

姚重华 编著

废水处理

计量学导论



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

152

X703

X35a

废水处理计量学导论

姚重华 编著

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

废水处理计量学导论/姚重华编著. —北京: 化学工业出版社, 2002.3

ISBN 7-5025-3711-2

I. 废… II. 姚… III. 废水处理-化学计量学
IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 008372 号

废水处理计量学导论

姚重华 编著

责任编辑: 管德存

责任校对: 李 林

封面设计: 郑小红

*

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

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 9 $\frac{3}{4}$ 字数 258 千字

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3711-2/X·148

定 价: 28.00 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

前 言

废水处理目前的发展趋势是由粗放型转向集约型。为了实现这一目标，需要深化对废水处理过程的认识。由于废水处理一般涉及多相、多组分，不但有物理、化学过程，还有生物过程，因此用一般的实验方法难以对废水处理过程进行仔细、全面的分析。在这方面，“废水处理计量学”提供了一种解决问题的途径。

“废水处理计量学”是一个新的学术范畴，其主要内容是研究废水处理过程中反应物之间、及反应物与产物之间的数量关系。

与传统的废水处理数学模型或模式相比较，“废水处理计量学”涉及废水处理过程较深层次的问题。例如，对于活性污泥过程，传统数学模型一般考虑 MLVSS、BOD 等组分，过程一般为 BOD 衰减、污泥产率等。但在“废水处理计量学”中，曝气池内的过程被分解成异养菌好氧生长、异养菌缺氧生长、自养菌好氧生长等，曝气池内的物质被分解成有机碳、有机氮、溶解氧、无机氮、异养菌、自养菌等。

同时，“废水处理计量学”所建立的组分间的关系具有交互性。这种交互性主要表现为每个子过程可能有若干个组分参加，而每个组分可能参与若干个子过程，即“你中有我，我中有你”。例如，对于活性污泥过程内异养菌好氧生长子过程，涉及的组分有易降解有机碳、溶解氧、铵氮、碱度等，而对于活性污泥过程内的组分易降解有机碳浓度的反应速率，则涉及异养菌好氧生长、异养菌缺氧生长及缓慢降解有机碳“水解”等子过程。

“废水处理计量学”的工作方式，与废水处理过程计算机仿真类似，是在建立废水处理过程各组分定量关系的基础上，利用计算机进行求解分析。由于计算机速度快、容量大，可以模拟各种试验条件，可以在短时间内获得结果，可以研究包含几十甚至几百个变

量的问题，因此利用“废水处理计量学”易于获得对废水处理过程的较全面、深入的了解，有利于实现废水处理由粗放型向集约型的转化。

本书在绪论中，对国际水质协会（IAWQ）的活性污泥模型ASM1（1987）、ASM2（1995）及ASM3（1999）进行了介绍，提出“废水处理计量学”的一些基本工作内容，如合理假定、系统分割、建立基本速率方程、建立相关速率方程、统一计量单位、确定参数数值、分析过程输入输出关系、建立过程动态模型及利用模型对过程进行分析等。

本书可供高等学校、科研单位及工矿企业从事废水处理的科技人员阅读，也可供环境工程专业的本科生及研究生阅读。

姚重华
2002.1

目 录

1 绪论	1
1.1 活性污泥过程模型 No.1 (ASM1)	2
1.1.1 合理假定	3
1.1.2 系统分割	3
1.1.3 基本速率方程	4
1.1.4 相关速率方程	5
1.1.5 组分总动力学方程	6
1.1.6 统一单位	9
1.1.7 参数值	10
1.1.8 模型生成	10
1.1.9 模型求解	12
1.2 活性污泥过程模型 No.2 (ASM2)	15
1.2.1 系统分割	15
1.2.2 基本方程	16
1.2.3 相关方程	18
1.2.4 子过程分析	20
1.3 活性污泥过程模型 No.3 (ASM3)	23
1.3.1 ASM1 的缺点	23
1.3.2 系统分割	24
1.3.3 基本速率方程	25
1.3.4 相关速率方程	27
1.4 模型的理论基础	29
2 废水流量及组成	32
2.1 废水的流量	32
2.1.1 表示方法	32
2.1.2 统计分析	33
2.1.3 估算	36

2.1.4	人口当量	44
2.1.5	预测	44
2.2	废水的成分	46
2.2.1	生活污水	46
2.2.2	水质与水量	50
3	废水与污泥的表征	53
3.1	悬浮固体	53
3.2	有机物质	54
3.2.1	生化需氧量 BOD (BOD ₅)	55
3.2.2	化学需氧量 (COD _p 和 COD _{Cr})	58
3.2.3	总需氧量 TOD	61
3.2.4	总有机碳 TOC	61
3.3	氮	63
3.4	磷	64
3.5	碱度 (TAL)	65
3.6	污泥体积指数 (SVI)	65
3.7	污泥呼吸速率	65
4	基本生物过程	68
4.1	微生物学	68
4.1.1	微生物种类	68
4.1.2	菌种筛选	70
4.2	生物处理中的转化	73
4.2.1	微生物生长	73
4.2.2	水解	74
4.2.3	衰减	76
4.3	有机物好氧异养转化	76
4.3.1	反应方程式	76
4.3.2	产率常数	78
4.3.3	营养物	80
4.3.4	反应动力学	81
4.3.5	异养菌	82
4.3.6	环境因素	82
4.4	硝化作用	86

4.4.1	反应方程式	86
4.4.2	碱度	88
4.4.3	反应动力学	88
4.4.4	环境因素	89
4.5	反硝化	95
4.5.1	反应方程式	96
4.5.2	产率常数	96
4.5.3	营养物	98
4.5.4	碱度	98
4.5.5	反应动力学	98
4.5.6	环境因素	100
4.6	生物除磷	103
4.6.1	反应方程式	104
4.6.2	产率常数	105
4.6.3	碱度	105
4.6.4	反应动力学	106
4.6.5	环境因素	106
4.7	厌氧过程	107
4.7.1	反应方程式	109
4.7.2	产率常数	109
4.7.3	营养物	110
4.7.4	碱度	111
4.7.5	反应动力学	112
4.7.6	气态产物	112
4.7.7	环境因素	113
5	活性污泥过程	115
5.1	质量平衡	115
5.1.1	无污泥回流	115
5.1.2	有污泥回流	118
5.2	基本概念	120
5.2.1	处理效率	120
5.2.2	回流比	120
5.2.3	容量负荷 (体积负荷)	121

5.2.4	污泥浓度	121
5.2.5	污泥质量	121
5.2.6	污泥负荷	121
5.2.7	剩余污泥	122
5.2.8	废弃污泥	123
5.2.9	泥龄	123
5.2.10	好氧泥龄	124
5.3	类型	125
5.3.1	有回流过程	125
5.3.2	一体化设施	127
5.3.3	接触稳定	128
5.3.4	生物吸着	130
5.4	设计	130
5.4.1	容量负荷设计	131
5.4.2	污泥负荷或泥龄设计	133
5.4.3	计算机辅助设计	134
6	生物滤池	136
6.1	生物膜动力学	136
6.1.1	一级反应	137
6.1.2	零级反应	139
6.2	生物膜动力学参数	144
6.3	水膜扩散	146
6.4	双组分扩散	148
6.5	生物滤池动力学	150
6.6	生物滤池质量平衡	154
6.6.1	无回流过程	154
6.6.2	有回流过程	155
6.7	基本概念	155
6.7.1	处理效率	155
6.7.2	回流比	156
6.7.3	体积负荷	156
6.7.4	生物膜表面积	156
6.7.5	有机表面负荷	156

6.7.6	水力表面负荷	156
6.7.7	污泥产量	156
6.7.8	剩余污泥产量	156
6.8	生物膜反应器类型	156
6.8.1	滴滤池	157
6.8.2	浸没式滤池	158
6.8.3	生物转盘	160
6.9	设计	160
6.9.1	滴滤池	161
6.9.2	生物转盘	162
6.9.3	其他类型生物滤池	163
6.9.4	处理可溶有机物生物滤池	163
6.10	工艺条件	166
6.10.1	曝气	166
6.10.2	生物膜的生长和脱落	166
6.11	颗粒有机物去除	168
6.12	详细模型	173
7	硝化过程	176
7.1	质量平衡	176
7.1.1	单独硝化	176
7.1.2	氧化硝化	184
7.2	硝化过程类型	190
7.2.1	纯硝化菌反应器	190
7.2.2	一段式活性污泥过程	191
7.2.3	二段式活性污泥过程	194
7.2.4	一段式生物滤池	195
7.2.5	二段式生物滤池	195
7.2.6	生物滤池与活性污泥组合硝化	196
7.3	硝化过程设计	196
7.3.1	活性污泥硝化	196
7.3.2	优化硝化工艺	199
7.3.3	硝化生物滤池	201
8	反硝化	204

8.1	质量平衡	204
8.1.1	单独反硝化	204
8.1.2	组合硝化和反硝化	211
8.2	反硝化类型	215
8.2.1	单独污泥反硝化	216
8.2.2	混合污泥反硝化	217
8.2.3	反硝化生物滤池	219
8.3	反硝化工艺设计	220
8.3.1	C/N 比	220
8.3.2	搅拌	225
8.3.3	沉淀池和生物滤池中的氮气	226
8.3.4	氧耗	228
8.3.5	碱度	229
8.3.6	反硝化活性污泥工艺设计	231
8.3.7	模型分析	232
8.3.8	反硝化生物滤池工艺设计	236
8.4	微生物氧化还原区	238
9	废水除磷	241
9.1	生物除磷	241
9.1.1	质量平衡	241
9.1.2	工艺类型	243
9.1.3	工艺设计	244
9.2	物化除磷	249
9.2.1	质量平衡	249
9.2.2	除磷原理	250
9.2.3	除磷工艺	263
9.2.4	工艺设计	267
9.2.5	工艺操作	273
10	废水厌氧处理	275
10.1	质量平衡	275
10.1.1	悬浮工艺	277
10.1.2	生物膜工艺	278
10.2	厌氧过程工艺	279

10.2.1	废水预处理	279
10.2.2	悬浮污泥工艺	279
10.2.3	厌氧过滤工艺	280
10.2.4	厌氧工艺流程	282
10.3	厌氧工艺设计	282
10.3.1	悬浮工艺设计	282
10.3.2	过滤工艺设计	287
10.3.3	气体产量	288
10.3.4	工艺运行	290
参考文献		294

1 绪 论

废水处理计量学是一个新概念，其主要内容是研究废水处理过程中反应物之间、反应物与产物之间的数量关系。与传统的废水处理数学模型或模式相比，废水处理计量学涉及废水处理过程较深层次的问题。例如，对于活性污泥过程，传统数学模型一般考虑 MLVSS、BOD 等组分，过程一般为 BOD 衰减、污泥产率等。但在废水处理计量学中，曝气池内的过程被分解成若干子过程，如异养菌好氧生长、异养菌缺氧生长、自养菌好氧生长等；曝气池内的物质被分解成若干组分，如有机碳、有机氮、溶解氧、无机氮、异养菌、自养菌等。

由于废水处理计量学涉及废水处理过程较深层次的问题，因此对过程的了解，包括过程的输入输出关系、过程内组分的性质、组分的反应速率与级数、反应的干扰因素、反应器流态影响等，有更高的要求。

废水处理计量学建立的组分间的关系具有交互性。这种交互性主要表现为每个子过程可能有若干个组分参加，而每个组分可能参与若干个子过程，即“你中有我，我中有你”。例如，对于活性污泥过程内异养菌好氧生长子过程，涉及的组分有易降解有机碳、溶解氧、铵氧、碱度等；而对于活性污泥过程内的组分易降解有机碳浓度的反应速率，则涉及异养菌好氧生长、异养菌缺氧生长及缓慢降解有机碳“水解”等子过程。因此，在数学形式上，废水处理计量学中常使用微分方程组（或偏微分方程组）而不是单个微分方程（或偏微分方程）来表现过程内各组分浓度随时间的变化情况；在计算方法上，废水处理计量学常使用数值方法而不是解析方法对方程求解；在求解过程中，废水处理计量学常需编制计算机程序，以简化计算手续；在系统结构与时间的关系上，废水处理计量学常

可用于动态分析，而稳态分析只是动态分析的一个特例；在过程参数与空间位置的关系上，废水处理计量学常为分布式而非集总式。

废水处理是环境保护的重要手段，目前的发展趋势是由粗放型向集约型转变。为了实现废水处理由粗放型向集约型的转变，需要加深对废水处理中所发生的过程的认识。由于废水处理一般涉及多相、多组分，不但有物理、化学过程，还有生物过程，因此用一般的实验难以对过程进行仔细、全面的分析。废水处理计量学实质是对废水处理过程的计算机仿真，是在建立废水处理过程各组分定量关系的基础上利用计算机进行求解分析。由于计算机速度快、容量大，可以模拟各种试验条件，可以在短时间内获得结果，可以研究包含几十甚至几百个变量的问题，因此利用废水处理计量学易于获得对废水处理过程较全面、深入的了解，有利于实现由粗放型向集约型的转化。同时，废水处理计量学的研究结果可用于废水处理的在线或实时控制。

废水处理计量学的内容正处于发展之中。为了加深对处理过程的认识，除了根据过程的机理建立微分方程组（或偏微分方程组）来描述一个废水处理过程外，还可以根据过程的输入、输出数据建立统计模型，如多元非线性回归模型、蒙特卡罗随机模型等，或建立过程的人工智能模型，如神经网络模型、专家系统模型、模糊逻辑模型。此外，废水处理计量学还可吸收包括信息技术在内的数据处理技术，例如“软测量”技术对废水处理计量学十分重要。由于废水处理过程参数测定较困难，可以建立易测参数与难测参数之间的关系，通过测定易测参数来推算难测参数的数值。

1.1 活性污泥过程模型 No.1 (ASM1)

活性污泥过程是废水生物处理的重要方法，在城市污水和工业废水的处理中已得到大量应用，活性污泥过程的模型化工作也有了长足的发展。对活性污泥过程内部作用机理的研究在废水处理计量学的出现与发展中起了重要作用。

为了建立活性污泥过程的机理模型，1983 年国际水污染控制与研究协会 IAWPRC（现更名为国际水质协会 IAWQ）组织专家在前人活性污泥模型化工作的基础上进行了长达 4 年的收集、分析、比较、归纳的研究工作，于 1986 年发表了活性污泥过程的 IAWQ No.1 模型（ASM1）。该模型将曝气池内的过程分解成 8 个子过程，将曝气池内的物质分解成 13 个组分，利用质量守恒、反应动力学、经验公式及参数建立了描述整个系统动态性质的微分方程组，并利用数值积分对该微分方程组在不同条件下求解，以分析活性污泥过程包括除碳、脱氮在内的动态性质。该模型自发表以来受到环境工程界的广泛关注，目前已成为活性污泥过程仿真和控制的重要基础。

下面对 ASM1 的结构与原理作一简要介绍，主要内容有合理假定、系统分割、建立基本方程、建立相关方程、统一单位、确定参数、确定输入输出、建立完整模型、模型求解、解的表达等步骤。可以认为，ASM1 的建立过程体现了废水处理计量学的一些基本方法。

1.1.1 合理假定

该模型在建模时引入了一个重要的基本假定，就是被模拟的活性污泥过程当前运行正常。该假定的具体内容包括：

- (1) 曝气池内处于正常 pH 值及温度下；
- (2) 池内微生物的种群和浓度处于正常状态；
- (3) 池内污染物浓度可变，但成分及组成不变；
- (4) 微生物营养充分；
- (5) 二沉池内无生化反应，仅为一个固液分离装置。

这一假定使模型本身避免了一些不确定性，相应增强了模型的真实性和可靠性。

1.1.2 系统分割

该模型将曝气池内的过程分成 8 个子过程，将曝气池内的物质分成 13 个组分。每个子过程有若干个组分参加，每个组分参与若干个子过程。

8 个子过程是：

- (1) 异养菌好氧生长；
- (2) 异养菌缺氧生长；
- (3) 自养菌好氧生长；
- (4) 异养菌衰减；
- (5) 自养菌衰减；
- (6) 可溶有机氮的氨化；
- (7) 被吸着缓慢降解有机碳的“水解”；
- (8) 被吸着缓慢降解有机氮的“水解”。

13 个组分是：

- (1) 易降解有机碳 S_s ；
- (2) 缓慢降解有机碳 X_s ；
- (3) 可溶性可降解有机氮 S_{nd} ；
- (4) 颗粒状可降解有机氮 X_{nd} ；
- (5) 溶解氧 S_o ；
- (6) 氨态氮 S_{nh} ；
- (7) 硝态氮 S_{no} ；
- (8) 碱度 S_{alk} ；
- (9) 异养菌 X_{bh} ；
- (10) 自养菌 X_{ba} ；
- (11) 可溶惰性有机碳 S_i ；
- (12) 颗粒惰性有机碳 X_i ；
- (13) 微生物衰减产物 X_p 。

1.1.3 基本速率方程

相对于参与某一子过程反应的某一组分，可以写出一个反应动力学方程，以表示该组分的浓度在该子过程反应中随时间的变化情况。对于该子过程，则可写出一个或几个组分的反应动力学方程。在构成这若干个动力学方程时，以某一组分的生长或衰减的反应动力学方程作为基本方程，其他组分的反应动力学方程以该基本动力学方程为基础经过系数调整获得。

例如，对于异养菌好氧生长这个子过程，涉及异养菌 X_{bh} 、易降解有机碳 S_s 、溶解氧 S_o 、氨态氮 S_{nh} 和碱度 S_{alk} 。在建立该子过程中各组分的动力学模型时，以异养菌的好氧反应动力学方程为基础。

异养菌好氧生长的反应动力学方程是：

$$(dX_{bh}/dt)_1 = a_h [S_s / (K_s + S_s)] [S_o / (K_{o,h} + S_o)] X_{bh} \quad (1.1)$$

式中 a_h 是异养菌最大比生长速率； K_s 是相应于 S_s 的饱和常数； $K_{o,h}$ 是相应于 S_o 在异养菌好氧生长中的饱和常数；下角标号表示子过程的编号，方程 (1.1) 中 (dX_{bh}/dt) 的下角标号“1”表示第 1 个子过程，即异养菌好氧生长。

上述模型实际上是废水生物处理中 Monod 方程再加上一个开关函数 $S_o / (K_{o,h} + S_o)$ 。在开关函数中， $K_{o,h}$ 是一个较小的任意数。当溶解氧浓度 S_o 较大时，该开关函数数值趋近 1，表示异养菌的好氧反应动力学符合 Monod 方程；当溶解氧浓度 S_o 很小时，该开关函数数值趋近 0，表示异养菌的生长因溶解氧浓度低而难以进行。使用开关函数，是 IAWQ 模型的一个特色。

又如，在异养菌缺氧生长子过程中，各组分的反应动力学方程以异养菌的缺氧生长动力学方程为基础。该方程是：

$$(dX_{bh}/dt)_2 = a_h [S_s / (K_s + S_s)] [S_{no} / (K_{no} + S_{no})] [K_{o,h} / (K_{o,h} + S_o)] \eta_g X_{bh} \quad (1.2)$$

式中 K_{no} 是 S_{no} 在异养菌生长中的饱和常数；下角标“2”表示第 2 个子过程，即异养菌缺氧生长； η_g 是校正系数。

此外，自养菌好氧生长、异养菌衰减、自养菌衰减、有机氮氨化、被吸着缓慢降解有机碳的“水解”、被吸着缓慢降解有机氮的“水解”等子过程均可相应建立各自的基本方程。

1.1.4 相关速率方程

在各子过程基本反应动力学方程的基础上，参与该子过程的其他组分的反应动力学方程也可依次建立。