

城镇污水处理及 再生利用工艺 分析与评价

陈 珺/编著
王洪臣/审



中国建筑工业出版社

城镇污水处理及再生利用 工艺分析与评价

陈 珺 编著
王洪臣 审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城镇污水处理及再生利用工艺分析与评价/陈珺编
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 2
ISBN 978-7-112-13935-4

I. ①城… II. ①陈… III. ①城市污水处理
②城市污水-废水综合利用 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 282956 号

本书系统全面地对城镇污水处理与再生利用的主流技术进行了分析与评价, 这些技术主要包括: 传统活性污泥工艺、A²/O 及其变型工艺、SBR 工艺、氧化沟工艺、多点进水工艺、IFAS 工艺、MBBR 工艺、曝气生物滤池及反硝化滤池、MBR 工艺、沉淀技术、过滤技术以及消毒工艺, 分析及评价的主要内容涉及出水水质、工艺性能、技术风险、典型设备、成本以及适用场合等多个方面。全书还介绍了 42 个经典案例, 这些案例来自世界各地, 内容翔实, 实用性强, 具有很好的参考价值。

本书可供给水排水专业、环境工程、市政工程专业的相关技术决策者参考, 对从事污水及再生利用科研、规划、设计的技术人员具有较强的指导意义, 对于从事污水再生利用工程管理、运行的技术人员也有较高的参考价值, 也可作为相关专业大专院校师生的教学参考书。

* * *

责任编辑: 于 莉
责任设计: 张 虹
责任校对: 张 颖 刘 钰

城镇污水处理及再生利用工艺分析与评价

陈 珺 编著

王洪臣 审

*

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

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 字数: 390 千字

2012 年 3 月第一版 2012 年 3 月第一次印刷

定价: 42.00 元

ISBN 978-7-112-13935-4
(21953)

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

德国技术伦理学家胡比希曾经说过：“政治家想达到技术的目的，工程师想达到技术的指标，消费者想达到技术的功能，无人对技术的恶用负责，出现问题也互相推诿”。污水处理工艺选择时往往是这样。在技术的百花园中，我们究竟该选择哪种技术？

很显然，技术分析与评价是技术选择的基础，没有客观严谨的分析和评价，就无从谈起科学合理的技术选择。“技术评价”一词最早由美国前议员 E. 戴达利在 1966 年美国国会的一份报告中提出。技术评价是指充分评价和估计技术对技术的性能、水平和经济效益及技术对环境、生态乃至整个社会、经济、政治、文化和心理等可能产生的各种影响，在技术被应用之前就对它进行评价，进行全面系统分析，权衡利弊，从而作出合理的选择。

本书正是基于上述的疑问和定义对当今城市污水处理与再生利用中的主流工艺技术进行系统的分析评价，旨在阐明各种技术的工艺性能和适用场所。世界是多元的，世界的差异性造就了技术的多样性，不可能有普适的污水处理工艺。所谓“兵无常势，水无常形”，从洛杉矶到巴黎，从北京到东京，各个地区的污水处理情况必然是不同的，这不仅体现在地理位置的不同，人们的生活习惯、气候的差异都会对工艺的选择产生影响。即使是在同一个城市，由于管网收集范围的不同、处理规模的大小、接纳工业废水的比例、可用土地面积的多少、周边环境的要求等因素的影响，各个污水处理厂的工艺选择也应该因地制宜，不应该盲目选用某一种工艺。世界上没有两座完全相同的污水处理厂，就如同世界上没有两片完全相同的树叶一样。

技术评价是科技管理工作的重要组成部分，是推动国家科技事业持续健康发展，促进科技资源优化配置，提高科技管理水平的重要手段和保障，希望本书的出版能引起污水处理工作者的思考。

感谢美国 Black & Veatch 公司的 James Barnard、加州洛杉矶县卫生区的汤继诚、美国 Tetra Tech 公司的江瑞原、威立雅水务公司的崔成武、美国北卡罗来纳州 North Cary 再生水厂的 Chris Parish、DHV 公司的 Paul Janssen、美国 GHD 公司的 Rhodes R. Copithorn、加州大学戴维斯分校 J. Darby、英国克兰菲尔德大学的 Simon Judd、南非开普敦大学的 George Ekama、加拿大马尼托巴大学的 J. Oleszkiewicz、中国人民大学环境学院齐鲁等人所提供的资料和帮助。感谢聂莉莹对全书的辛勤校对。

污水处理技术日新月异，各地污水处理厂的运行实践更是不断地丰富着污水处理的内容，作者愿与广大污水处理工作者进行广泛的交流，来信可发至 chenjunly@gmail.com。由于作者水平有限，书中错漏难免，恳请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 传统活性污泥工艺	1
1.1 工艺概述	1
1.1.1 早期发展	1
1.1.2 工艺构成	2
1.2 工艺性能	3
1.2.1 进水水质	3
1.2.2 有机物的去除	3
1.2.3 硝化	4
1.2.4 卫生学指标的去除	6
1.3 工艺影响因素	7
1.3.1 泥龄 (SRT)	7
1.3.2 供氧	9
1.3.3 温度的影响	10
1.3.4 污泥回流	10
1.3.5 污泥的沉降性能	11
1.3.6 产泥量	13
1.4 典型案例	14
1.4.1 北京高碑店污水处理厂	14
1.4.2 美国芝加哥 Stickney 污水处理厂	14
1.5 应用评价	15
第 2 章 A^2/O 及其变型工艺	16
2.1 工艺概述	16
2.1.1 A^2/O 工艺的早期发展	16
2.1.2 A^2/O 工艺	19
2.1.3 A^2/O 变型工艺的发展	20
2.2 工艺性能	24
2.2.1 碳源	24
2.2.2 泥龄 (SRT)	26
2.2.3 DO 的影响	27
2.2.4 厌氧、缺氧、好氧的容积	28
2.2.5 污泥回流及内回流	28
2.2.6 温度、pH 以及碱度	29
2.2.7 出水 SS 的影响	30
2.3 典型案例	30
2.3.1 北京北小河污水处理厂	30
2.3.2 北京清河污水处理厂与小红门污水处理厂	32

2.3.3	美国 Palmetto 污水处理厂	32
2.3.4	加拿大 Bonnybrook 污水处理厂	34
2.3.5	加拿大 Pine Creek 污水处理厂	36
2.4	应用评价	38
第 3 章	SBR 工艺	40
3.1	工艺概述	40
3.2	工艺性能	40
3.2.1	传统 SBR 工艺分析	40
3.2.2	SBR 工艺的其他变型	44
3.2.3	出水水质	47
3.2.4	典型设备	48
3.2.5	运行维护	50
3.2.6	投资与运行费用	50
3.3	典型案例	51
3.3.1	泰国曼谷 Yannawa 污水处理厂	51
3.3.2	马来西亚 Jelutong 污水处理厂	52
3.4	应用评价	53
第 4 章	氧化沟工艺	55
4.1	工艺概述	55
4.2	工艺分类	55
4.2.1	Carrousel 氧化沟	56
4.2.2	Orbal 氧化沟	57
4.2.3	交替式氧化沟	58
4.2.4	微孔曝气氧化沟	61
4.3	工艺性能	62
4.3.1	工艺流态	62
4.3.2	出水水质	62
4.3.3	典型设备	65
4.3.4	占地面积	67
4.3.5	投资与运行费用	67
4.3.6	运行维护	68
4.4	典型案例	68
4.4.1	北京酒仙桥污水处理厂	68
4.4.2	Carrousel 氧化沟案例	69
4.4.3	美国北卡罗来纳州 North Cary 再生水厂	71
4.4.4	美国 Big Gulch 污水处理厂	72
4.5	应用评价	73
4.5.1	Carrousel 氧化沟	74
4.5.2	Orbal 氧化沟	74
4.5.3	交替式氧化沟	74
4.5.4	微孔曝气氧化沟	75
第 5 章	多点进水工艺	76
5.1	工艺概述	76

5.2	工艺性能	77
5.2.1	传统多点进水工艺	77
5.2.2	多点进水生物脱氮工艺	78
5.3	典型案例	84
5.3.1	Newtown Creek 水污染控制厂	84
5.3.2	Rock Creek 污水处理厂	85
5.3.3	Lethbridge 污水处理厂	86
5.4	应用评价	88
第 6 章	IFAS 工艺	90
6.1	工艺概述	90
6.2	工艺性能	91
6.2.1	填料类型	91
6.2.2	生物处理性能	93
6.2.3	曝气	96
6.2.4	附属设备	98
6.2.5	运行维护	100
6.2.6	固定填料与悬浮填料系统的比较	101
6.3	典型案例	102
6.3.1	北京方庄污水处理厂	102
6.3.2	美国 Colony 污水处理厂	103
6.3.3	美国北布法罗河污水处理厂	105
6.3.4	美国罗德岛污水处理厂	105
6.3.5	美国布鲁姆菲尔德污水处理厂	107
6.4	应用评价	108
第 7 章	MBBR 工艺	111
7.1	工艺概述	111
7.2	工艺性能	112
7.2.1	预处理及一级处理	112
7.2.2	填料的性能	112
7.2.3	生物处理性能	113
7.2.4	温度的影响	118
7.2.5	曝气与搅拌	119
7.2.6	固液分离	120
7.3	典型案例	120
7.4	应用评价	121
7.4.1	适用场合	121
7.4.2	MBBR 与 IFAS 的选择	123
第 8 章	曝气生物滤池与反硝化滤池	124
8.1	工艺概述	124
8.1.1	简述	124
8.1.2	工艺类型	125
8.2	工艺性能	127
8.2.1	预处理和一级处理	127

8.2.2	配水系统	127
8.2.3	滤料	128
8.2.4	生物处理	129
8.2.5	出水水质	133
8.2.6	曝气	133
8.2.7	反冲洗	134
8.2.8	温度的影响	135
8.2.9	产泥量	136
8.2.10	运行维护	136
8.2.11	碳源投加及氮气释放	136
8.2.12	占地面积	137
8.2.13	投资与运行费用	137
8.3	典型案例	138
8.3.1	曝气生物滤池案例	138
8.3.2	反硝化滤池案例	140
8.4	应用评价	141
8.4.1	曝气生物滤池	141
8.4.2	反硝化滤池	142
第9章	MBR 工艺	143
9.1	工艺概述	143
9.1.1	工艺的发展	143
9.1.2	工艺的分类	143
9.2	工艺性能	144
9.2.1	预处理与一级处理	144
9.2.2	生物处理	147
9.2.3	出水水质	150
9.2.4	膜通量的影响	151
9.2.5	回流、曝气及出水系统的影响	151
9.2.6	运行维护	152
9.2.7	投资及运行能耗	154
9.2.8	占地面积	155
9.2.9	污泥处理	156
9.2.10	工艺风险	156
9.3	典型案例	158
9.3.1	德国北运河污水处理厂	158
9.3.2	北京北小河污水处理厂	159
9.3.3	美国特拉弗斯城污水处理厂	161
9.3.4	美国 Broad Run 再生水厂	163
9.4	应用评价	165
第10章	沉淀技术	167
10.1	传统重力沉淀池	167
10.1.1	工艺概述	167
10.1.2	工艺性能	167

10.1.3 应用评价	175
10.2 化学除磷	175
10.2.1 工艺概述	175
10.2.2 工艺性能	177
10.2.3 典型案例	182
10.2.4 应用评价	183
第 11 章 过滤技术	184
11.1 砂滤	184
11.1.1 工艺概述	184
11.1.2 工艺性能	185
11.1.3 典型案例	190
11.2 表面过滤	191
11.2.1 工艺概述	191
11.2.2 工艺性能	193
11.2.3 典型案例	196
11.3 膜过滤	197
11.3.1 微滤 (MF) 及超滤 (UF)	197
11.3.2 反渗透	209
11.4 应用评价	215
11.4.1 砂滤	215
11.4.2 表面过滤	216
11.4.3 膜过滤	217
第 12 章 消毒工艺	218
12.1 工艺概述	218
12.1.1 氯消毒	218
12.1.2 二氧化氯消毒	219
12.1.3 UV 消毒	219
12.1.4 臭氧消毒	221
12.2 工艺性能	224
12.2.1 剂量	224
12.2.2 进水水质	225
12.2.3 病原菌的灭活效率	228
12.2.4 投资与运行费用	228
12.2.5 消毒副产物	229
12.2.6 运行维护	230
12.3 典型案例	230
12.4 应用评价	232
12.4.1 氯消毒	232
12.4.2 二氧化氯消毒	233
12.4.3 UV 消毒	233
12.4.4 臭氧消毒	234
参考文献	236

第1章 传统活性污泥工艺

1.1 工艺概述

1.1.1 早期发展

1914年，欧洲大地上硝烟四起、战火纷飞，第一次世界大战爆发了。然而也正是这一年，英国曼彻斯特的几个年轻人却开创了一项改变人类卫生工程的伟大发明——活性污泥工艺。

活性污泥工艺的诞生其实并非一帆风顺，从最初的对污水曝气到完整工艺的形成经历了曲折的发展过程。1897年，在英国曼彻斯特大学工作的弗劳尔发现污水经过曝气之后，水就会变得清澈，同时在池底会产生沉淀的颗粒物。弗劳尔认为这种沉积下的颗粒物是试验的失败，他认为污水的净化应该是水中的成分都变为可溶性的或成为挥发性气体。1912年，弗劳尔应邀去美国解决纽约港的污染问题。在纽约的劳伦斯县，他有幸目睹了克拉克和盖奇正在进行的试验，克拉克和盖奇正在用接种了藻类的瓶子和池中放置屋面石板来比较污水曝气处理效果。

弗劳尔认为这次到访使他很受启发，他甚至称劳伦斯为污水处理的圣地。虽然早期的研究令他倍感失望，但此时他已经意识到了悬浮的生物固体对污水处理何等重要。此后，他对此投入了更多的研究精力，但他每次的试验都是将沉淀下来的污泥排出池外。

Ardern 和 Lockett 是弗劳尔的学生（图 1.1），他们将取自曼彻斯特 Davyhulme 污水处理厂的污水装在玻璃瓶里，将污水曝气、沉淀，Ardern 和 Lockett 没有像他们老师那样将曝气沉淀后的污泥全部排掉，而是留下占池容 25% 的污泥，24h 之内有机物和氨氮得到了很好的去除。Ardern 和 Lockett 的这种改进是污水处理技术的一个重大突破，可谓青出于蓝而胜于蓝。

1914年4月3日，英国化学工业协会在英国曼彻斯特召开了，Ardern 和 Lockett 提交了一篇被后世称为经典的文章，文章的题目是《无需过滤的污水氧化试验研究》，后来发表在《化学工业协会会报》上。在这篇文章里，Ardern 和 Lockett 论述了今天我们广为熟悉的活性污泥处理过程，并首次使用了“活性污泥”一词描述污水经曝气之后沉淀下来的污泥，活性污泥工艺从



图 1.1 活性污泥工艺的开创者 Ardern（后排左一）和 Lockett（前排右一）

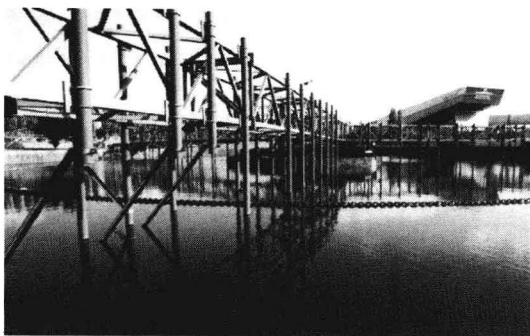


图 1.2 今日的曼彻斯特 Davyhulme 污水处理厂

此正式诞生。

Ardern 和 Lockett 的试验对活性污泥工艺的发展起到了极大的推动作用，在此后的几年内数座生产性规模的活性污泥污水处理厂在英国投入运行，但是由于第一次世界大战期间英国污水处理方面的投资受到了很大的限制，而且当时生物滤池已经是污水处理的主流形式，其前景一度不被看好。与此相比，活性污泥工艺在大西洋对岸的美国却得到了大量的应用，美国

从 1916 年起就建成了生产性规模的活性污泥工艺污水处理厂，到 1938 年的时候美国已经建设了数百个污水处理厂。

活性污泥工艺从早期到 20 世纪 70 年代的五十多年算是工艺发展的早期，这一时期基本是传统活性污泥工艺的发展。在这期间，尤其是 20 世纪 60 年代，西方国家工业化高速发展，工业废水大量进入市政污水管道，为了应对这种情况，两段式的活性污泥工艺得到了发展，这种方法是把 BOD 的去除和氨氮的去除分别在两个池子内实现，这样做的好处是在第一段可以去除有毒有害物质，从而可以保护敏感的反硝化菌。现在，工业废水处理的程度越来越高，新的污水处理厂建设已经不采用这种两段式的活性污泥工艺，单级活性污泥工艺成为应用的主流形式。

1.1.2 工艺构成

传统活性污泥工艺一般是指污水进入到曝气池的首端，回流污泥与进水一起混合进入曝气池，这里的曝气池是完全好氧状态，没有缺氧或厌氧池，如图 1.3 所示。

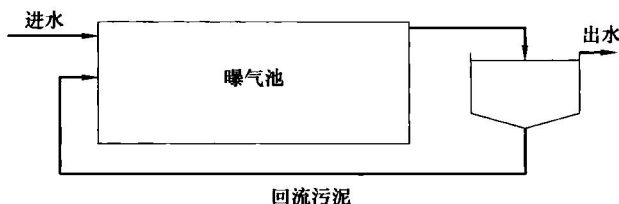


图 1.3 传统活性污泥工艺示意图

传统活性污泥工艺是最基本的活性污泥工艺，其他的各种工艺（A/O、A²/O、UCT 等工艺）都是在此基础上发展而成的。传统活性污泥工艺从诞生之日起就在经历着不断的改进、演变，譬如多点进水、渐减曝气、接触稳定都是对传统活性污泥工艺的改进，这方面的内容详见本书的其他章节。就水质而言，传统活性污泥工艺的主要目的是去除有机物和悬浮物，对于典型的生活污水，出水 BOD₅ < 20mg/L、SS < 20mg/L 是传统活性污泥工艺最基本的要求。

一般理解上传统活性污泥工艺不具备去除氨氮的能力，但在实际的污水处理厂中，经常会观察到硝化的现象，而且对于池容较为宽裕的污水处理厂，合理的优化运行调控往往能达到较为理想的硝化效果，因此本章也对硝化性能进行论述。

1.2 工艺性能

1.2.1 进水水质

传统活性污泥工艺对进水 COD 有较高的承受能力, 对于 $\text{COD} < 1000\text{mg/L}$ 的生活污水, 传统活性污泥工艺都没有问题。实际上, 即使是 $\text{COD} > 1000\text{mg/L}$ 的污水, 传统活性污泥工艺也能处理, 但这时候就可能变得不经济, 而厌氧处理方式更为合适。

BOD/COD 的高低是衡量污水可生化性的一个重要指标, 对于典型的生活污水, BOD/COD 一般在 0.4~0.5 之间, 如北京一些大型污水处理厂的进水 BOD/COD 约为 0.47, 比较容易生物降解。但工业废水的进入会导致进水组分发生明显的改变。

城市污水处理厂的进水 TN 一般在 20~85mg/L 之间, 绝大多数污水处理厂的进水 TN 通常在 40mg/L 左右, 进水 TN 的主要构成是有机氮和氨氮, 一般有机氮占 30%~40%, 氨氮占 60%~70%。

活性污泥工艺对于 TDS 很高和含盐的污水也有很好的适应能力, 不会影响到其处理效能。世界各地不少污水处理厂是位于沿海地区, 由于海水的入侵, 这些污水处理厂的进水 TDS 会达到海水 TDS 的三分之一 (10000~12000mg/L)。面对如此高的 TDS, 活性污泥工艺的硝化效果仍然不受影响, Campos 的研究结果显示, 当 NaCl 的浓度为 13.7g/L 时, 硝化速率依然不受影响。

1.2.2 有机物的去除

一般而言, 传统活性污泥工艺在进水水量、水质相对稳定的条件下可以获得良好的出水效果, 这一点已经在世界各地的污水处理厂得到证实。对于典型的生活污水, 运行良好的传统活性污泥法可以达到如下的出水水质: COD: 40~60mg/L; BOD_5 : 10~20mg/L; SS: 10~20mg/L。如果在沉淀池之后辅以过滤措施, 出水水质可以进一步降低, 一般过滤之后的出水 $\text{BOD}_5 < 5\text{mg/L}$ 、 $\text{SS} < 5\text{mg/L}$ 。

对于生活污水, COD 可以简单分为溶解性 COD 和颗粒性 COD。传统活性污泥工艺对溶解性 COD 的降解非常迅速, 水力停留时间为 2~3h 与 18~24h 对出水溶解性 COD 的影响很小, 一般只有 10~20mg/L 的差异。颗粒性 COD 降解的速度相对较慢, 这部分 COD 要么是通过沉淀方式得到去除, 要么是成为活性污泥絮体的一部分。作为活性污泥的一部分, 有机物在沉淀池沉淀之后要么是又顺着回流污泥返回到曝气池继续进行降解, 要么是通过剩余污泥排出系统。附着于污泥絮体上的颗粒性可生物降解 COD 的降解时间与泥龄有关, 虽然颗粒性可生物降解 COD 的降解速率要比溶解性可生物降解 COD 慢得多, 但由于泥龄比水力停留时间要长得多, 一般只要泥龄大于 5d, 这些物质基本都可被完全去除。

因此从泥龄上来说, 当泥龄超过 5d 时, 进水 COD 对于出水 COD 的影响已不重要, 在污水处理厂的运行实践中, 很多运行人员也会体会到即使进水 COD 明显升高时, 出水 COD 也不会受到明显的影响。

图 1.4 反映的是泥龄对 COD 和去除率的影响, 从图中可以看出在泥龄达到一定值时, 出水 COD 迅速下降, 随着泥龄的增加, 出水 COD 下降的非常缓慢, 但出水的稳定性得到很大的提高。这时候的出水 COD 通常都是难生物降解的物质, 这些物质只有通过进一

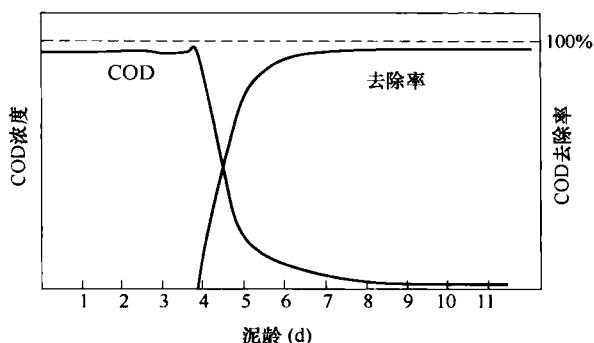


图 1.4 泥龄对 COD 和去除率的影响

步的物理化学技术才能得到去除，生物处理已经完成了应有的功能。

1.2.3 硝化

(1) 发展历程

传统活性污泥法的硝化功能在 Ardern 和 Lockett 开创活性污泥工艺之初就已经注意到了，但并没有引起关注。Sawyer 和 Bradney 是两位早期活性污泥工艺的研究者，1945 年他们在调查沉淀池漂泥现象时，对硝

化、反硝化进行了初步的研究。后来工作在英国斯蒂夫尼奇水污染实验室的 Downing 对硝化做出了里程碑式的贡献，他在 1964 年的研究结果表明，泥龄是控制硝化的关键因素。到了 70 年代，Lawrence 和 McCarty 提出基于泥龄的方法来设计活性污泥工艺，对活性污泥的发展起了很大的推动作用，Lawrence 和 McCarty 认为在进行工艺设计时泥龄的选择非常关键，泥龄的选择要考虑一定的安全因子。美国环保局的手册里也提到硝化的设计要考虑进水峰值氮负荷的影响，这些认识成为后来硝化工艺设计的基本准则。

瑞士苏黎世污水处理厂是最早对硝化有要求的污水处理厂，20 世纪 70 年代苏黎世污水处理厂要求水温在 10℃ 以上时，80% 的出水水样氨氮需低于 2mg/L。为此，该市在 1973 年发起了国际性的招标设计，很显然在当时的认知水平下，世界各地污水处理厂对硝化认识也知之甚少。为此，苏黎世污水处理厂建立了一座中试规模的处理厂，Gujer 和 Erni 在这座中试厂进行了深入细致的试验研究，他们观察到了氨氮负荷对硝化性能有显著的影响，尤其是早晨氨氮峰值负荷对出水氨氮有很大的影响。1978 年，Gujer 和 Erni 对流量、氨氮负荷、DO 以及控制方法进行了模拟。基于这些经验，活性污泥工艺的第一代动态模型在 70 年代建立起来。后来南非开普敦大学的 Gerrit Marais、Peter Dold、George Ekama 以及 Mark Wentzel 对模型的发展做出了重大的贡献，他们对污水的成分进行了更细致地划分，这些深入细致的工作为后来活性污泥模型（ASM）的建立奠定了坚实的基础。

(2) 硝化的特点

经过数十年的探索之后，目前人们对传统活性污泥工艺的硝化认识已非常透彻。对于典型的生活污水，在实现稳定充分的硝化前提下，出水氨氮一般低于 3mg/L。

与传统去除 BOD、COD 的过程不同，硝化工艺有其自身的一些特点。硝化菌是自养微生物，这类微生物的增殖速率非常缓慢，去除 BOD、COD 的异养菌最大比增殖速率 ($\hat{\mu}_H$) 一般为 3.0~13.2gVSS/(gVSS·d)，典型值一般是 6.0gVSS/(gVSS·d)，而去除氨氮的硝化菌最大比增殖速率 ($\hat{\mu}_A$) 一般为 0.2~0.90gVSS/(gVSS·d)，典型值一般是 0.75gVSS/(gVSS·d)，这比异养菌的比增殖速率低很多，不足普通异养菌生长速率的 1/5。无可否认，人类生活方式的多样性造就了污水的成分也是千差万别，对于不同的污水水质，硝化菌的比增殖速率也不尽相同，尤其是对于工业废水比例较高的城市污水， $\hat{\mu}_A$ 可能会比较低。

硝化菌的比增殖速率直接和泥龄相关，可以简单地以下式来表示：

$$SRT_m = \frac{1}{\mu_A - b_A}$$

上式中 b_A 为衰减系数，一般为常数，而且比较小。从上式可以看出，比增殖速率直接影响着泥龄，而泥龄又直接影响着硝化的效果，图 1.5 反映的是泥龄对硝化的影响。

在图 1.5 中， SRT_m 是最小泥龄， SRT_T 是理论泥龄， SRT_D 是设计泥龄。从该图中可以看出，当泥龄大于最小泥龄时，出水氨氮便会迅速降低。当进水氨氮负荷是一个恒定值的时候，泥龄只要大于理论泥龄 SRT_T 即可，但实际污水处理厂的进水氮负荷在日夜发生变化，这种变化会造成硝化工艺的不稳定。为了保持稳定的硝化性能，实际的设计泥龄都会比理论泥龄大， SRT_D/SRT_T 的比值往往又被称为安全系数，这个安全系数通常和进水峰值氮负荷与日均氮负荷的比值一致，一般介于 1.5~2.5 之间。

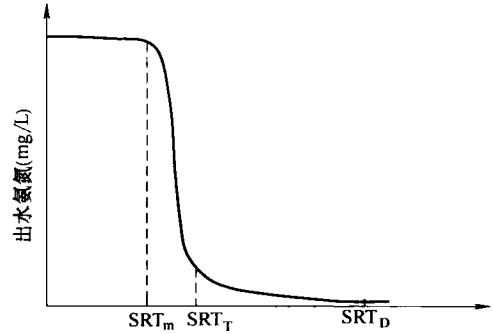


图 1.5 泥龄对硝化的影响

硝化是一个很有意思的过程，在污水处理厂的实际运行中，运行人员经常会有一种这样的感受：要么硝化很彻底，出水氨氮非常低；要么就没有硝化，出水氨氮很高，部分硝化非常不稳定。这种现象和硝化菌自身的半饱和系数 (K_n) 有关，半饱和系数是微生物达到最大生长速率一半时所需要的基质浓度，硝化菌的这个系数一般只有 1.0mg/L，根据 Monod 方程 $\mu_A = \hat{\mu}_A \cdot N / (K_n + N)$ 可以绘出一条硝化比增殖速率的曲线，这里取 $\hat{\mu}_A$ 为 0.75VSS/(VSS · d)，半饱和系数 K_n 取 1.0mg/L，如图 1.6 所示。

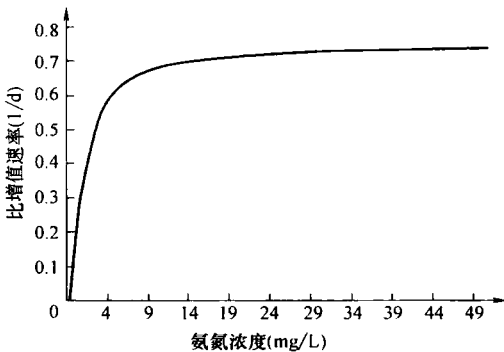


图 1.6 硝化的比增殖速率曲线

从上图可以看出，对于典型城市污水处理厂的进水氨氮，硝化菌总会达到其最大比生长速率，这也就不难理解为何硝化一旦发生便会如此彻底，同时也会明白出水氨氮达到零是非常困难的。北京高碑店污水处理厂一期工艺在 2005 年的出水氨氮很好地说明了硝化工艺的这个过程，如图 1.7 所示。从图中可以看出，出水氨氮要么非常低，要么非常高。

因此，尽管出水氨氮的标准可能会要求低于 8mg/L 即可，但一旦硝化发生，污水处理厂实际的出水氨氮一般都会低于 3mg/L。从一个大原则上来说，如果泥龄比硝化所需的最低泥龄高 20%，那么出水氨氮的高低就基本不受泥龄的影响了，而供氧、进水氮负荷的波动、pH 等因素则会成为影响硝化的另外因素。

基于上述特点，硝化的控制首先要控制好泥龄，污泥浓度只是一个参考值，不能将污泥浓度固定在一个恒定的值，那样会存在很大的技术风险。譬如，当进水有机负荷增加时，如果依然维持着曝气池不变的污泥浓度，那样排出的剩余污泥就必然较多，这样实际泥龄就下降了。这种情况对于城镇化发展迅速的地区尤为明显，这些地区的污水处理厂进

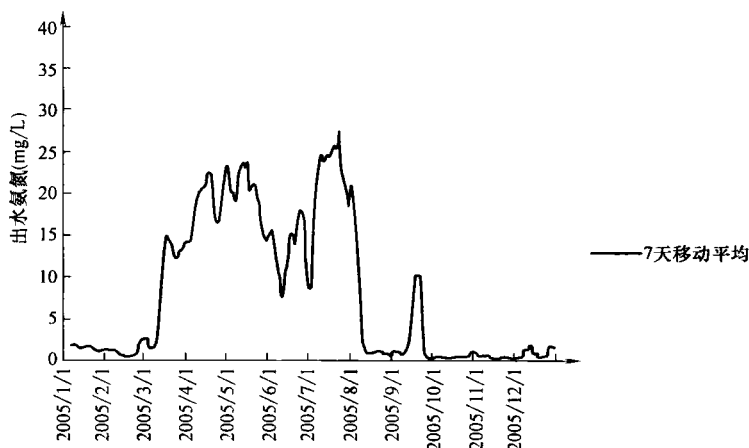


图 1.7 北京高碑店污水处理厂一期出水氨氮（2005 年）

水负荷增加的很快，如果以维持曝气池污泥浓度不变的方式来控制硝化的话，可能会在冬季丧失硝化功能。

硝化是一个消耗碱度的过程，这一点往往容易被忽视，如果碱度下降至 40mg/L (CaCO_3)，硝化效率就会变差，而且有可能引起污泥膨胀，应对这种问题的办法无非是投加石灰、提高 DO 或者设置缺氧区弥补碱度不足。譬如香港的大埔污水处理厂和新西兰的罗托鲁瓦污水处理厂，曝气池出水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 不能超过 6mg/L，超过这个值时碱度的降低会引起 pH 值的突然下降，硝化效果就会丧失殆尽。

1.2.4 卫生学指标的去除

活性污泥工艺不仅对有机物、氨氮有良好的去除效果，还对病原微生物有相当的去除效果。活性污泥工艺对病原微生物的去除主要是通过沉淀、吸附与污泥絮体结合在一起，去除效果一般为 40%~99%。

病原微生物在初沉池中的去除效率变化很大，细菌和病毒的去除效率基本很低，原生动物的去除率一般在 4%~93%之间。对于活性污泥工艺，总大肠菌和粪大肠菌的去除率都比较高，都在 90%以上，但活性污泥工艺对不同病毒的去除效率差别较大，表 1.1 反映的是活性污泥工艺对卫生学指标的去除效率。

活性污泥工艺对卫生学指标的去除效率

表 1.1

	总大肠菌	粪大肠菌	病毒	贾第鞭毛虫	隐孢子虫
原污水(个/L)	$10^8 \sim 10^9$	$10^7 \sim 10^8$	$10^5 \sim 10^6$	9000~200000	1~3960
一级处理去除率(%)	<10	35	50~98.3	27~64	0.7
二级处理去除率(%)	90~99	90~99	53~99.9	45~96.7	80~97

活性污泥工艺对蛔虫卵的去除主要是通过泥水分离来实现的，曝气过程本身对蛔虫卵、隐孢子虫和贾第鞭毛虫并没有多少去除效果。肠道微生物的去除主要是通过吸附、沉淀附着于污泥絮体上，因此污泥上的病原微生物的含量是非常高的。

1.3 工艺影响因素

1.3.1 泥龄 (SRT)

早期活性污泥工艺在设计池容时采用的都是水力停留时间 (HRT)、容积负荷、食微比 (F/M) 这些经验参数, 泥龄概念的出现是人们对活性污泥工艺认识的一大进步。理解泥龄的确切含义对于污水处理厂的设计和运行都是非常重要的, 泥龄是微生物与污染物的接触时间, 而水力停留时间是污染物与微生物的接触时间。泥龄是描述颗粒态物质在系统中的停留时间, 水力停留时间是描述液态和溶解性物质在系统中的停留时间。由于沉淀池的存在, 污泥在不断进行着回流, 泥龄要比水力停留时间长很多。

泥龄直接影响出水水质、池容和剩余污泥量。一般来说, 出水水质要求越高, 所需的泥龄越长, 曝气池的池容也越大。如果只是有机物的去除, 泥龄会比较短, 池容自然也比较小, 对水质的了解也比较简单。如果要求硝化, 就需要对污水的水质特征和动力学参数有更深入的了解, 其中最重要的参数是硝化菌最大比增殖速率和最低水温, 这两个参数都会影响到硝化所需的最低泥龄。

实际上, 泥龄的选择要根据处理目的、供氧、污泥沉降性能以及沉淀池的入流负荷来确定, 而污泥沉降和浓缩性能往往是污泥浓度选择的最直接影响因素, 同时泥龄的选择一般要留有安全余地, 要保证活性污泥能够进行良好的絮凝沉淀。在热带地区, 泥龄可以很短, 通常低于 5d。而在寒冷的地区, 泥龄往往又很长, 可以达到 15d 以上。

一般而言, 对于以 BOD 或 COD 为去除目的的活性污泥工艺, 泥龄在 1~3d 之间就可以获得 75%~90% 的去除率。但为了使活性污泥能够良好地絮凝, 泥龄一般都会比这长一些。以去除有机物为目的时, 传统活性污泥工艺一般不考虑硝化, 但对于热带地区或夏季炎热的时候, 传统活性污泥工艺发生硝化在所难免。北京北小河污水处理厂曾经是一座采用传统活性污泥工艺的污水处理厂, 泥龄比较短, 只考虑有机物的去除, 但在每年夏季 7~9 月之间依然会出现一定程度的硝化现象, 如图 1.8 所示。

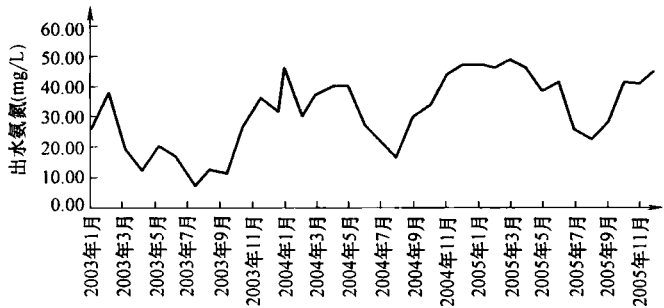


图 1.8 北京北小河污水处理厂出水氨氮 (2003~2005 年)

因此, 当今的传统活性污泥工艺设计都要确保工艺能够实现稳定的硝化, 此外还会在曝气池的前端适当设置一段缺氧区 (20%左右), 这样只是略微增加了泥龄, 但可以降低鼓风机曝气的能耗、回收碱度, 降低沉淀池反硝化漂泥的风险。北京早期建设的北小河污水处理厂、高碑店污水处理厂都是采用的这种工艺。

对于延时曝气工艺, 泥龄的选择不只是为了实现稳定的硝化, 更重要的是实现污泥的

稳定化，污泥中的有机成分需要降低至很低的水平，污泥不再散发出难闻的气味，此时工艺的泥龄至少在 30d 以上，能耗非常高。

从运行控制上来说，活性污泥系统的优化只有在泥龄得到优化的基础上才能实现。泥龄太短，会观察到大片的絮体和松散的污泥颗粒，絮体比较轻，像绒毛似的，总是漂浮在沉淀池的水面上，这种污泥沉淀缓慢，很容易受到水力作用流出沉淀池。泥龄越长，出水的氨氮也越低，而且更耐日常的氮负荷冲击，但太长的泥龄会引起供氧量上升，增加处理成本，而且可能会产生低 F/M 引起的丝状菌膨胀、沉淀池超负荷、污泥灰分化等问题。实际上，对于现在的污水处理厂，硝化是一个基本的要求，泥龄的选择必须满足充分硝化的前提。如果泥龄能够实现充分的硝化，那么对于有机物的去除和生物脱氮除磷都已经足够，太长的泥龄没有必要。因此泥龄的运行优化原则是：如果污泥稳定化不需要，泥龄应该在保证充分硝化的基础上尽量小。

对于污水处理厂的设计而言，人们往往会关心水力停留时间的长短，忽视泥龄的作用。譬如，对于两个进水 COD 负荷相同的处理厂，运行的泥龄也一样，其中一个是小水量、高 COD 的处理厂，另外一个是大水量、低 COD 的处理厂。如果按照相同的水力停留时间 ($HRT=V/Q$) 来设计，则小水量、高 COD 的污水处理厂的池容就必然小于大水量、低 COD 的污水处理厂的池容，但活性污泥工艺曝气池中的污泥量只依赖于进水 COD 负荷和泥龄，这样这两座污水处理厂生物池内的污泥量就会相同，直接的结果就是小水量、高 COD 的污水处理厂生物池内的污泥浓度会比较高，这样可能对二沉池的泥水分离造成影响。因此，对于实际污水处理厂的设计和运行而言，泥龄是最重要的参数，水力停留时间并不重要。

由于泥龄是相对长效的控制方法，一般按平均值进行控制，剩余污泥的排放次数应当根据泥龄的相对长短进行选择，对于短泥龄的系统，可以一天多排，每次排放量少一些，切忌一次大幅度地排泥。对于长泥龄的系统，剩余污泥可以一天排放一次。泥龄的控制属于长效控制，通常需要 2~3 个泥龄时间才能观察到泥龄改变所引起的系统性能的变化，排泥的一个基本原则应是使 MLSS 浓度的变化幅度不要超过 5%~10%。

泥龄的控制方法有根据 MLSS 直接分析控制泥龄、根据 MLSS 的离心分析控制泥龄和水力方式控制泥龄。根据 MLSS 分析控制泥龄是污水处理厂最常见的手段，采用这种方式需要直接测定活性污泥系统中的污泥浓度和剩余污泥浓度，然后计算泥龄。这种方法的主要问题是剩余污泥浓度在排放前不知道，需要对剩余污泥进行估算，MLSS 分析耗时较长；离心分析经常用来减少 MLSS 分析相关的时间滞后，污泥样品放在离心管，在标准速度下和标准时间内进行离心，然后测定离心产生的固体体积，同时用平行样品对污泥浓度进行测定，并且与离心管中固体体积进行关联。这种关系可以作为离心分析法估算 MLSS 浓度的标准曲线。这种方法的优点是测定迅速，减少了采样和分析的时间滞后，减少了 MLSS 分析的时间，标准时间需要定期校准。

水力方式控制泥龄指的是从曝气池直接排泥，这是最简单的泥龄控制方法，无需测试污泥浓度，而且对于控制泡沫也很有益。如果出水中的悬浮固体可以忽略不计的话，可以按照曝气池的体积比例来排放剩余污泥，譬如泥龄是 9d，则排放曝气池体积的 1/9。南非绝大多数的脱氮除磷污水处理厂都是采用这种水力方式控制泥龄。这种方式对于泥龄大于 5d 的污水处理厂比较合适，如果泥龄太短，二沉池内污泥比例会较高，影响泥龄控制的