽管如此，本书不断再版更新而保持了与时俱进以及专业内容的高水准，在世界范围内为专业人士所认可，被视为传统污水生物处理领域的登峰之作，具有很高的实用价值。这也是我在翻译第二版之后，乐于将第三版翻译出来供我国广大专业从业者和学术研究者参考的原因。

《废水生物处理》（原著第三版）由清华大学深圳研究生院教授张锡辉、副教授吴光学及华东理工大学教授刘勇弟联合主笔翻译。张锡辉和吴光学负责第 I、II、III 部分，刘勇弟负责第 IV、V、VI 及附录部分，最后由张锡辉负责全书的统稿工作。清华大学的研究生范小江、韦德权、宋佳、苏子杰、刘京、李波、王莹莹、汤博、王火青、李丽等和华东理工大学的李辉副研究员、孙贤波副教授及研究生吴志明、刘新秀、陶萍、陆志艳、武骁、郭晓觉、顾雍、黄玲等分别参加了各个具体章节的初译工作，既是译者又是学生的研究生们的加入大大提高了本书的可读性。本书的出版得到了中国建筑工业出版社的大力支持和江西金达莱环保股份有限公司的赞助，谨此深表谢意。

张锡辉

2015 年 12 月 24 日于深圳

前 言

废水处理工艺通常划分为物理的、化学的和生物的单位过程。充分掌握各个单元过程原理是进行工艺设计的前提。这种“单元过程模式”作为过程工程学习方法，正如它所起源的化学工程一样，已经在环境工程领域广为接受，并在环境工程教科书中广为使用。本书的目的，旨在介绍废水处理工艺中生物处理的理论原则及设计步骤。本书遵循 Biological Wastewater Treatment: Theory and Applications (1990)，以及后续的 Biological Wastewater Treatment, Second Edition, Revised and Expanded (1999) 两书所建立的惯例。

自 1999 年以来，废水生物处理领域得到了持续不断的发展，因而，我们努力在这一版中收集这些不断发展的成果。对于生物法去除营养物的认识有了显著的提高，并且这些知识已经应用在国际水协（IWA）最新版活性污泥模型中了。我们更新了生物法去除营养物过程中的微生物学和动力学，以反映这些新成果；同时，还更新了生物除磷模型。对于厌氧系统的新发展，则反映在 IWA 厌氧消化模型中，所以，我们特别增加一章以描述厌氧生物反应器及其过程模拟。我们还利用第二版中引入但还没有应用的解析方法，更新了附着生长式系统的建模方法。正如过去十年我们对于生物处理过程的认识不断提高，我们对于这些工艺的实践应用也在不断发展。因而，所有关于应用的章节都有所更新，以反映这些进展。特别重要的是，浸没式附着生长生物反应器得到越来越多的应用，因而，关于这方面内容的章节进行了全面更新。过去十年间，环境中的痕量有机化合物受到关注，其中多数来自消费品。因而，我们在外源型有机化合物的章节中，增加了痕量污染物的归宿和影响方面的内容。最后，过去十年来，人类开始认识到资源有限而带来的发展局限性，并开始采取措施提高发展的可持续性。因而，由于生物处理在实现世界可持续发展方面可以大有作为，我们增加了一章以阐述系统可持续性系统设计。

本书分 6 部分。第 I 部分 绪言及背景；第 II 部分 理论：理想悬浮生长式反应器模型；第 III 部分 应用：悬浮生长式反应器；第 IV 部分 理论：理想附着生长式反应器模型；第 V 部分 应用：附着生长式反应器；第 VI 部分 未来的挑战。

第 I 部分重点阐述三个方面的内容。第一，根据生物处理的目的、生化环境及所用的反应器构型，介绍各种已命名的生物处理工艺。这些历史早期命名的生物处理工艺，有些命名有点奇特，所以，通过介绍有助于消除这些奇特的名称所引起的困惑。第二，介绍生物处理工艺模型用到的公式和符号。第三，介绍定量表述生物处理工艺中各种关键微生物反应的基本计量学和动力学。

第 II 部分，将计量学和动力学应用于质量平衡方程，调查研究在废水中悬浮生长的微生物经过反应器系统时，生物反应器的理论性能。第二部分是本书的核心，它向读者介绍了悬浮生长式反应器之所以如此作用的基本原理。

第 III 部分，将理论应用到第一部分所介绍的各种已命名的悬浮生长式生物处理过程。

然而，特别需要指出的是，在实际应用中，有时需要采取一些限制性措施，才能够确保废水生物处理系统在实践中发挥作用。通过这种方式，读者可以掌握生物处理工艺设计的理论基础。换言之，我们尽可能使第Ⅲ部分切实可用。

第Ⅳ部分和第Ⅴ部分是和第Ⅱ部分和第Ⅲ部分平行组织的内容，重点讲述附着生长式生物处理工艺。尽管这种生长模式在应用中常常比较简单，但它却增加了分析的复杂性。

第Ⅵ部分 展望未来，介绍废水处理系统中外源型及痕量污染物的归宿和影响，并探讨应用生物处理工艺促进世界发展的可持续性。

我们计划将此书作为环境工程研究生的教科书，供已修读了环境微生物学的学生三个学分的学习。实际上，本书所提供的信息量比学习所需要的更充裕，因而教师可以自由选择，对那些想要了解比基本知识更多的学生来说，也可以作为一本参考书。此外，我们希望专业同行们可以将此书用于参考或自习。

在此，我们想谨慎地提请使用本书的学生们注意。第Ⅱ部分和第Ⅳ部分，极大地依赖模型对生物处理系统功能进行概念性描述。尽管所用的模型是基于我们现时的最好的想法，但必须谨记，这只是某些人用简单的术语描述复杂现象的方法而已，其目的只是为了帮助读者学习理解用“经验”描述的处理过程。然而，大家不能掉入这样的陷阱，即用模型及其模拟结果替代现实。工程师经常在缺少足够信息的状况下做出判断。读者可使用本书所提供的背景进行比较明智的判断，但是，一旦实际经验表明这些概念不正确或不适用时，就需要毫不犹豫地抛弃这些概念。理论在不断地发展，所以需要随着认识的提升而随时准备着改变观念。

如同很多书一样，本书撰写工作得到了很多人直接或间接的帮助。为此，我们首先感谢本书第一版的共同作者 Henry C. Lim，他的过程工程的方法始终影响着本书的撰写工作。他提出的采用有效因子建立附着生长式系统模型的想法，仍然是本版的重要组成部分之一。第二，Grady 博士非常感谢丹麦技术学院（Technical University of Denmark）的 M. Henze；瑞士水科技联邦研究院（Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology）的 W. Gujer；开普敦大学（University of Cape Town）的 G. v. R. Marais（已退休）和日本东洋大学（Toyo University）T. Matsuo 先生，作为第一届国际水协活性污泥数学模型任务小组的共同成员，他们曾与 Grady 博士长时间探讨悬浮生长式生物反应器模型，这让他从中受益匪浅。第三，我们要感谢数百名研究者（基础性的和应用性的），他们的研究成果是本书的基础，没有他们的辛勤工作及奉献，本书根本不可能诞生。我们再次请求那些没能在此书中提及的人们的宽容和谅解。第四，我们要感谢成千上万具有远见的从业者（设计者及运行者），他们忠诚地使用生物工艺处理如此多样的废水，他们对于这些生物处理工艺的性能及运行特征的观察和实际记录，为工艺设计和运行及新工艺的开发奠定了坚实的基础。正是这种深思熟虑的创新性的研究和应用，才为本书提供了事实基础。第五，我们要感谢普度大学（Purdue University）、克莱门森大学（Clemson University）、弗吉尼亚技术学院（Virginia Tech）及密西根大学（University of Michigan）的学生们，感谢他们使用了本书的初稿，并就怎样使本书更加通俗易懂，提供了很多极有帮助的意见。第六，我们要感激许多直接参与本书准备工作的人们。感谢 Rebecca E. Laura 对本书第二版图片所作的美编工作，大部分的图片也在本书使用。感谢 Jeremy Guest 为本书新的模型图所作的美编工作。感谢 Benoit Chachaut 博士用 MATLAB 完成了对填充

塔及生物转盘接触池的模型模拟工作。最后，我们要感谢我们值得尊敬的伴侣们做出了很多的牺牲，才成全我们完成本书这个巨大的工程。

MATLAB®是 MathWorks 公司的商标，使用已得到许可。MathWorks 公司不保证本书文本与习题的准确性。本书关于 MATLAB®软件及相关产品的使用与讨论，不构成 MathWorks 公司就 MATLAB®软件特定的使用或是特定的教学方法的担保或是赞助。

作者介绍

C·P·莱斯利·格雷迪：博士，注册工程师（PE）（已退休），认证环境工程师（Board Certified Environment Engineer, BECC），克莱门森大学（Clemson University）环境工程与地球科学系 Bowen 研究协会（R. A. Bowen）荣誉教授，曾是 CH2M HILL 公司技术人员。他的职业生涯极为广泛，包括了生物处理系统的很多方面，从数学模型到外源性有机化合物的归宿和影响。Grady 博士著作颇丰，并广受赞赏。他也曾获奖无数，包括环境工程及科学教授协会（AEESP）的创始人奖，水环境联盟（WEF）颁发的 Harrison Prescott Eddy 奖章，Rudolfs 工业废物管理奖，工业水质终身成就奖等。他是美国微生物学会（American Academy of Microbiology）成员。

格伦·T·戴杰：博士，注册工程师（PE），认证环境工程师（Board Certified Environment Engineer, BECC），美国国家工程院（National Academy Engineering, NAE）院士，CH2M HILL 公司资深副总裁及技术主管。至本书出版为止，他已在该公司任职 31 年，他也曾是克莱门森大学（Clemson University）环境系统工程系教授和系主任。他著作颇丰，并为多个专业机构做出贡献，包括水环境联盟（WEF），水环境研究基金（WERF），美国环境工程师学会（AAEE）及国际水协（IWA）。Daigger 博士载誉无数，他是美国环境工程师学会（AAEE）Kappe 系列讲座及美国土木工程师协会（America Society of Civil Engineers）Freese 讲座的主讲人，水环境联盟（WEF）Harrison Prescott Eddy 奖获得者，Morgan 及 Gascoigne 奖获得者，他还是美国国家工程院（National Academy Engineering, NAE）院士。

南希·G·洛夫：博士，注册工程师，美国密歇根大学（University of Michigan）土木环境工程系教授和系主任。2008 年之前，她是弗吉尼亚工学院（Virginia Polytechnic Institute）及弗吉尼亚技术学院和州立大学（Virginia Polytechnic Institute and State University）土木环境工程系的教师。Love 博士的著作涵盖了生物处理工艺相关的很多课题，她在多个专业机构也非常活跃，包括环境工程及科学教授协会（AEESP），水环境联盟（WEF），水环境研究基金（WERF）以及国际水协会（IWA）。她获得的奖项包括水环境研究基金（WERF）颁发的关于水质研究创新及应用的 Paul L. Busch 奖，水环境联盟（WEF）颁发的 Harrison Prescott Eddy 奖章，Rudolfs 工业废物管理奖等。

卡洛斯·D·M·菲利普：加拿大安大略省 McMaster 大学化学工程系副教授和副系主任。他在开始学术生涯之前，曾在加拿大 CH2M HILL 公司任职。他的研究兴趣很广泛，从生物处理系统数学模型，到基因工程应用及生物加工工艺。Filipe 博士是水环境联盟（WEF）颁发的 Harrison Prescott Eddy 奖获得者和美国环境工程及科学教授协会（AEESP）2000 年度 Parsons 工程和科学博士论文奖获得者。

目 录

译者序 (原著第三版)

前言

作者介绍

第 I 部分	绪论和背景	1
第 1 章	生物处理分类	3
1.1	生物处理的作用	3
1.2	分类标准	5
1.3	生物处理常用名称	8
1.4	要点	26
1.5	习题	26
第 2 章	生物处理的基本原理	28
2.1	生物处理概述	28
2.2	微生物的主要种类和作用	29
2.3	生物处理中的微生态系统	32
2.4	生物处理中的重要过程	43
2.5	要点	58
2.6	习题	59
第 3 章	好氧/缺氧生物处理化学计量学和反应动力学	68
3.1	化学计量学及反应速率归一化	68
3.2	生物量增长和基质利用	72
3.3	维护、内源代谢、衰退、溶胞及死亡	92
3.4	溶解性微生物产物的形成	96
3.5	溶解性的颗粒态和高分子有机质	97
3.6	氨化和氨的利用	99
3.7	磷的摄取和释放	99
3.8	简化的计量方程及其应用	103
3.9	温度的影响	105
3.10	要点	108
3.11	习题	110
第 II 部分	理论：理想悬浮生长式反应器模型	121
第 4 章	悬浮生长式系统模型	123
4.1	微生物系统模型	123

4.2	质量平衡方程	124
4.3	反应器类型	124
4.4	非理想反应器模型	129
4.5	要点	132
4.6	习题	133
第 5 章	单级连续搅拌反应器：异养微生物好氧生长和溶解性基质	135
5.1	连续搅拌式反应器的基本模型	135
5.2	基本模型的扩展	153
5.3	动力学参数的影响	165
5.4	生物量排出和回流	165
5.5	要点	167
5.6	习题	168
第 6 章	单级连续搅拌反应器：复合微生物活性	171
6.1	IWA 活性污泥模型	172
6.2	颗粒态基质的影响	180
6.3	硝化及其影响	184
6.4	反硝化及其影响	190
6.5	复合过程	194
6.6	要点	198
6.7	习题	199
第 7 章	复杂系统中复合型微生物过程	204
7.1	模拟复杂系统	204
7.2	传统和高纯氧曝气活性污泥法	207
7.3	多点进水活性污泥法	214
7.4	接触稳定活性污泥法	220
7.5	Ludzack-Ettinger 改进工艺	227
7.6	四级 Bardenpho 工艺	234
7.7	生物除磷工艺	236
7.8	序批式反应器	245
7.9	要点	252
7.10	习题	254
第 8 章	厌氧处理工艺化学计量学和动力学及模拟	259
8.1	厌氧生物处理化学计量学	259
8.2	厌氧过程动力学	264
8.3	厌氧消化 ADM1 模型	269
8.4	要点	274
8.5	习题	275
第 9 章	评估动力学和化学计量学参数的方法	279
9.1	处理可行性研究	279
9.2	第 5 章所述包括传统衰减的简单溶解性基质模型	280

9.3	缺乏活性部分数据情况下包含传统衰减的简单溶解性基质模型	287
9.4	利用批处理反应器确定单一基质的 Monod 动力学参数	290
9.5	包括溶胞的复杂基质模型: 如第 6 章所述衰减-再生模式 (ASM1 模型) ...	292
9.6	利用传统测量方法近似表征模型中废水特征	299
9.7	要点	303
9.8	习题	304
第Ⅲ部分 应用: 悬浮生长式反应器		311
第 10 章 悬浮生长式工艺的设计和评价		313
10.1	指导性原则	313
10.2	工艺设计和评价的反复性	314
10.3	设计和评价中的基本选择	315
10.4	设计和评价步骤	323
10.5	要点	332
10.6	习题	333
第 11 章 活性污泥工艺		336
11.1	工艺概述	336
11.2	影响工艺性能的因素	340
11.3	工艺设计	352
11.4	工艺运行	392
11.5	要点	399
11.6	习题	402
第 12 章 生物法去除营养物质		408
12.1	工艺概述	408
12.2	工艺性能影响因素	416
12.3	工艺设计	423
12.4	工艺运行	447
12.5	要点	448
12.6	习题	450
第 13 章 好氧消化		458
13.1	工艺描述	458
13.2	影响因素	469
13.3	工艺设计	475
13.4	工艺运行	480
13.5	要点	481
13.6	习题	482
第 14 章 厌氧工艺		487
14.1	工艺概述	487
14.2	影响因素	501
14.3	工艺设计	517

14.4	工艺运行	525
14.5	要点	527
14.6	习题	530
第 15 章	生物塘	537
15.1	工艺概述	537
15.2	影响因素	544
15.3	工艺设计	550
15.4	工艺运行	562
15.5	要点	563
15.6	习题	563
第 IV 部分	理论：理想附着生长式反应器	569
第 16 章	生物膜模型	571
16.1	生物膜的特性	571
16.2	传质限制的影响	575
16.3	多种限制性营养物的影响	595
16.4	多物种生物膜	597
16.5	生物膜的多维数学模型	601
16.6	要点	602
16.7	习题	604
第 17 章	生物膜反应器	609
17.1	填充塔	609
17.2	转盘反应器	629
17.3	要点	641
17.4	习题	642
第 18 章	流化床生物反应器	646
18.1	流化床生物反应器概述	646
18.2	流化作用	649
18.3	流化床生物反应器模型	658
18.4	流化床生物反应器的理论性能	662
18.5	确定流化床生物反应器的尺寸	664
18.6	要点	665
18.7	习题	666
第 V 部分	应用：附着生长式反应器	671
第 19 章	滴滤池	673
19.1	工艺概述	673
19.2	影响因素	682
19.3	工艺设计	694

19.4	工艺运行	709
19.5	要点	711
19.6	习题	713
第 20 章	转盘生物接触器	718
20.1	工艺概述	718
20.2	影响因素	723
20.3	工艺设计	730
20.4	工艺运行	743
20.5	要点	744
20.6	习题	745
第 21 章	淹没式附着生长生物反应器	749
21.1	工艺概述	749
21.2	影响因素	760
21.3	工艺设计	768
21.4	工艺运行	778
21.5	要点	779
21.6	习题	780
第 VI 部分	未来的挑战	787
第 22 章	异型生物性有机化合物的影响和处理方向	789
22.1	生物降解	789
22.2	非生物去除机理	793
22.3	生物去除与非生物去除的相对重要性	797
22.4	异型生物性有机化合物的影响	799
22.5	异型生物性有机化合物处理的经验	801
22.6	要点	803
22.7	习题	804
第 23 章	可持续性的系统设计	810
23.1	可持续性的定义	810
23.2	提高水资源可利用性的技术	814
23.3	降低能耗及化学品消耗的技术	816
23.4	实现资源回收的技术	823
23.5	结束语	825
23.6	要点	825
23.7	习题	827
附录 A	缩写词	830
附录 B	符号	834
附录 C	单位换算	851

第 I 部分 绪论和背景

与任何学科一样，研究废水处理系统中发生的生物处理过程，需要理解所用到的术语。第 1 章的目的就是，根据所发生的生物化学转化过程、所处的环境条件和所采用的反应器构型，介绍相关的术语，以便表征生物处理的性质。此章还介绍了生物处理中主要的转化过程，包括各种工艺流程。应用数学模型能够极大地促进工程设计，因为数学模型能够定量描述生物处理系统的效能。然而，构建这类数学模型，一定要从基础层次理解所包含的各种微生物的行为模式。第 2 章解释了生物处理过程中，微生态系统内各种微生物之间发生的复杂的相互作用，以及这些相互作用的鉴别方法，这对于认识数学模型的简化特性相当关键，因为它可以促进模型的合理使用。最后，构建数学模型，需要掌握生物处理中，主要生化反应的化学计量学和动力学知识。第 3 章对此进行了介绍。

