



污水生物处理

——原理、设计与模拟

[丹]Mogens Henze [荷]Mark C.M. van Loosdrecht

[南非]George A.Ekama [荷]Damir Brdjanovic

施汉昌 胡志荣 周 军 陈光浩 译

编

中国建筑工业出版社

污水生物处理

——原理、设计与模拟

[丹] Mogens Henze [荷] Mark C. M. van Loosdrecht 编
[南非] George A. Ekama [荷] Damir Brdjanovic
施汉昌 胡志荣 周 军 陈光浩 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2011-2002号

图书在版编目 (CIP) 数据

污水生物处理——原理、设计与模拟/[丹] Mogens Henze 等编,
施汉昌等译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 4
ISBN 978-7-112-12905-8

I. ①污… II. ①M…②施… III. ①生物处理 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 030227 号

Biological Wastewater Treatment; *Principles, Modelling and Design*/M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama and D. Brdjanovic

Copyright © IWA Publishing 2010

This translation of *Biological Wastewater Treatment; Principles, Modelling and Design* is published by arrangement with IWA Publishing of Alliance House, 12 Caxton Street, London, SW1H 0QS, UK, www.iwapublishing.com

Chinese translation copyright © 2011 China Architecture & Building Press

All rights reserved.

本书经 IWA Publishing 授权我社翻译出版。

责任编辑: 于莉 孙炼 田启铭

责任设计: 赵明霞

责任校对: 陈晶晶 关健

污水生物处理

——原理、设计与模拟

[丹] Mogens Henze [荷] Mark C. M. van Loosdrecht 编

[南非] George A. Ekama [荷] Damir Brdjanovic

施汉昌 胡志荣 周军 陈光浩 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/16 印张: 31 $\frac{3}{4}$ 字数: 852 千字

2011年9月第一版 2011年9月第一次印刷

定价: 118.00 元 (含光盘)

ISBN 978-7-112-12905-8

(20179)

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)

前言

在过去的二十年中，对污水处理的理解和认识已经取得了巨大的进展，研究方法也由以经验为主转变为包含化学、微生物学、物理及生化工程和数学等“基本原理”为基础的研究方法。许多这样的进展已经成熟到可以用计算机模拟的数学模型来表达。对于正在进入污水处理行业的年青一代的科学家和工程师，这些新发展在数量、复杂性和多样性方面对他们来说是很难短期内掌握的，特别是对于缺少污水处理高级教程的发展中国家。为了弥补这些不足，本书整合了污水处理领域国际著名研究机构十多位教授的研究生教材，他们对污水处理技术的进步作出过重要的贡献。

本书在污水处理方面形成了部分基于网络的课程，可以作为教授的演讲稿、图片展示材料使用，也可以作为学生的练习指南。通过完成本课程，学生可以深入理解和丰富专业知识，从而在更自信的基础之上把包括活性污泥、生物脱氮除磷、二沉池及生物膜系统的知识与现代模拟相结合的方法应用于污水处理厂的设计与运行。

本书及有关的创新材料是在联合国教科文组织-水力教育研究所有关水教育与研究的合作关

系 (PoWER) 框架下产生的。该种合作关系 (PoWER) 可为广大发展中国家的个人和组织提供以需求为导向的适时且合格的研究生教育、合作研究和能力建设服务。

本书在联合国教科文组织-水力教育研究所和韩国水资源公司 (K-Water) 的慷慨赞助下得以出版。

本书特别感谢一些人的贡献，包括 Jetze Heun, Atem Ramsundersingh, Caroline Figueres, Jan Herman Koster, Kyul Ho Kwak, Nahm-Chung Jung, Byung-goon Kim, Peter Stroo, Hans Emeis, Vincent Becker, Angela Lorena Pinzón Pardo, Loreen Ople Villacorte, Assiyeh A. Tabatabai, Claire Taylor, Michael Dunn, Michelle Jones, David Burns 等。当然，还包括本书的所有作者。

此外，我们感谢捐助者允许本书使用他们的数据、图片及照片。

最后，编者期盼您能从生物污水处理的学习中受益，并将该理念运用于改善全球卫生条件的实践中。

编者

中文版前言

2008年9月《污水生物处理：原理、设计与模拟》在维也纳的世界水大会上面世，并被列为联合国教科文组织-水力教育研究所有关水教育与研究合作关系（PoWER）框架下的教材，受到国际水处理界的广泛重视。本书由四位著名教授 Mogens Henze（丹麦理工大学）、Mark C. M. van Loosdrecht（荷兰代尔夫特大学）、George A. Ekama（南非开普敦大学）和 Damir Brdjanovic（联合国教科文组织荷兰国际水教育研究所）编著。包括四位编著者在内的18位在污水生物处理领域长期从事研究和教学工作，并对污水生物处理理论与技术的发展作出突出贡献的专家教授历时两年撰写而成。

污水生物处理经历了从碳源污染物的降解到氮磷营养物的去除，进而发展到去除水中的微量有毒有害物质的阶段，其复杂程度已经不能仅仅凭借以往的经验来把握。《污水生物处理：原理、设计与模拟》一书提供了以化学、微生物学、物理学与数学等基本原理为基础对污水生物处理过程深入理解的方法以及运用数学模型进行计算机模拟的理论基础。书中各章不仅对污水处理的各个重要技术环节进行了精辟的论述，而且图文并茂，便于各类读者阅读。

近年来，中国的污水处理事业发展迅速，特别是对于污水脱氮除磷的要求日益严格，使广大科技人员对污水生物处理技术理论的学习需求愈加强烈。2009年经由加拿大 EnviroSim Associates Ltd 的胡志荣博士介绍，并与国际水协出版社

（IWA publishing）和联合国教科文组织荷兰国际水教育研究所负责该项目的 Brdjanovic 教授的协调下，中国建筑工业出版社获得了翻译此书和出版中文译本的授权。随后中国建筑工业出版社委托胡志荣博士和施汉昌教授组织工作组进行翻译。旨在为国内环境工程领域的学者、工程技术人员和在校学生提供一本高水平的参考书。

《污水生物处理：原理、设计与模拟》的中文译本由施汉昌负责统稿，施汉昌、胡志荣、周军和陈光浩负责对译稿初稿进行了仔细的审阅和详细修改以及最后定稿。清华大学的邱勇、刘锐、周小红和香港科技大学的江峰、吕慧、戴吉、吴迪参加了部分初译稿的组织、核对与修改工作。参加初稿翻译工作的有北京城市排水集团有限责任公司周军（前言、第1、2章）和郝二成（第3、4章），清华大学环境科学与工程系的朱磊（第5、6章）、侯艳玲（第7章）、静贺（第8、10、12章）、施慧明（第9章）、沈童刚（第11、14、15章）、熊惠磊（第13、16章）和刘静（第17、18章）。在此对所有参加翻译工作人员的辛勤劳动表示衷心的感谢。

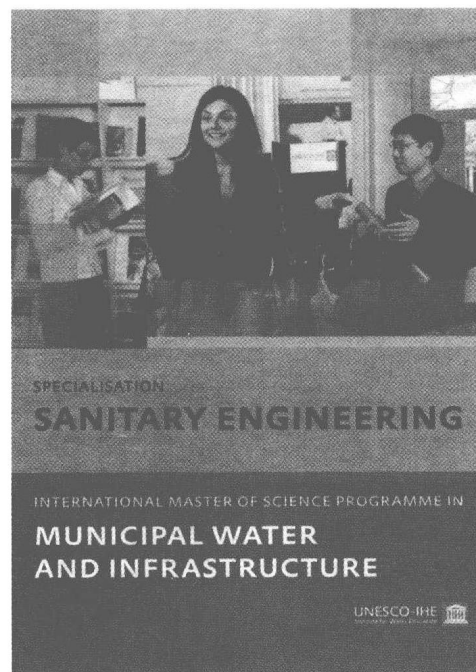
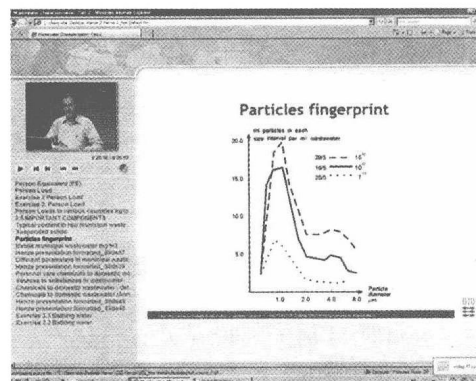
施汉昌，清华大学
胡志荣，加拿大 EnviroSim Associates Ltd
加拿大 GL 环境科技发展公司
周军，北京排水集团
陈光浩，香港科技大学
2010年8月 于北京

关于本书及在线课程

编制生物污水处理在线学习课程的想法酝酿于 2003 年，联合国教科文组织 - 水力教育研究所被荷兰政府获准同意开发新型的学习方法及产品，最终促成了水教育与研究合作关系 (PoWER) 的形成。在 PoWER 的框架下，联合国教科文组织 - 水力教育研究所在 Delft 市建立了最新型的视频会议设施。这些硬件很快变成了世界银行全球发展学习网络的一部分，而该网络与全球 120 余家公共机构保持合作关系，并一同为致力于发展的人们提供特定的学习方法设计。PoWER 规章要求除联合国教科文组织 - 水力教育研究所外至少有另外两个机构积极参与在线学习课程的制作 (本例中是墨西哥 Monterrey 大学和巴勒斯坦 Birzeit 大学)。然而，作为在线学习网络协调人 D. Brdjanovic 的最初想法是把全世界为污水处理领域进步做出突出贡献的教授都包括进来。经历了三年时间是韩国水资源公司 (K-Water) 的赞助确保了额外的资金来源，并开始了材料的准备工作。本书的概念框架及在线课程部分与 2006 年 9 月在北京召开的 IWA 世界水大会达成一致。除了各章节的写作，要求作者准备幻灯片、指南练习，并把视频演讲材料寄往联合国教科文组织 - 水力教育研究所在 Delft 的工作室，所有材料均编入 DVD，在线课程的注册者均可获得。IWA 出版机构同意出版该书并销售该书及在线学习课程。

整整两年之后，到 2008 年 9 月，《污水生物处理——原理、模型及设计》在维也纳的世界水大会上面世。在国际卫生年的大背景下，首册图书被赠予联合国秘书长水与卫生顾问委员会主席 Orange 王子殿下。

在线课程一年两次，春秋两季开始。本书同样用作联合国教科文组织水力教育研究所在市政给水排水和基础设施方面的硕士课程中卫生工程专业特别系列讲座的讲稿。本书还可以用作自学的教科书或者作为在线学习课程的主要教材。



目录

第 1 章		
污水处理的发展		1
M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama 和 D. Brdjanovic		
1.1 全球的卫生需求	1	
1.2 污水处理的历史	1	
本章参考文献	6	
致谢	6	
第 2 章		
微生物的新陈代谢		8
Y. Comeau		
2.1 简介	8	
2.2 微生物学基础	8	
2.3 化学计量学与热力学	18	
2.4 动力学	26	
本章参考文献	28	
术语表	29	
第 3 章		
污水特性		32
Mogens Henze 和 Yves Comeau		
3.1 污水来源	32	
3.2 污水成分	32	
3.3 BOD 和 COD	33	
3.4 人口当量和人均负荷	33	
3.5 重要成分	34	
3.6 特殊组分	35	
3.7 微生物	36	
3.8 特殊污水和厂内回流液	37	
3.9 比例	39	
3.10 变化	39	
3.11 污水流量	40	
3.12 传统的家庭废物	40	
3.13 家庭污水设计	41	
3.14 污水和生物组分	42	
3.15 模型变量符号	43	
3.16 污水特性的协定	49	
3.17 进水、生物反应器和出水成分举例	49	
3.18 污水的“指纹”效应性	49	
本章参考文献	51	
第 4 章		
有机物去除		52
George A. Ekama 和 Mark C. Wentzel		
4.1 概述	52	
4.2 活性污泥系统的约束条件	54	
4.3 可生物降解的物质	55	
4.4 稳态系统方程	56	
4.5 设计举例	61	
4.6 对反应器容积的要求	65	
4.7 确定反应器的 TSS 浓度	66	
4.8 碳需氧量	68	
4.9 污泥产量	69	
4.10 系统设计和控制	70	
4.11 泥龄选择	72	
本章参考文献	79	
术语表	80	
第 5 章		
氮的去除		84
George A. Ekama 和 Mark C. Wentzel		
5.1 硝化反应概述	84	
5.2 生物动力学	85	
5.3 过程动力学	87	
5.4 硝化反应的影响因素	88	
5.5 污泥生长的营养需求	95	

5.6 工艺设计	97
5.7 硝化反应设计案例	99
5.8 生物脱氮	103
5.9 设计步骤及举例	112
5.10 系统体积和需氧量	125
5.11 系统设计、运行和控制	127
本章参考文献	127
术语表	128

第6章
新型脱氮工艺 134
Mark C. M. van Loosdrecht

6.1 简介	134
6.2 侧流工艺的影响	135
6.3 氮循环	135
6.4 基于亚硝酸盐的脱氮	138
6.5 厌氧氨氧化	140
6.6 生物强化技术	143
6.7 结论	146
本章参考文献	147
术语表	148

第7章
强化生物除磷 150
Mark C. Wentzel, Yves Comeau, George
A. Ekama, Mark C. M. van Loosdrecht
和 Damir Brdjanovic

7.1 引言	150
7.2 强化生物除磷的原理	151
7.3 强化生物除磷的机理	152
7.4 强化生物除磷工艺系统的发展和优化	158
7.5 强化生物除磷数学模型的发展	166
7.6 混合培养的稳态模型	173
7.7 设计实例	180
7.8 强化生物除磷对整个工艺系统的影响	191
7.9 影响生物除磷的因素	193
7.10 NDEBPR 系统中的反硝化	198
7.11 聚糖菌 (GAOs)	201

7.12 结论和展望	203
本章参考文献	203
致谢	209
术语表	209

第8章
病原菌的去除 216
Charles P. Gerba

8.1 介绍	216
8.2 肠道病原菌的种类	216
8.3 污水中致病菌的存在状态	221
8.4 污水处理过程中致病菌及其 指示生物的去路	224
8.5 总结	234
本章参考文献	234
术语表	237

第9章
曝气与混合 239
Michael K. Stenstrom 和 Diego Rosso

9.1 曝气技术	239
9.2 鼓风系统	246
9.3 制造商提供的数据与工艺 条件之间的转换	250
9.4 可持续的曝气工程实践	256
9.5 曝气要求	260
本章参考文献	262
术语表	264

第10章
毒性 267
Jorge H. Garcia Orozco

10.1 介绍	267
10.2 毒性的测量	268
10.3 毒性基质的动力学模型	270
10.4 毒性的处理	276
10.5 总结归纳	281

本章参考文献	282	13.2 膜生物反应器 (MBR) 工艺	329
术语表	282	13.3 膜处理装置的设计	337
第 11 章		13.4 商业化的膜技术	340
污泥膨胀		13.5 iMBR 案例研究	345
Mark C. M. van Loosdrecht, Antonio M. Martins	285	本章参考文献	350
和 George A. Ekama		术语表	350
11.1 简介	285	第 14 章	
11.2 历史回溯	287	活性污泥工艺的模拟	
11.3 形态学和生态生理学的关系	287	Mark C. M. van Loosdrecht, George A. Ekama,	353
11.4 丝状菌的特征及识别	289	Mark C. Wentzel, Damir Brdjanovic 和 Christine	
11.5 目前解释污泥膨胀的一般理论	290	M. Hooijmans	
11.6 控制措施	292	14.1 什么是模型	353
11.7 数学模型	296	14.2 模拟的必要性	356
11.8 颗粒污泥	297	14.3 模拟的基础	358
11.9 结论	298	14.4 生物动力学模型的演化和发展: ASM1	364
本章参考文献	298	14.5 ASM3	369
术语表	300	14.6 新陈代谢模型	371
第 12 章		14.7 活性污泥模型的发展历史	373
二次沉淀		14.8 模拟环境	377
Imre Takács 和 George A. Ekama	302	14.9 结论	378
12.1 介绍	302	本章参考文献	378
12.2 实践中的沉淀池构型	304	术语表	380
12.3 污泥沉淀能力的测量	310	第 15 章	
12.4 预测沉淀池能力的通量理论	310	过程控制	
12.5 通量理论与其他设计和		Gustaf Olsson	383
运行方法综述	318	15.1 研究的动力和动机	383
12.6 二沉池模拟	322	15.2 污水处理系统中的扰动	384
12.7 设计案例	324	15.3 控制及自动化所担当的角色	387
本章参考文献	326	15.4 仪表及监测	388
术语表	327	15.5 动态的重要性	390
第 13 章		15.6 调节变量及执行器	391
膜生物反应器		15.7 基本的控制概念	393
Simon Judd, Byung-goon Kim 和 Gary Amy	328	15.8 污水处理系统中的反馈控制案例	394
13.1 膜分离原理	328	15.9 基于控制的运行费用的节省	398
		15.10 综合和全厂控制	399
		15.11 结论	400

本章参考文献	401
术语表	402

第 16 章
厌氧污水处理 404
Jules B. van Lier, Nidal Mahmoud 和
Grietje Zeeman

16.1 污水处理的可持续性	404
16.2 厌氧转化微生物学	406
16.3 预测 CH ₄ 的产量	412
16.4 不同电子受体的影响	415
16.5 COD 平衡计算	418
16.6 固定化和颗粒污泥	419
16.7 厌氧反应器系统	421
16.8 上流式厌氧污泥床 (UASB) 反应器	430
16.9 厌氧过程动力学	433
16.10 厌氧技术处理生活和城市污水	434
本章参考文献	438
术语表	441

第 17 章
生物膜工艺的模拟 445
Eberhard Morgenroth

17.1 什么是生物膜?	445
17.2 生物膜模拟的目的及如何选择适宜的数学模拟方法?	446

17.3 假设单一限制基质且忽略外部传质阻力的生物膜模拟方法	447
17.4 使用 $J_{LF} = F(C_{LF})$ 预测生物膜反应器的运行情况	456
17.5 外传质阻力的影响	457
17.6 与生物膜脱附相结合的生长和衰亡过程	459
17.7 导出的参数	461
17.8 多组分扩散	466
17.9 限制性基质、微生物竞争以及反应器运行中基质可利用性的含义	469
17.10 2D/3D 结构如何影响生物膜性能	472
17.11 模型参数	473
17.12 模拟工具	475
本章参考文献	477
致谢	479

第 18 章
生物膜反应器 480
Eberhard Morgenroth

18.1 生物膜反应器	480
18.2 设计参数	487
18.3 如何确定最大设计流量或者设计负荷率	489
18.4 其他设计条件	494
本章参考文献	494
致谢	495
术语表	496



第 1 章 污水处理的发展

M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama 和 D. Brdjanovic

1.1 全球的卫生需求

2007 年在《英国医学杂志》发起的评比中，卫生设施的进步被评为过去 166 年中最伟大的医学进步（Ferriman, 2007）。这也证实了适度卫生在实现与保持公众身体健康方面所起的极其重要的作用。在许多工业化国家，污水从各个家庭安全地输送出来。然而，在许多发展中国家，并非总有适当的污水处理。到目前为止，污水处理卫生设施的覆盖率尚低于供水设施。对适度卫生的需求已被列入联合国千年发展目标。目标中第七项强烈要求将全球范围内生活在无适当卫生设施条件下的人口数量减半。尽管取得了显著的成效，但是有关卫生目标的进展依然非常缓慢和滞后。意识到卫生设施对公众健康、减少贫困、促进经济与社会发展以及保护环境方面的作用，联合国会员大会宣布 2008 年为世界卫生年。目标是吸引全球对所有民众享受卫生设施需求的关注。此重要性不仅在于将民众与卫生联系在一起，而且使这种联系在环境可持续方面得以延续。排水管网与污水处理厂已被证明在输送并处理致病菌、有

机污染物和营养物质方面非常有效。然而，它们需要良好的运行与维护，并对它们所涉及的各种过程有良好的理解。

1.2 污水处理的历史

污水处理在 20 世纪取得了显著的发展。在城市扩张过程中，很长一段时间内污水被认为是对健康的潜在威胁和损害。人类排泄物的肥料价值很早就已被认知。古希腊（公元前 300 年～公元 500 年）已使用连接着排水管的公共厕所，管道可将污水和雨水排至城市外部的低洼地，砖砌的管道将洼地中的污水输送至农田为作物及果树灌溉和施肥。这些排水管道定期用污水冲洗。

古罗马人走得更远：大约公元前 800 年他们建造了 Cloaca Maxima。起初，这些重要的土地排水系统是用于排干沼泽，在这片原来的沼泽地上建立了罗马城。到公元 100 年，排水系统已基本完善，排水管已连接到部分民居。管道系统供水

的同时把公共浴室和厕所的污水通过城市地下排水管道输送至台伯河。街道定期由管道系统取水冲洗并将污物冲入排水管。

该系统的有效运转依赖于一个高效率的政府和一支强大军队的保护。伴随着罗马帝国的衰亡,其卫生设施随之衰败。因此公元450~1750年被认为是“卫生方面的黑暗世纪”(Wolfe, 1999)。在此期间,固体废弃物的主要处理方式是扔到街道上,经常可见有人从临街二层窗户向外倒垃圾。1800年前后,固体废弃物收集系统在许多城市出现,主要是那些不愿再忍受恶臭的城市居民施加了压力。这也得到了城市周边农民的欢迎,他们能充分利用这些“农家肥”。在阿姆斯特丹,一种推车游走于大街小巷,收集各家各户垃圾桶中的污物。具有讽刺意味的是,这种推车的名字取自当时一种知名法国科隆香水:Boldoot。然而,运输过程和倒空污物桶时的溅溢无法避免,恶臭对市民的影响并无明显改善。自那时起,建设综合排水管网的计划被提上日程。但排水管网冲洗和维护的高昂费用和不确定性使计划迟迟不能实施。

1900年Liernur先生提出了解决方案。他提出分别收集粪便水、灰水和雨水。粪便水通过Liernur系统(J. M. van Bemmelen, 1868)的真空排水管收集。欧洲的一些城镇也采用了该系统(图1-1)。

被收集的污水并未进行任何处理。相反,污水被当做肥料施在农田中。这样,农田内涝成为主要问题。而且城市持续的扩张使得在周边很难找到充足的土地。使用“微生物”可能是一种好方法的观点开始逐渐被人们接受(Cooper, 2001)。

在美国和英国,微生物已作为水质净化者在生物滤池中发挥作用——河床中的砾石上长出了生物膜。1893年诞生于英国曼彻斯特附近的索尔福德的生物滤池是最早的生物滤池之一。美国最早生物滤池于1901年在威斯康星州的麦迪逊市建成。1895年至1920年期间英国建设了许多处理城市污水的生物滤池。这种快速发展的趋势对

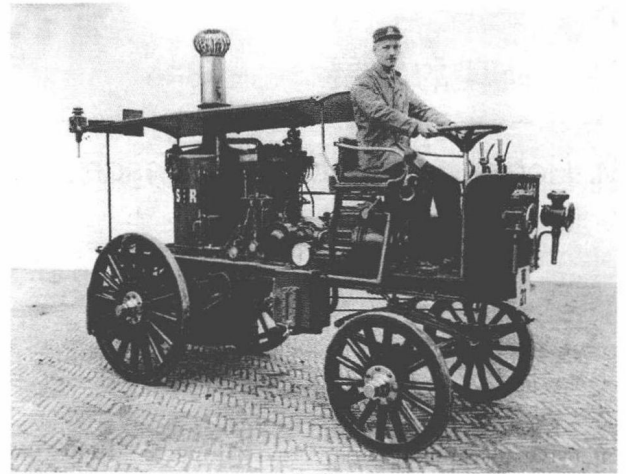
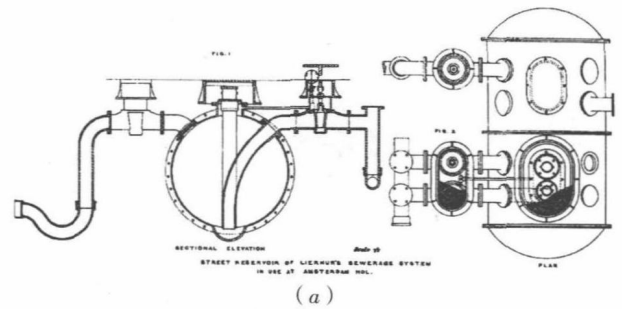


图1-1 Liernur真空排水系统(a)和用来收集运输废物的汽车(b)(引自:van Lohuizen, 2006)

1913年在英国诞生的活性污泥法产生了负面影响——投资费已被用于建造生物滤池。

1913年在英国出现了活性污泥法——在进水—排水反应器(今天的SBR的前身)处理污水的实验中得到高质量的出水,由此认为污泥已被活化,仿照活性炭的命名方式命名为“活性污泥法”(Ardern和Lockett, 1914)。

20世纪上半叶,接纳污水的河流也被认为是污水处理的组成部分。这也是生化需氧量(BOD)的测量中以5天计的原因。因为5天是英国河流入海的最长时间。Phelps(1944)所著的《河流卫生学》中使用基于氧垂曲线的数学模型计算了防止污水排放点下游某一点溶解氧(DO)低于最低值时的最大有机负荷。伴随着城市的快速发展,很快就发现河流无法消纳永远增长的有机负荷。与之相对应,产生了对高效污水处理技术的强烈需求。为降低河流的需氧量并消除氨氮对水生

物的毒性作用，硝化工艺应运而生。这导致在美国、欧洲及南非建设了大量以有机物去除和硝化为目标的低负荷滴滤池。为处理初沉污泥及滴滤池污泥，滴滤池的后面常建有厌氧消化池。人们认为污水处理厂排放的硝酸盐可以很好地防止排放河流及湖泊的厌氧状况。然而，滴滤池并非总能完全硝化，特别是在冬季，因为有机物的去除效率要求总是优先于氨氮。

20 世纪下半叶地表水的富营养化问题日益突出。富营养化的特征是排入河流的氮 (N) 和磷 (P) 引起的藻类及其他水生植物大规模的生长。到 20 世纪 60 年代人们已清楚地意识到为限制富营养化必须去除污水中的氮、磷。60 年代开展了大量的研究计划，细菌学和生物能量学被用于污水处理的研究。通过应用来自细菌学领域的 Monod (1949) 动力学，Downing (1964) 等人指出硝化作用依赖于自养硝化菌的最大比增长速率，该速率低于异养菌的比增长速率。对于实际的污水处理厂，这意味着为保证出水的低氨氮浓度必须保持足够长的污泥龄。Monod 动力学在污水领域的成功使其在今天所有的污水处理模型中仍被使用，不仅用于模拟硝化过程并且包括其他许多生物过程。McCarty (1964) 将生物能量学提升到一个新的高度，他发现硝化作用产生的硝酸盐可被某些异养细菌利用转化为氮气。这一认识促进了硝化-反硝化活性污泥系统的产生，即为了进行反硝化，反应器的某些部分不曝气。瑞士的 Wurhmann (1964) 提出了后置反硝化，在曝气池后设非曝气（缺氧）池，同时为促进反硝化而投加甲醇。由于该工艺出水总氮含量低因而在美国被广泛采用。但是投加甲醇耗资不菲，同时污水中先去除有机物然后再加有机物相互矛盾，Ludzack 和 Ettinger (1962) 提出的前置反硝化更合乎逻辑。Barnard 于 1972 在南非提出的 4 段式 Bardenpho 工艺中将前置、后置反硝化结合在一起，并引入回流控制进入前置反硝化池的硝酸盐含量。通过以上革新，包含除氮功能的活性污泥法成为普遍应用的技术。

Pasveer (1959) 在 Ardern 和 Lockett 所设计

的进水—排水工艺的基础上开始了新的技术探索。Pasveer 专注于经济型的污水处理工艺系统。他开发的氧化沟系统仅有一个处理单元，无初沉池、二沉池、消化池等。伴随着连续进水，在进水—排水的过程中发生了同步硝化与反硝化。该系统的简单、低耗使其被广泛采用。在 Pasveer 的氧化沟之后，其他连续运行的氧化沟系统陆续产生，基本设计理念相同但没有单独的二沉池。

为了控制富营养化单独除氮还远远不够。来自洗涤剂 and 人类排泄物中以正磷酸盐形式存在的磷同样需要被去除，因为在许多生态系统中磷已被证明是富营养化的主要因子。与氮不同，磷只有转化至固相才能被去除。20 世纪 70 年代在深度处理中开始出现化学加药沉淀除磷。在水资源缺乏的地区，如美国西南各州、南非、澳大利亚等地，地表水的非直接再用程度已经非常高，污水经深度化学除磷后的排放将导致地表水的盐度快速升高。抛开地表水盐度降低其农业使用价值的问题不谈，盐度对供水系统的耐久性有更大的影响。为减轻这些影响，南非在 60 年代末和 70 年代初的水政策是在避免地表水富营养化和盐度升高基础上实现全部的污水回用和再分配，即如果排放到环境中所需化学除磷的代价高昂，所有水将回用并返回供水系统而不是排放到环境中 (Bolitho, 1975; van Vuuren 等人, 1975)。

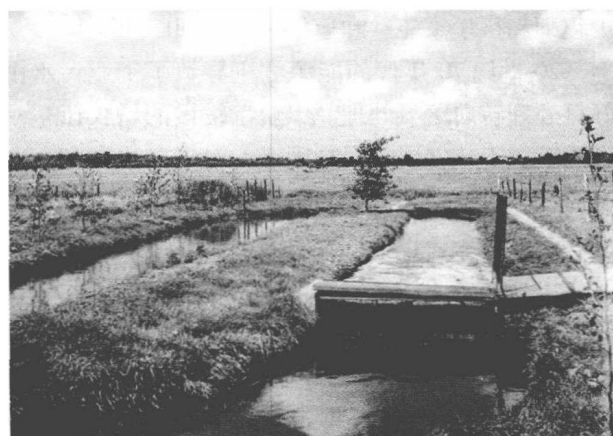


图 1-2 第一座 Pasveer 氧化沟系统 (1954 Voorschoten, 荷兰) 旱季处理能力为 400P. E. 和 $40\text{m}^3/\text{h}$ (引自: van Lohuizen, 2006)。

生物除磷作为一种独特的生物过程是被偶然发现的。印度的 Srinath (1959) 等人最早描述了污水处理过程中的生物除磷现象。他们观察到某些特定污水处理厂的污泥在曝气时表现出超量(超过细胞生长所需)的磷吸收现象。这说明磷吸收是一种生物过程(受毒性物质和氧需求的限制)。随后这种所谓的强化生物除磷过程(EBPR)在其他(推流式)污水处理厂也被发现。在过程机理并不明晰的情况下第一个生物除磷工艺(PhoStrip[®])产生了(Levin and Shapiro, 1965)。20世纪70年代早期由于能源危机的发生,推动了硝酸盐去除和节能两项需求的快速增长,人们发现生物除磷过程相对比较容易激发。例如在1974年,在亚历山大污水处理厂为优化除氮将进水末端的曝气器关闭, Nicholls (1975) 发现出水磷与硝酸盐均很低。他还发现沉降至池体底部的污泥层磷酸盐含量很高,这是由于原污水密度高于上清液沉降所致。Barnard (1976) 提出了生物超量除磷的 Phoredox 原理,即在活性污泥系统中引入厌氧、好氧的交替。EBPR 现在已是一种确定的工艺,这给在不增加水体盐度条件下磷的去除和回收开辟了机会,因此所处理的污水可排放到环境或进行有效的回用。往往有这样的情况,创新偶然出现之后随之跟进的是对其深入的分析工作。南非、加拿大和欧洲花了多年时间进行研究试图全面了解和控制生物处理过程,但仍有某些方面不清楚。然而,对潜在规律没有完全掌握并未阻碍工程师和科学家建造和运行污水处理厂。

20世纪70年代的能源危机导致了工业污水由好氧处理转向厌氧处理。甲烷菌缓慢的增长速率一直是厌氧工艺发展的限制因素。对于高浓度和高水温的废水厌氧工艺已不是问题, Lettinga 及合作者(Lettinga 等人, 1980)发明的上流式污泥床反应器(UASB)代表了厌氧处理的一大突破。该工艺不仅适合于工业废水处理,而且也适用于热带地区,如南美、非洲和亚洲等地的低浓度市政污水处理。

在建设了污水处理厂的一个世纪以后,许多以往远离市区的污水厂已被居民区吞没。污水厂的扩张已困难重重,工程师们开始寻找更加紧凑的处理工艺。而且,工业领域开始自己处理工业

废水。对工业而言,土地的利用要求甚至比市政方面更为苛刻。一个成功的工艺路线是返回先前的基于生物膜的反应器。所发明的各种新工艺(曝气生物滤池,流化床反应器,悬浮式反应器,生物转盘,颗粒化污泥工艺或移动床反应器)克服了滴滤池工艺的旧有问题。

以上这些工艺的发展可追溯至20世纪70年代。在此期间另一条工艺路线直到最近的十年才广泛采用:膜分离代替沉淀池的活性污泥法。

伴随着越来越高的出水要求,旧厂改造而非建新厂的需求日益增加。这导致了在世纪之交针对现有污水处理厂的改造开发了大量综合性的新工艺。这些工艺解决了剩余污泥厌氧消化中释放出来的大量的氮磷问题。传统上富含高浓度氮磷的消化液回流至活性污泥系统,除鸟粪石沉淀除去部分氮磷外,当脱水滤液回流至进水会导致大量的氮磷在污水处理厂中循环,使活性污泥系统出水氮磷含量升高。对此问题的研究催生了许多脱水滤液处理的新工艺。在荷兰,开发的新工艺包括 SHARON[®], ANAMMOX, BABE[®]工艺等,均能提高对氮的去除和改善用于磷回收和再用的磷的矿化过程(鸟粪石沉淀)。

污水处理厂运行的一个重要方面一直是其可控性。这包括直接过程控制和间接控制,例如污泥的沉降性或生物膜的生长。从污水处理一开始工艺过程控制就是一个限制因素。Arden, Lockett 和 Pasveer 均试图采用进水—排水循环池内的沉淀方式减少费用。这需要实现工艺自动化。当时缺乏可靠的工艺控制器是阻碍这些工艺连续化且大规模使用的主要原因。只是在过去几十年里工艺控制变得足够可靠以后,序批式反应器才重新得到重视。更严格的出水水质要求,加上节约资源的要求,以及越来越复杂的污水处理厂,这些都推动了化学加药、曝气控制和回流等工艺控制的需求。虽然在污水处理的早期数学模型已有所发展,只有低价的个人电脑开始普及,统一标准的活性污泥模型面世后数学模型才开始得到大规模的应用(Henze 等人, 1987)。

污泥性质的间接控制一直是一个关注点。由某些特定细菌引发的污泥膨胀和泡沫问题广受重视。

使用选择器控制丝状菌取得了许多成功的案例。然而，微丝菌还是经常给脱氮除磷系统带来问题。尽管已有的许多研究确实对污泥膨胀的成因及控制有很大帮助，但是现在仍无法量化预测不同活性污泥系统污泥的沉降性。这意味着污水厂不得不建设大一些的二沉池应对某些时候污泥沉降性较差的情形。近年来对生物膜和污泥的形态学认识突飞猛进，二者大有融合之势。理论研究的一个成果是好氧颗粒污泥可被看做一种极端条件下的丝状污泥或生物膜的一种特殊形式（Beun 等人，1999）。

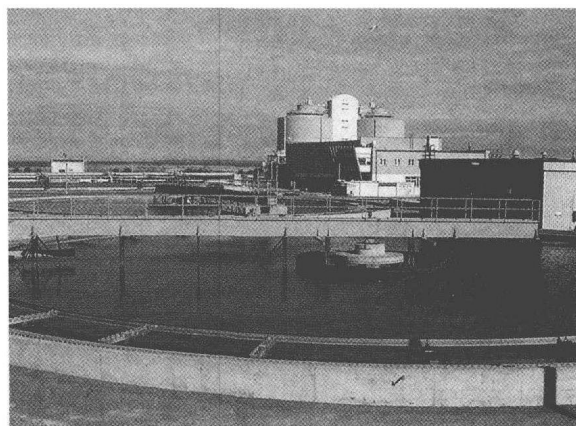
另一个主要的关注点是污水及污泥的消毒以及环境可持续化的污泥处理与处置。污水中包含大量致病菌是 150 年前开始建设大规模排水管网和污水处理厂的真正原因。人们多少有些健忘，20 世纪中期才开始对污水厂出水进行消毒。后来消毒措施部分停止是因为污水加氯产生致癌物质。再后来某些地区重新采用过滤、紫外及臭氧的方法进行消毒。伴随着污水回用的发展和对更加个性化污水处理工艺的追求，消毒近来被给予新的关注。由于可能传播致病菌，污泥的最终处置存在健康风险。随着食品安全标准的日趋严格，现在污泥处置的农业土地利用方法越来越受到限制，污泥处理就更显得重要。尤其是污泥的脱水性和脱水污泥的减量问题已经成为研究的重点。在污泥可以被有效地脱水时，污泥焚烧就可能成为一种回收污泥中蕴含能量的方法。

对污水处理的要求日益增多，现在人们更加关注有潜在内分泌干扰效应并有可能累积在水循

环或影响自然生态系统的微污染物质。水资源的短缺必将导致水再生和回用技术的持续进步和实施，例如纳米比亚，新加坡和加利福尼亚。水回用不仅仅限于缺水地区，在西欧等水资源丰富区域按照当地法规及其他要求，工业上采用污水厂出水而不是天然水体作为水源，在经济上更加合算。随着岁月的流逝技术在不断进步，经过一个多世纪各自独立的发展，污水处理和饮用水处理相互变得越来越接近。

最后，在污水收集和处理中的一个主要的问题是培训和教育新一代的工程师和科学家。让这些工程师和科学家去设计新的污水厂，改造老的污水厂，让操作人员去运行管理，达到污水厂技术与工艺最新的极限。这对于某些由于政治经济的不确定性导致与发达国家有技术差距的发展中国家尤为关键。通过过去 30 年的技术发展，污水处理的专业范围已经从单一的土木工程领域向一个基于更多的工艺工程和微生物学的领域扩展。很多大学设立了环境工程的课程把这些领域综合在一起。今天，所有这些工艺及技术综合在一起创造了复杂的处理系统，而这些系统的复杂性则要求使用数学模型。因此，我们今天拥有了前所未有的复杂的污水处理系统。这确实令人困惑，无数的公司试图推广他们的独有技术和工艺加剧了这种困惑。其实所有的工艺和技术都遵循相同的基本原理，正如这种说法：“细菌并不知道池子的形状和工艺的名称，只要有硝酸盐、碳源和氧气不存在的条件，它就在那儿反硝化。”

一座用于从城市（塔林，爱沙尼亚）污水中去除有机物（COD），氮（N）和磷（P）的现代化污水处理厂（引自：D. Brdjanovic）。



本章参考文献

- Ardern E. and Lockett W.T. (1914) Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters. *J. Soc Chem Ind.*, 33, 523.
- Barnard J.L. (1973) Biological denitrification. *Water Pollut. Control*, 72, 705-720.
- Barnard J.L. (1976) A review of biological phosphorus removal in the activated sludge process. *Water SA* 2(3), 136-144.
- Beun J.J., Hendriks A, van Loosdrecht M.C.M., Morgenroth M, Wilderer P.A., Heijnen J.J. (1999). Aerobic granulation in a sequencing batch reactor. *Water Res* 33(10), 2283-2290.
- Bolitho V.N. (1975) Economic aspects of wastewater treatment in South Africa. *Water SA*, 1(3) 118-120.
- Chudoba J., Grau P., Ottova V. (1973) Control of activated sludge filamentous bulking. II. Selection of microorganisms by means of a selector. *Water Research*, 7(10), 1389-1406.
- Cooper P.F. (2001) Historical aspects of wastewater treatment. In *Decentralized sanitation and reuse: concepts, systems and Implementation*. Edited by Lens P., Zeeman G. and Lettinga G., IWA Publishing, London (UK), 11-38.
- Downing A.L., Painter H.A. and Knowles G. (1964) Nitrification in the activated sludge process. *J. Proc. Inst. Sewage Purif.*, 64(2), 130-158.
- Ferriman A. BMJ readers choose the "sanitary revolution" as greatest medical advance since 1840 (2007) *BMJ*, 334 (111), doi:10.1136/bmj.39097.611806.DB
- Henze M., Grady C.P.L.jr., Gujer W., Marais G.V.R., Matsuo T. (1987) Activated Sludge Model No. 1, IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1. London, UK
- Lettinga G., van Velsen A.F.M., Hobma S.W., De Zeeuw, W. and Klapwijk A. (1980) Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnol. Bioeng.* 22, 699-734.
- Levin G.V., Shapiro J. (1965) Metabolic uptake of phosphorus by wastewater organisms *J Water Pollut Control Fed*, 37, 800-821
- Ludzack F.J. and Ettinger M.B. (1962) Controlling operation to minimize activated sludge effluent nitrogen. *J Wat Pollut. Control Fed.*, 34,920-931.
- McCarty P.L. (1964). Thermodynamics of biological synthesis and growth. *Procs. 2nd Intl Conf on Water Pollution Control.*, 2, 169-199.
- Monod J. (1950) Technique of continuous culture – theory and application. *Ann. Inst. Pasteur.* 79, 167.
- Nicholls H.A. (1975) Full scale experimentation on the new Johannesburg extended aeration plants. *Water SA* 1(3), 121-132.
- Pasveer A. (1959) A contribution to the development in activated sludge treatment. *J. Proc. Inst. Sew. Purif.* 4, 436.
- Phelps E.B, (1944) *Stream Sanitation*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Srinath E.G., Sastry, C.A., Pillai, S.C. Rapid removal of phosphorus from sewage by activated sludge (1959) *Experientia*, 15(9), 339-340.
- Van Bemmelen J.M. (1868) Het stelsel Liernur - Voor den afvoer der faecale stoffen in de steden, *De Economist* 17(1), 401-440.
- Van Vuuren L.R.J. (1975) Water reclamation – quality targets and economic considerations. *Water SA* 1(3), 133-143.
- Wuhrmann K. (1964) Hauptwirkungen und Wechselwirkungen einiger Betriebsparameter Belebtschlammesystem: Ergebnisse mehrjähriger grossversuche. *Schweizerische Zeitschrift für hydrologie*, XXVI(2) 218.

致谢

本章作者感谢 Mariska Ronteltap 对本章导论所作的贡献。



Harnaspolder 厂是一座大型污水处理厂（131 万人口当量），该厂收集和来自 Den Hague 区域的污水。这是荷兰第一座由政府 and 私人联合投资建设的污水处理厂。（照片：鸟瞰图由 Delfluent B. V 提供）