

HUOXING WUNIFA  
WUSHUI CHULICHANG SHUZHUA  
YU ZHINENG KONGZHI

# 活性污泥法 污水处理厂数字化 与智能控制

孙培德 陈一波 王剑乔 等著



化学工业出版社

# 活性污泥法 污水处理厂数字化 与智能控制

孙培德 陈一波 王剑乔 等著



化学工业出版社

### 图书在版编目 (CIP) 数据

活性污泥法污水处理厂数字化与智能控制/孙培德, 陈一波, 王剑乔等著. —北京: 化学工业出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-122-18873-1

I. ①活… II. ①孙…②陈…③王… III. ①活性污泥处理-污水处理厂-数字化②活性污泥处理-污水处理厂-智能控制  
IV. ①X505

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 259168 号

---

责任编辑: 刘兴春  
责任校对: 陶燕华

文字编辑: 荣世芳  
装帧设计: 关飞

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司  
装 订: 三河市宇新装订厂  
787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 366 千字 2014 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 85.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

活性污泥法是污水处理中较成熟的生物处理工艺，目前多数城市污水处理厂都广泛采用活性污泥法作为主要的生物处理工艺，于是，工艺的设计对于城市污水处理厂的建设显得尤其重要。而活性污泥系统的模型化对污水处理设计和研究具有重要的指导意义，其准确的数学模型可以较全面地描述活性污泥系统内的各种反应过程，从而优化工艺设计。同时，对于活性污泥法工艺及环境条件的实时精确调控也是当前该领域的前沿性基础课题。

浙江工商大学孙培德教授领导的水污染模拟与控制技术课题组长期从事活性污泥系统生物转化机理与数字化及智能控制技术研究，取得了较显著的成就。基于国际水协的 ASM<sub>s</sub> 系列模型，原创性提出了活性污泥系统不同菌群相互作用机制的生物转化理论，实现了对污水中碳、氮、磷生物转化过程的细观机理描述，先后建立了全耦合活性污泥 FCASM<sub>1</sub>、FCASM<sub>2</sub>、FCASM<sub>3</sub>、FCASM<sub>4</sub> 系列模型；并将生物模型与水力场、温度场模型耦合，建立了 FCASM<sub>4</sub>-Hydro-Temp 耦合模型，既可反映生物场与环境场间的相互作用，又具有时空分布特征，在此基础上应用耦合模型对污水处理厂 A/A/O、A/O、氧化沟、SBR 等工艺进行了大规模的工程验证与工艺优化研究。结合嵌入式系统成功开发的小试 SBR 污水处理设备，自动优化与控制工艺参数，实现了控制过程的智能化、精细化和自动化，推动了污水处理厂数字化及智能化进程。

本书集成了孙培德教授及其团队多年的研究成果，全面概括了活性污泥模型领域的发展，系统深入地阐述了 FCASM<sub>s</sub> 模型的建立、验证及应用方法，以及活性污泥工艺智能化实时自动化控制方法，旨在为活性污泥法污水处理厂的发展提供一条可行的、高效的、科学的新路子。

本书共分为 9 章：第 1 章概论，内容主要包括活性污泥法生物去除机理研究进展，活性污泥法生物场数学模型研究进展，活性污泥反应器水力学模型研究进展，活性污泥法温度场模型研究进展，活性污泥法多场耦合模型研究进展，二沉池模型研究进展，污水处理厂过程优化与实时控制的研究进展；第 2 章全耦合活性污泥系列模型 FCASM<sub>s</sub>，主要介绍 FCASM<sub>s</sub> 模型建立及动力学与化学计量学；第 3 章活性污泥系统多场耦合模型，内容主要包括生物场-水力场耦合模型、生物场-水力场-温

度场耦合模型；第4章主要阐述了污水处理厂A/A/O工艺的FCASM3-Hydro-Temp耦合模型的建立、校核验证及优化研究；第5章主要阐述污水处理厂A/O工艺的FCASM3-Hydro耦合模型的建立、校核验证及工艺优化研究；第6章主要阐述污水处理厂氧化沟工艺的FCASM4-Hydro-Temp耦合模型的建立、校核验证及工艺优化研究；第7章介绍“水蚯蚓-微生物共生系统”数值模拟及工艺优化，主要内容包括“水蚯蚓-微生物共生系统”细观耦合模型的建立、校验及应用，“水蚯蚓-微生物共生系统”泥水同步降解机理新模型建立、校验及应用；第8章主要介绍嵌入式系统与智能化控制系统；第9章为污水处理厂SBR工艺数字化与智能控制，内容主要包括污水处理厂SBR工艺的FCASM4-Hydro-Temp耦合模型建立及其校验，污水处理厂SBR工艺数字化与智能控制研究。

《活性污泥法污水处理厂数字化与智能控制》主要由浙江工商大学环境科学与工程学院孙培德教授著，宋英琦、王如意、陈一波、王剑乔等参加了相关课题研究并参与了著作的部分撰写工作。本书不仅是一本凝结着本课题组集体智慧的学术研究成果，也是一本具有科技进步意义的学术著作。

由于著者水平有限，加以时间仓促，书中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

著者

2013年9月

# 目 录

## 1 概 论 /1

1.1	引言 .....	3
1.2	活性污泥法生物去除机理研究进展 .....	3
1.2.1	水解机理 .....	3
1.2.2	有机物质生物去除机理 .....	3
1.2.3	生物脱氮机理 .....	5
1.2.4	生物除磷机理 .....	6
1.3	活性污泥法生物场数学模型 .....	7
1.3.1	传统活性污泥法生物动力学模型 .....	7
1.3.2	活性污泥法结构化模型研究进展 .....	10
1.4	活性污泥反应器水力学模型 .....	16
1.4.1	理想流动模型 .....	16
1.4.2	非理想流动模型 .....	16
1.5	活性污泥法温度场模型研究进展 .....	17
1.6	活性污泥法多场耦合模型 .....	18
1.6.1	生物场-水力场耦合模型 .....	19
1.6.2	生物场-水力场-温度场耦合模型 .....	20
1.6.3	生物场-物化场耦合模型 .....	20
1.7	二沉池模型研究进展 .....	20
1.7.1	一维沉淀模型 .....	21
1.7.2	二维、三维模型 .....	21
1.7.3	改进的沉淀池模型 .....	22
1.8	污水处理厂 SBR 工艺实时控制的研究进展 .....	22
1.8.1	传统的固定时间优化控制 (Fixed-Time Control, FTC) 策略 .....	22
1.8.2	实时优化控制策略 .....	23
1.8.3	智能控制策略 (Intelligent Control Strategy) .....	24

1.9 讨论与小结 .....	25
参考文献 .....	26

## 2 全耦合活性污泥系列模型 FCASMs /35

2.1 概述 .....	37
2.2 FCASM2 模型 .....	38
2.2.1 模型建模思想 .....	38
2.2.2 模型组分定义 .....	38
2.2.3 子过程分割 .....	40
2.3 FCASM3 模型 .....	45
2.3.1 模型假设 .....	45
2.3.2 模型组分与子过程分割 .....	46
2.4 FCASM4 模型 .....	64
2.4.1 模型概述 .....	64
2.4.2 活性污泥系统生物场新模型假设 .....	64
2.4.3 模型各生物反应过程 .....	64
参考文献 .....	88

## 3 活性污泥系统多场耦合模型 /91

3.1 概述 .....	93
3.2 生物场-水力场耦合模型 .....	93
3.2.1 Lee 模型 .....	93
3.2.2 FCASM2-Hydro 耦合模型 .....	95
3.3 生物场-水力场-温度场耦合模型 .....	97
3.3.1 General 模型 .....	97
3.3.2 FCASM3-Hydro-Temp 耦合模型 .....	102
参考文献 .....	106

## 4 污水处理厂 A/A/O 工艺数值模拟及优化 /107

4.1 概述 .....	109
4.2 A/A/O 污水处理系统的工艺简介 .....	109
4.3 A/A/O 污水处理系统的 FCASM3-Hydro-Temp 耦合模型 .....	110
4.3.1 A/A/O 工艺 FCASM3-Hydro-Temp 耦合模型假设 .....	110
4.3.2 A/A/O 工艺 FCASM3-Hydro-Temp 耦合模型建立 .....	110
4.4 污水处理厂 A/A/O 工艺模型校核与验证 .....	114
4.4.1 数值模拟方法 .....	114
4.4.2 数值模拟结果分析 .....	114

4.5	污水处理厂 A/A/O 工艺优化分析	123
-----	--------------------	-----

## 5 污水处理厂 A/O 工艺数值模拟及优化 /129

5.1	概述	131
5.2	污水处理厂 A/O 工艺简介	131
5.3	污水处理厂 A/O 工艺的 FCASM3-Hydro 耦合模型	132
5.3.1	A/O 工艺 FCASM3-Hydro 耦合模型假设	132
5.3.2	A/O 工艺 FCASM3-Hydro 耦合模型建立	132
5.4	污水处理厂 A/O 工艺模型校核与验证	133
5.4.1	数值模拟方法	133
5.4.2	数值模拟结果分析	134
5.5	污水处理厂 A/O 工艺优化分析	139
5.6	讨论与小结	145
	参考文献	145

## 6 污水处理厂氧化沟工艺数值模拟及优化 /147

6.1	概述	149
6.2	氧化沟工艺污水处理厂概况	149
6.3	氧化沟工艺污水处理厂现场试验研究	150
6.3.1	常规水质指标监测	150
6.3.2	进水水质特征监测	151
6.3.3	水力弥散系数的测定	153
6.4	氧化沟工艺污水处理厂多场耦合模型校核验证	155
6.4.1	氧化沟工艺模型数值模拟方法	155
6.4.2	FCASM4-Temp 耦合模型参数校核	157
6.4.3	FCASM4-Temp 耦合模型数值模拟验证	159
6.4.4	FCASM4-Hydro-Temp 耦合模型数值模拟结果	161
6.4.5	低水温多因素正交模拟试验研究	163

## 7 污水处理厂污泥减量工艺数值模拟及优化 /167

7.1	概述	169
7.2	“水蚯蚓-微生物共生系统”细观机理耦合模型	170
7.2.1	模型假设	170
7.2.2	“水蚯蚓-微生物共生系统”细观机理模型建立	171
7.2.3	“水蚯蚓-微生物共生系统”细观机理耦合模型校验	175
7.2.4	Unitank 工艺数值模拟应用	179
7.2.5	交替 SBR 工艺数值模拟应用	185



7.3	污水处理厂新型氧化沟工艺数值模拟及优化 .....	189
7.3.1	“水蚯蚓-微生物共生系统”泥水同步降解机理模型建立 .....	189
7.3.2	“水蚯蚓-微生物共生系统”泥水同步降解机理模型校验 .....	191
7.3.3	新型氧化沟工艺数值模拟应用 .....	197

## 8 污水处理厂数字化与智能控制基础 /205

8.1	嵌入式系统基本概念 .....	207
8.2	执行标准 .....	207
8.2.1	机械架构 .....	208
8.2.2	电气架构 .....	209
8.2.3	软件架构 .....	209
8.3	编程方法 .....	209
8.3.1	LabVIEW 概述 .....	209
8.3.2	LabVIEW 特点 .....	210
8.3.3	LabVIEW 运算形式 .....	210
8.3.4	LabVIEW 与 Matlab 混合编程 .....	212
8.4	自动化仪表 .....	218
8.4.1	控制器 .....	218
8.4.2	执行器 .....	218
8.4.3	检测变送器 .....	219

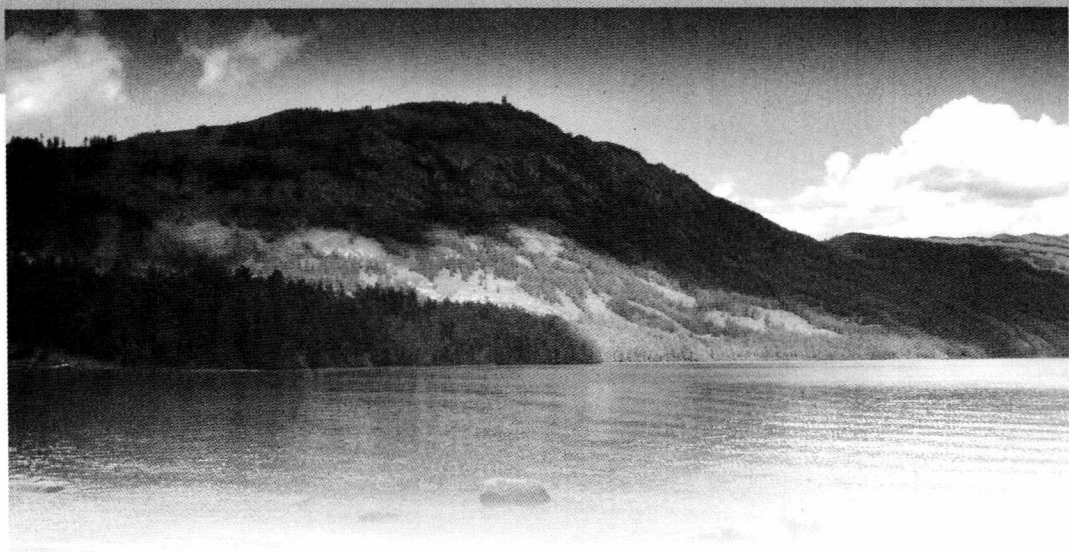
## 9 SBR 工艺数字化与智能控制 /223

9.1	概述 .....	225
9.2	SBR 工艺简介 .....	225
9.3	SBR 工艺生物场耦合模型及其校验 .....	226
9.3.1	SBR 工艺生物场耦合模型假设 .....	226
9.3.2	SBR 工艺生物场耦合模型建立 .....	226
9.3.3	SBR 工艺生物场耦合模型校验 .....	227
9.4	智能化 SBR 污水处理系统设计与实现 .....	233
9.4.1	控制策略开发 .....	233
9.4.2	软件开发 .....	234
9.4.3	软硬件集成 .....	237
9.4.4	智能化 SBR 污水处理系统介绍 .....	240
9.4.5	智能化 SBR 污水处理系统应用研究 .....	243
9.4.6	展望 .....	246

# 1



## 概 论





# 1.1 引言

水污染是威胁人类生存的重大问题，目前地球水污染已经进入到十分严峻的地步，人类将要面临用水短缺，水资源质量不断下降，水环境持续恶化，由于污染所导致的缺水等事故不断发生，不仅使工厂停产、农业减产甚至绝收，而且造成了不良的社会影响和较大的经济损失，严重地威胁了社会的可持续发展，威胁了人类的生存。我国目前也存在水资源短缺的问题，300多个城市严重缺水，这使得解决水污染成为了国内十分迫切的问题。因此我国对环境治理也越来越重视，并把环境保护具体计划提上日程。

活性污泥法是污水处理中较成熟的生物处理工艺，目前多数城市污水处理厂都广泛采用活性污泥法作为主要生物处理工艺，工艺的设计对于城市污水处理厂的建设显得尤其重要，而活性污泥系统的模型化对水处理设计和研究具有重要的意义，因此活性污泥的研究越来越受到人们的关注。随着对活性污泥法生物去除机理的不断深入探索，活性污泥模型也由静态模型发展到机理描述更全面的动态模型。准确的数学模型可以较全面地描述活性污泥系统内的各种反应过程，从而可以给工艺选择提供优化设计，实现污染物去除与节能双重标准。

活性污泥系统生物去除有机碳、氮、磷及其调控机理模型研究是当今国际水协(IWA)污水生物处理设计与运行数学模型课题组的前沿性基础课题，IWA对于活性污泥模型最大的贡献就是把已有的机理模型与实际工艺过程相结合，形成了一系列动态模型，并且通过许多实际污水处理厂的数据分析与模拟得出了一套模型参数的典型值供世界各地的学者及工程人员参考，该研究成果可以应用于提高污水处理厂的优化运行和节能降耗的技术。

## 1.2 活性污泥法生物去除机理研究进展

### 1.2.1 水解机理

水解池作为污水处理厂的一级处理方式，可提高城市污水的可生化性，慢速可生物降解有机物(XS)是生活污水和工业废水中有机污染物的主要组成部分，XS分别约占生活污水和工业废水总COD的40%~77%和28%~86%。在生物转化过程中，XS需首先水解为小分子的易生物降解有机物(SS)才能被微生物吸收和降解。水解过程在污水输送管道和污水处理厂中均有发生，在污水管道中的水解反应会极大地改变污水的性质，对管道本身及下游污水处理厂均有重要影响。

### 1.2.2 有机物质生物去除机理

活性污泥法产生以后，人们纷纷开展了有关机理的研究和探讨。从19世纪20年代

开始,出现了很多活性污泥法对污水中有机物质去除机理的理论假设。Arden 和 Locket 等的初期研究中认识到物理、化学和生物过程对有机物的去除均起到了不同程度的作用。现已被证实的理论如絮凝理论、吸附理论、胶体理论、微生物理论、酶化学理论等都可以对这些假设进行解释。虽然早期,吸附理论在一段时间内占据主导地位,但在 1923 年, Buswell 和 Long 等就提出了生物去除机理。他们认为活性污泥是由各种胶集的丝状和单细胞细菌及其他生物组成,微生物通过对污染物的摄取和同化来完成污水中有机污染物的转化过程。他们的理论后来得到了广泛的接受,至今仍未受到本质上的质疑。McKee 和 Fair 等于 1942 年提出污染物质的去除是由相互区别但又相互联系的物理过程和生物过程组成的。

就生物机理而言,有机物质的去除是多个机理作用的结果。

### (1) 维持理论

早在 1898 年, Duleaux 就在理论上提出,基质的消耗是用于生物的生长和维持作用。50 年之后, Monod (1950 年) 第一次在实验的基础上证明了基质与微生物生长速率的依赖关系。1965 年, Pirt 的实验结果进一步地证实了维持理论。

### (2) 贮存-代谢理论

早在半个多世纪之前,已经有人开始关注微生物能积聚胞内贮存物质的现象并做了相关的报道 (Stanier 等, 1959 年; Zevenhuizen 和 Ebbink, 1974 年; Chudoba 等, 1973 年; Van den Eijnde 等, 1984 年),但这些报道都没有引起对活性污泥工艺中贮存过程的足够重视,只是普遍接受胞内贮存物在生物除磷过程中起着重要作用 (Wentzel 等, 1986 年; Satoh 等, 1992 年)。

Cliffitt 和 Andrews 等经试验测定发现,并非所有被结合到生物絮体中的底物都转化为细胞物质,其中有一部分是以贮存物质的形式存在。转移过程可能通过生物絮体的捕集、黏附等严格的物理过程实现,然后被活性生物体吸附和吸收而成为贮存物质,逐渐通过生长过程被降解利用。

荷兰代尔夫特工业大学 (Delft University) 的 Van Loosdrecht 等充分意识到了活性污泥工艺中贮存物资的重要性,并对这方面做了一系列大量的研究 (Van Loosdrecht 等, 1997 年; Krishna 和 Van Loosdrecht, 1999 年; Dircks 和 Henze 等, 2001 年; Carta 和 Beun 等, 2001 年; Beun 和 Dircks 等, 2002 年; Martins 和 Heijnen 等, 2003 年)。他们认为微生物在非连续供应基质的情况下能吸收胞外基质贮存在体内,当外界基质缺乏时就能利用这些胞内物质进行生长和内源呼吸。

### (3) 内源呼吸理论

1953 年, Porges 等发现微生物在无基质存在情况下也能消耗氧气。他们提出内源呼吸理论,也就是微生物依赖自身组织进行氧化作用。1958 年, Herber 在同样发现的基础上提出了微生物生长与内源呼吸表达式。由于它与 Pirt 所提出的表达式很相似,所以就被命名为 Herbert-Pirt 方程。1962 年 Dawes 和 Ribbon 进一步阐述内源呼吸理论。经过一系列的实验研究,他们认为无外在基质时,微生物内源呼吸实质上消耗胞内贮存物如糖源及聚羟基烷酸 (PHA) 以达到维持的目的。

### (4) 存活-非存活理论

存活-非存活细胞代谢理论是由 Jones 于 1973 年提出的。该理论认为活性污泥系统

中的微生物大都处于静止生长或内源呼吸阶段，细胞自溶和丧失存活力的现象极为普遍。存活力并非生物活性的先决条件，生物活性可因细胞破裂、酶的溢出而得到增强，相当大程度的生物活性是由这些非存活细胞提供的。非存活细胞的代谢作用使有机物的降解可以在不伴随微生物量增加的情况下发生。

### (5) 死亡-再生理论

Kountz 和 Forney (1959 年)、Mckinney (1960 年)、Washington 和 Symons (1962 年) 都在各自的研究基础上提出了死亡-再生理论，认为微生物增殖过程是微生物先衰亡，然后细胞的衰亡产物被微生物的生长所利用。1974 年，Grady 和 Roper 提出微生物的衰亡包括死亡和溶菌两个过程，可以同时或先后发生。1980 年，Dold 等就以死亡-再生理论为基础建立了活性污泥模型，同时他们意识到维持理论或内源呼吸理论也可能起到作用。

时至今日，仍没有实验可以证明哪一种理论占绝对优势。图 1-1 为各种理论的过程示意图。

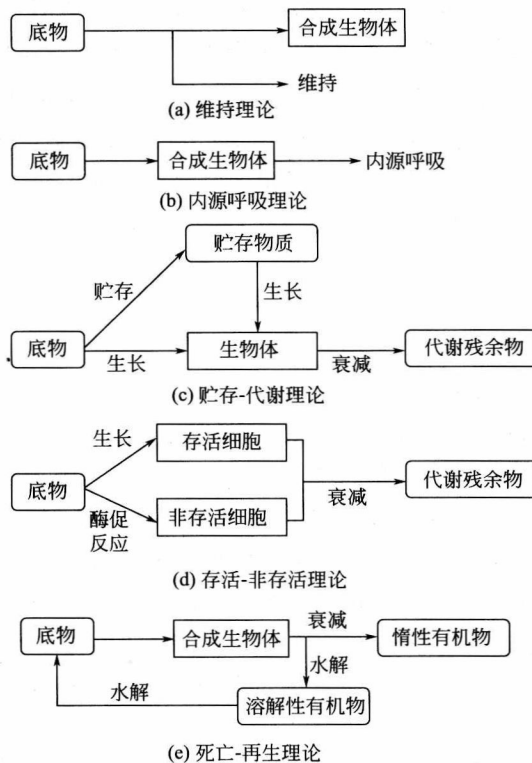


图 1-1 有机物生物去除理论过程示意图

## 1.2.3 生物脱氮机理

脱氮是当今污水处理中的一项重要内容。早在 19 世纪末就首次报道了有关微生物氨氧化 (1890 年) 以及硝酸盐或亚硝酸盐的还原作用 (1892 年)。20 世纪初自从 Kluver、Donder (1926 年) 以及 Beijerinck、Minkman (1910 年) 分别提出了硝化和反硝化概念，之后它们得到了全面的发展，成为公认的常规脱氮理论，其氮的转化过程如图 1-2 所示。

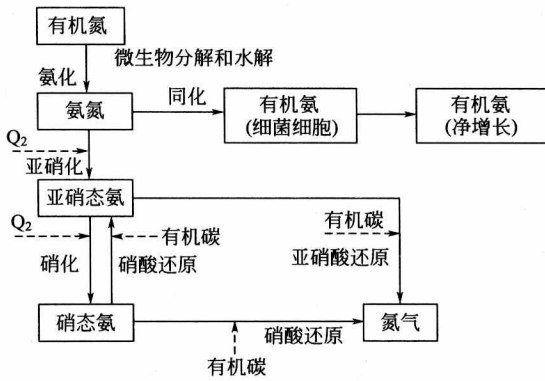


图 1-2 污水生物处理系统中氮的转化

尽管对于有关微生物的研究长达一世纪，但是有关氮转化的争论和推测报道仍然不断出现。早在 1975 年，Voets 等在处理高浓度氨氮废水的研究中，发现了硝化过程中  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  积累的现象，首次提出了短程硝化反硝化生物脱氮的概念。其基本原理是将氨氮氧化控制在亚硝化阶段，然后通过反硝化作用将亚硝酸氮还原为氮气，经  $\text{NH}_4^+ - \text{N} \rightarrow \text{NO}_2^- - \text{N} \rightarrow \text{N}_2$  这样的途径完成。短程硝化反硝化因具有时间短、耗能低、泥量少等优点，引起了国内外有关学者的关注。此外还涌现出较多新报道，例如：好氧反硝化和异养硝化（Robertson 和 Kuenen, 1990 年；Muller 等, 1995 年）、厌氧氨氧化（Mulder 等, 1995 年）、硝化自养菌的反硝化（Bock 等, 1995 年；Schmidt 和 Bock, 1997 年）以及同步反硝化理论等。

### 1.2.4 生物除磷机理

传统的活性污泥生物除磷方法主要就是使污水分别通过厌氧段和好氧段，利用厌氧释磷和好氧大量吸磷的过程达到除磷的目的。20 世纪 60 年代，Levin 和 Shapiro 首次提出一种描述污水生物过度除磷现象的生化机理，认为除磷现象通过 Emden-Meyerhof 途径和三羧循环实现，同时以长链无机聚磷的形式被生物过量贮存。1966 年，Harold 提出了 Harold 假说，认为微生物对聚磷的合成与分解是在聚磷酶催化作用下进行的，而且聚磷有可能是微生物受到厌氧抑制的结果。1979 年，Nichols 和 Osborn 发展了 Harold 的假说，同时还发现聚  $\beta$ -羟基丁酸（PHB）对微生物在厌氧区的生存起着重要作用。之后，人们逐渐发现存在一类特殊的兼性细菌，能在好氧条件下过度吸磷，并将之命名为聚磷菌（PAO）。

20 世纪 80 年代，生物除磷机理研究进一步发展，其中主要的就是 Comeau/Wentzel 模式和 Mino 模式。这两种模式对生物除磷系统中聚磷菌主要生化途径的描述是一致的。聚磷菌在厌氧或好氧条件下，吸收或分解胞内物质，使细胞内 ATP 和 ADP 的质量比下降或增加，从而引起聚磷酸盐发生分解或合成。但它们的主要区别是 PAO 能否在厌氧条件下利用糖原为乙酸转化成 PHB 提供还原力。

20 世纪 90 年代以后人们不仅逐渐开始以葡萄糖作为主要基质的相关研究（Carucci 等, 1999 年；Jeon 等, 2000 年；Wang 等, 2002 年），而且更关注系统中其他菌种的存在对除磷的影响，提出了反硝化除磷菌和聚糖菌。随着人们对聚磷菌自身对硝酸盐的作

用的思考和研究,从20世纪80年代后期开始逐渐发现存在着反硝化除磷菌(DPB)(Gerber等,1987年;Comeau等,1987年;Kerrn-Jespersen和Henz,1993年)。DPB在缺氧(无氧气但有硝态氮)条件下,能利用硝态氮作为电子受体,同好氧状态一样产生吸磷的作用。在吸磷的同时硝酸盐被还原为氮气。荷兰Delft工业大学的Kuba等对DPB做了一系列的研究工作(Kuba等,1993年,1994年,1996年,1997年;Wachtmeister和Kuba等,1997年)。Cech和Hartman发现并提出存在一种聚糖菌(GAO)能与聚磷酸菌发生厌氧有机碳积累的竞争(Cech和Hartman,1993年),但这种GAOs抑制模式也存在很大的争议(Liu等,1996年;Fang,2002年;Suguru Okunuki等,2004年)。2003年,Zeng等研究发现存在反硝化聚糖菌(DGAO),在厌氧阶段发生着与聚糖菌相似的过程,缺氧条件能利用硝酸盐或亚硝酸盐作为电子受体进行PHA的氧化作用。

Lopez(2006年)等对长期处于饥饿状态下的强化生物除磷内源过程的研究结果表明,好氧和厌氧条件下出现了不同的现象:好氧条件下聚磷菌会发生PHA、糖原和聚磷的先后利用以维持细胞,同时出现了明显的PAO衰减现象;厌氧条件下发生聚磷和糖原的先后分解以维持能量的需要。但是在整个实验过程中磷的吸收和释放、MLVSS浓度和损坏的细胞数等仍是一个常数。结论认为,糖原的分解是经由“3HV发酵”过程转化成PHA的,应该用不同的机理和模型描述强化生物除磷系统中好氧和厌氧条件下的内源过程。Lopez-Vazquez等(2006年)及Filipe(2001年)、Zeng(2003年)的研究均提出聚糖菌能在厌氧条件下发生糖原水解成PHB和PHV的作用以达到维持的目的。

## 1.3 活性污泥法生物场数学模型

### 1.3.1 传统活性污泥法生物动力学模型

#### 1.3.1.1 Monod模型

1942年,Monod发现均衡生长的细菌的生长曲线与活性酶催化的生化反应曲线类似。1949年发表了在静态反应器中经过系统研究得出的Monod模型。它在形式上与酶动力学的Michaelis-Menten方程一致,具体表达式如下:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (1-1)$$

式中  $\mu_{\max}$ ——最大比生长速率;

$K_s$ ——半饱和速率常数。

许多研究表明,这两个系数随着细胞的代谢状况而不断变化。半饱和速率常数 $K_s$ 的值其实是几个过程综合动力学常数的表达形式,其值的测定没有直接的方法。表征微生物生长特性的主要参数最大比生长速率,几乎是研究微生物所必测的参数。但是,它又受到微生物生长环境和条件的影响。所以,通过各种方法来对Monod方程中的参数进行估计是活性污泥法模型研究过程中很重要和复杂的一部分,许多研究者对此展开了探讨(Holmbeg,1982年;Vialars等,1985年;Ratkowsky,1986年;Derco等,1990年)。



Monod 模型是对单一底物纯菌种培养的纯经验表达式。它将细胞看成整体, 不考虑细胞的个体区别 (分隔性) 和内部结构差别 (结构性)。以 Monod 方程为基础的污染物降解动力学模型原则上需要满足以下 3 个条件: a. 微生物以单一污染物质作为基质; b. 微生物处于平衡生长状态; c. 在降解和生长过程中没有毒性物质存在。

显然, 大多数微生物处理系统并不符合这样的条件。实际处理工程中存在多种污染物质, 有可能包含有毒物质或分解产生中间毒性物质, 并且微生物往往不能够得到平衡生长。因此, 这些条件的忽视都可能导致 Monod 模型应用失败。

正是由于污水系统中污染物质的复杂性, 而简单 Monod 方程又不能描述这种复杂情形, 于是提出了微生物在混合基质条件下生长的综合模型。根据微生物对同时存在的基质的利用方式, 分为以下几种模式。

$$\textcircled{1} \text{ 微生物同时利用几种基质: } \mu = \mu_{\max} \prod_{i=1}^n \frac{C_i}{K_i + C_i} \quad (1-2)$$

$$\textcircled{2} \text{ 微生物分别利用数种基质: } \mu = \mu_{\max} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{K_i + C_i} \quad (1-3)$$

$$\textcircled{3} \text{ 一种基质被同时用作多种用途时: } \mu = \mu_{\max} \frac{C^\lambda}{K^n + C^\lambda} \quad (1-4)$$

其中, 第一种模式 [式(1-2)] 在污水处理领域受到了广泛的应用, 像 ASM<sub>s</sub> 模型以及其后的大部分模型都是基于这种模式建立的。

### 1.3.1.2 Eckenfelder 模型

该模型是 W. W. Eckenfelder, Jr 对间歇试验反应器内微生物的生长情况进行观察后于 1955 年提出的。Eckenfelder 模型将底物的降解和生物的增殖分为高底物浓度和低底物浓度二相而分别采用不同的数学模式。

高底物浓度时, 污泥处于对数增长阶段, 生物增殖速度与残存的底物浓度无关, 只受微生物自身生理机能的限制, 故与活性污泥浓度呈一级反应:

$$\frac{dX}{dt} = K_1 X \quad (1-5)$$

低底物浓度时, 污泥处于生长率下降阶段, 底物的降解速率被残存的底物浓度控制, 故与底物浓度呈一级反应:

$$\frac{dS}{dt} = -K_2 X S \quad (1-6)$$

### 1.3.1.3 Mc Kinney 模型

Mc Kinney 在 1962 年发表的文章中建立了有机物的代谢、微生物的增殖和氧的消耗三者之间的关系。Mc Kinney 模型首先是根据完全混合活性污泥法提出来的, 尔后又根据推流式曝气池的特点, 把这些公式修改后用于推流式曝气池。它包括用于无回流的完全混合法、有回流的完全混合法和推流式三组公式, 每一组又分别包括出流水质、污泥浓度和耗氧等若干个公式。

与 Eckenfelder 模型相比, Mc Kinney 模型忽略了微生物浓度对基质去除速率的影响。该模型认为活性污泥反应器内与微生物浓度相比, 属低基质浓度, 微生物处于生长率下降阶段, 代谢过程为基质浓度所控制, 遵循一级反应动力学。下式为 MC Kinney