

第七节：活性污泥法系统设计方法的深化

活性污泥法模型简介

- 活性污泥法模型概况

无论采取何种方法，模拟是污水处理系统设计和研究中的重要步骤。计算机提供了把大量水质参数和很多反应过程结合起来的工具，开发出模拟各种活性污泥法过程的软件。可以方便地模拟进水水质、工艺设计参数对过程的影响，预测出水水质，指导活性污泥法的设计和运行。

对活性污泥法过程中的各种反应，需要列出很长一串复杂的方程式。活性污泥法的过程还包括很多组分，例如有机基质（溶解的和颗粒的）、无机基质（氨、硝酸盐、磷）、溶解氧和各种异氧菌和自氧菌，一个普遍的方法就是采用矩阵模型格式，将各个反应和组分联系起来。

活性污泥法的数学模型

ASM1模型包括有机物降解和硝化过程

ASM2模型是在ASM1的基础上发展了包括聚磷菌及其相应的厌氧、缺氧和好氧过程的反应

ASM2D模型包括了反硝化聚磷菌反应过程

ASM3模型是在进一步深入了解活性污泥法机理的基础上发展而来的

模型的研究还在不断发展过程中。现在很多软件程序可应用于不同形式的反应器，很方便根据不同目标获得模型程序并加以利用。

模型中采用了Monod比生长速率动力学来解释自养菌或异养菌的生长，与生长速率有关的单个过程中各组分之间的数量关系用化学计量系数描述。为了简化单位的换算，模型对全部有机组分和生物体统一采用COD当量来表示，从而存在基质利用、生物体生长和氧消耗的COD平衡。

- 模型矩阵格式、组分和过程

异氧菌的生长率：

$$R_{B,H} = \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$$

式中： $R_{B,H}$ ——异氧菌的生长率， $g/(m^3 \cdot d)$ ；

S_S ——易生物降解的基质浓度， $gCOD/m^3$ ；

μ_H ——最大比生长速率， $gVSS/(gVSS \cdot d)$ ；

K_S ——易生物降解基质的半速率系数， $gCOD/m^3$ ；

S_O ——溶解氧浓度， g/m^3 ；

$K_{O,H}$ ——溶解氧浓度的半速率系数， g/m^3 ；

$X_{B,H}$ ——异氧菌浓度， g/m^3 ；

- 易降解基质 S_S ，用于生长，而 $-(1/Y_H)$ 将异氧菌生长速率与 S_S 浓度变化联系起来：

$$R_{S_S} = -\frac{1}{Y_H} (RX_{B,H})$$

- S_S 的总变化速率等于 S_S 栏中化学计算系数乘以各自的过程速率之和。
- 耗氧的化学计算系数表示如下：对于异氧生长 ($R_{j,1}$)， $(1-Y_H)$ 项为去除单位COD所需氧的比例。 $(1-Y_H)$ 项除以 Y_H [gCOD (细胞) /gCOD (利用)]，以得出**细胞生长与所需氧的化学计算系数**，与矩阵格式相适应。自养生长的化学计算项含系数4.57，因为氨是硝化菌的基质，在矩阵中以 S_{NH} 表示，而氧是以COD表示，氧对氨的当量是4.57gO₂/g (NH₃-N)，分子中的数量少了 Y_A ，是由于氨用于细胞合成。

- 模型的应用

数学模型的主要作用：

- ①用于污水处理工艺模型的建立或直接用于污水处理厂的设计；
- ②作为研究的工具以评价生物过程，并深入了解影响某种工艺运行的重要参数，进一步指明污水处理系统的研究方向；
- ③用以评价给定设施的处理容量，帮助污水处理厂操作管理人员获得更有效信息，提高运行操作和管理水平。

为评估现有污水厂的能力，利用污水特性表征和污水厂运行数据对模型进行校正。掌握的数据愈多，校正后的模型愈贴近实际情况。模型参数的典型取值见书P173表12-9。

第1章 仿真(simulation)

1.1 模型的建立(modeling)

1.1.1 模型的分类

1.1.2 简单系统建模

1.1.3 复杂系统建模

机理模型的建模原则：“一进一出—反应”。

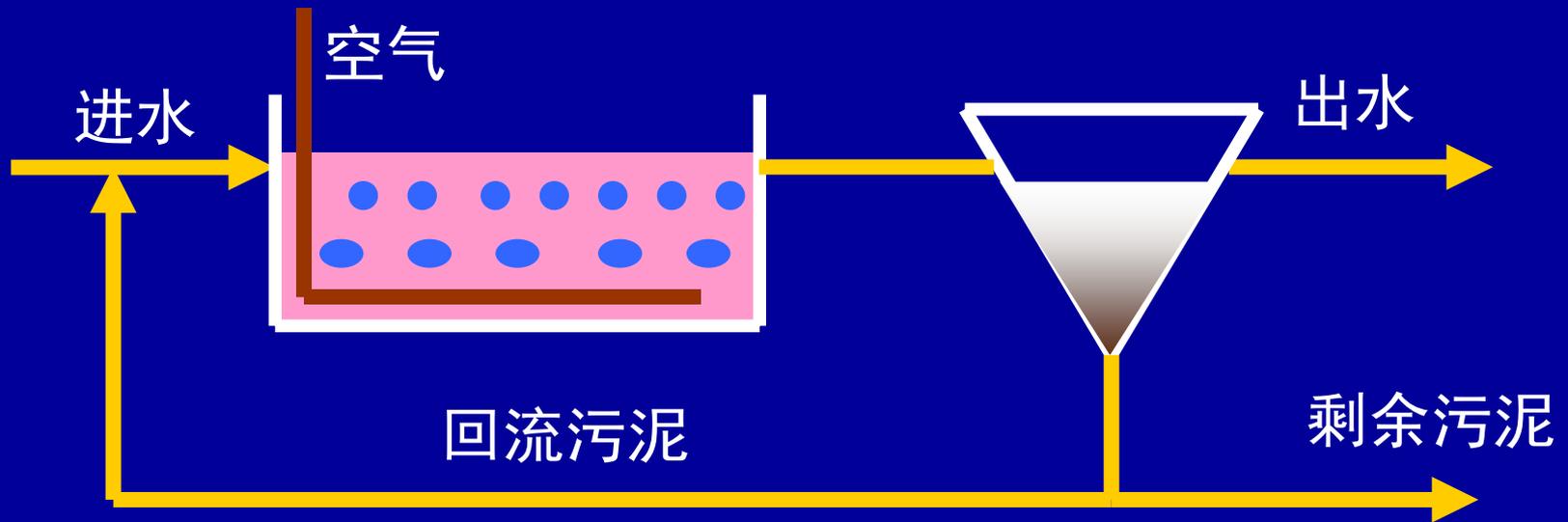
◎影响反应进程的因素多，且没有全部搞清楚；

合理的过程假定——抓主要矛盾

◎模型的参数具有空间的分布，即过程参数随空间位置会有所变化；

空间分割——在子系统内建模，然后综合

例1.8 活性污泥过程数学模型



最早研究活性污泥法数学模拟的是南非开普敦大学(Univ. of Cape Town) Gerrit v. R. Marais教授领导的课题组。

1982年，国际水污染研究与控制协会(International Association on Water Pollution Research and Control, IAWPRC)成立活性污泥法设计和运行数学模型课题组。

例1.8 活性污泥过程数学模型

Activated Sludge Models (ASMs)

ASM1, 1986年发表, 1987年出版。

具有除碳、脱氮功能

ASM2, 1995年出版。

具有除碳、脱氮、生物除磷功能

ASM2D, 1999年发表。

具有除碳、脱氮、生物除磷(包括了反硝化聚磷菌)功能

ASM3, 1999年发表。

对胞内反应过程(贮存)进行了更为详细的描述, 并可根
据环境条件对衰减过程进行优化调节。

ASM1的性质

首先要明确ASM1所描述的，是活性污泥过程内有关组分的反应动力学，不是整个活性污泥过程的数学模型。

一个过程的机理模型，一般可根据所谓“一进一出—反应”的守恒原理来建立。对于活性污泥过程而言，组分的“进”、“出”可根据流体的流动来确定，比较简单，但组分的“反应”部分比较复杂，因为涉及的组分比较多，如异养菌、自养菌、溶解氧、氨氮等；涉及的子过程也比较多，如异养菌好氧生长，异养菌衰减、有机氮氨化等。如何正确反映活性污泥过程有关组分的反应动力学，是建立活性污泥过程机理模型的关键之一。

ASM1要解决的，就是活性污泥过程内的反应动力学。在微生物生长速率方面，ASM1利用描述微生物生长速率的Monod方程；在微生物衰减速率方面，ASM1利用一级速率方程；在环境因素对反应速率的影响方面，ASM1利用一系列开关函数；在不确定性因素对反应速率的影响方面，ASM1利用校正系数。

例1.8 活性污泥过程数学模型

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

1 模型假定

活性污泥过程
当前运行正常

二沉池内
无生化反应

- ◎曝气池内处于正常pH及温度下；
- ◎曝气池内微生物的种群和浓度处于正常状态；
- ◎曝气池内污染物浓度可变，但成分及组成不变；
- ◎曝气池内微生物的营养充分；

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

2
系统
分割

8个子过程

13个组分

异养菌

- ①好氧生长
- ②缺氧生长
- ③衰减

自养菌

- ④好氧生长
- ⑤衰减

污染物

有机碳 ⑥缓慢降解有机碳水解

有机氮 ⑦可溶有机氮氨化

⑧缓慢降解有机氮水解

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

2 系统分割

8个子过程

13个组分

微生物

- (1) 异养菌 X_{bh}
- (2) 自养菌 X_{ba}
- (3) 微生物衰减产物 X_p

有机碳

- (4) 易降解有机碳 S_s
- (5) 缓慢降解有机碳 X_s
- (6) 可溶惰性有机碳 S_i
- (7) 颗粒惰性有机碳 X_i

氮化合物

- (8) 可溶性可降解有机氮 S_{nd}
- (9) 颗粒状可降解有机氮 X_{nd}
- (10) 氨态氮 S_{nh}
- (11) 硝态氮 S_{no}

其他

- (12) 溶解氧 S_o
- (13) 碱度 S_{alk}

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

3基本速率方程

在ASM1的8个子过程中，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。而每一个子过程则由一个或多个组分的反应动力学方程构成。

异养菌好氧生长

异养菌 X_{bh}

易降解有机碳 S_s

氨态氮 S_{nh}

溶解氧 S_o

碱度 S_{alk}

在构成每一个子过程的一个或多个动力学方程时，以参与该子过程的某一组分的生长或衰减的反应动力学方程为基本方程，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而得。

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

3基本速率方程

异养好氧生长

异养菌 X_{bh}

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_1 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

易降解有机碳 S_s

$$\left(\frac{dS_s}{dt}\right)_1 = \left(-\frac{1}{Y_h}\right) \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

溶解氧 S_o

$$\left(\frac{dS_o}{dt}\right)_1 = \left(-\frac{1 - Y_h}{Y_h}\right) \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

氨态氮 S_{nh}

$$\left(\frac{dS_{nh}}{dt}\right)_1 = (-i_{xb}) \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

碱度 S_{alk}

$$\left(\frac{dS_{alk}}{dt}\right)_1 = \left(-\frac{i_{xb}}{14}\right) \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

3基本速率方程

3.1异养菌好氧生长的基本速率方程

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_1 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

3.2异养菌缺氧生长的基本速率方程

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_2 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_{no}}{K_{no} + S_{no}} \frac{K_{oh}}{K_{o,h} + S_o} \eta_g X_{bh}$$

当存在溶解氧时，异养菌首先利用溶解氧和基质生长，当溶解氧很低又存在硝酸盐时，异养菌利用硝酸盐作为电子受体进行生长。因此方程中包含溶解氧和硝态氮的开关函数。

注意： 由于异养菌处于同一个系统内，因此方程1和方程2中溶解氧的开关函数是互补的，当一个为1时，另一个就为0。

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

3基本速率方程

3.1 异养菌好氧生长的基本速率方程

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_1 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

3.2 异养菌缺氧生长的基本速率方程

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_2 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_{no}}{K_{no} + S_{no}} \frac{K_{oh}}{K_{o,h} + S_o} \eta_g X_{bh}$$

对于利用多种营养物的异养菌，其好氧生长和缺氧生长的唯一区别在于最终电子受体的性质及其对细胞产生ATP数量的影响。对符合这种条件的基质，两种条件下的生长动力学参数非常接近。但是，由于缺氧条件下生成的ATP较少，缺氧生长比率比较低，因此引进一个小于1的校正系数 η_g 。

方程1和2采用相同的 μ_h, K_s

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

3基本速率方程

3.1 异养菌好氧生长的基本速率方程

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_1 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

3.2 异养菌缺氧生长的基本速率方程

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_2 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_{no}}{K_{no} + S_{no}} \frac{K_{oh}}{K_{o,h} + S_o} \eta_g X_{bh}$$

3.3 自养菌好氧生长的基本速率方程

$$\left(\frac{dX_{ba}}{dt}\right)_3 = \hat{\mu}_a \frac{S_{nh}}{K_{nh} + S_{nh}} \frac{S_o}{K_{o,a} + S_o} X_{ba}$$

3.4 异养菌衰减

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_4 = b_h X_{bh}$$

3.5 自养菌衰减

$$\left(\frac{dX_{ba}}{dt}\right)_5 = b_a X_{ba}$$

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

3基本速率方程

3.6可溶有机氮氨化的基本速率方程

$$\left(\frac{dS_{nh}}{dt}\right)_6 = K_a S_{nd} X_{bh}$$

氨化是在异养型微生物消耗溶解性含氮有机物时，可溶有机氮转化为氨氮的过程。大多数研究者假定，氨化将所有可溶有机氮以氨的形式释放到介质中。

(实际上，简单的化合物如氨基酸可以直接被微生物利用。)

K_a 是氨化速率系数，单位为 $L/(mg\text{细胞COD}\cdot h)$

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

3.7被吸着缓慢降解有机碳的水解

$$\left(\frac{dS_s}{dt}\right)_7 = K_h \frac{X_s / X_{bh}}{K_x + (X_s / X_{bh})} \left[\left(\frac{S_o}{K_{oh} + S_o}\right) + \eta_h \left(\frac{K_{oh}}{K_{oh} + S_o}\right) \left(\frac{S_{no}}{K_{no} + S_{no}}\right) \right] X_{bh}$$

K_h ，水解动力学常数(h^{-1}); K_x ，水解反应半饱和系数(mg缓慢降解COD/mg活性生物量COD); η_h ，缺氧水解校正因子。

(1)水解反应速率受(X_s/X_{bh})的控制，而不只受 X_s 的控制。因为水解反应被认为是受细胞界面调节的，依赖于胞外酶，而胞外酶的数量于细胞浓度成比例。

(2)水解反应包括好氧和缺氧条件下两部分。而 η_h 反应了缺氧条件下水解反应的延滞程度，与 η_g 类似，这个校正因子也是经验性的。

(3)当好氧和缺氧系统只是短时间处于厌氧状态时，由于专性厌氧菌需要一定的适应期，显然不会发生厌氧水解反应。

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

3.8被吸着缓慢降解有机氮的水解

$$\left(\frac{dS_{nd}}{dt}\right)_8 = \frac{X_{nd}}{X_s} \left\{ K_h \frac{X_s / X_{bh}}{K_x + (X_s / X_{bh})} \left[\left(\frac{S_o}{K_{oh} + S_o} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{oh}}{K_{oh} + S_o} \right) \left(\frac{S_{no}}{K_{no} + S_{no}} \right) \right] X_{bh} \right\}$$

被吸着缓慢降解有机氮的水解速率与被吸着缓慢降解有机碳的水解速率成正比。

ASM1的8个基本速率方程

1 异养菌好氧生长的基本速率方程

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_1 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

2 异养菌缺氧生长的基本速率方程

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_2 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_{no}}{K_{no} + S_{no}} \frac{K_{oh}}{K_{o,h} + S_o} \eta_g X_{bh}$$

3 自养菌好氧生长的基本速率方程

$$\left(\frac{dX_{ba}}{dt}\right)_3 = \hat{\mu}_a \frac{S_{nh}}{K_{nh} + S_{nh}} \frac{S_o}{K_{o,a} + S_o} X_{ba}$$

4 异养菌衰减

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_4 = b_h X_{bh}$$

5 自养菌衰减

$$\left(\frac{dX_{ba}}{dt}\right)_5 = b_a X_{ba}$$

6 可溶有机氮氨化的基本速率方程

$$\left(\frac{dS_{nh}}{dt}\right)_6 = K_a S_{nd} X_{bh}$$

7 被吸着缓慢降解有机碳的水解

$$\left(\frac{dS_s}{dt}\right)_7 = K_h \frac{X_s / X_{bh}}{K_x + (X_s / X_{bh})} \left[\left(\frac{S_o}{K_{oh} + S_o} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{oh}}{K_{oh} + S_o} \right) \left(\frac{S_{no}}{K_{no} + S_{no}} \right) \right] X_{bh}$$

8 被吸着缓慢降解有机氮的水解

$$\left(\frac{dS_{nd}}{dt}\right)_8 = \frac{X_{nd}}{X_s} \left\{ K_k \frac{X_s / X_{bh}}{K_x + (X_s / X_{bh})} \left[\left(\frac{S_o}{K_{oh} + S_o} \right) + \eta_k \left(\frac{K_{oh}}{K_{oh} + S_o} \right) \left(\frac{S_{no}}{K_{no} + S_{no}} \right) \right] X_{bh} \right\}$$

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

4相关速率方程

在8个子过程基本速率方程的基础上，参各子过程的其他组分的反应动力学方程可经过系数调整依次建立。

4.1异养菌好氧生长相关速率方程

异养好氧生长

异养菌 X_{bh}

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_1 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

1

易降解有机碳 S_s

$$\left(\frac{dS_s}{dt}\right)_1 = \left(-\frac{1}{Y_h}\right) \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

$-1/Y_h$

溶解氧 S_o

$$\left(\frac{dS_o}{dt}\right)_1 = \left(-\frac{1-Y_h}{Y_h}\right) \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

$-(1-Y_h)/Y_h$

氨态氮 S_{nh}

$$\left(\frac{dS_{nh}}{dt}\right)_1 = (-i_{xb}) \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

$-i_{xb}$

碱度 S_{alk}

$$\left(\frac{dS_{alk}}{dt}\right)_1 = \left(-\frac{i_{xb}}{14}\right) \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

$-i_{xb}/14$
23

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

4相关速率方程

4.1异养菌好氧生长相关速率方程

$$\rho_1 = \hat{\mu}_h \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{o,h} + S_o} X_{bh}$$

j=1	X_{bh}	S_s	S_o	S_{nh}	S_{alk}	ρ_j
异养菌 好氧生长	1	$-1/Y_h$	$-(1-Y_h)/Y_h$	$-i_{xb}$	$-i_{xb}/14$	ρ_1

说明

(1)该反应动力学方程的构建是以COD守恒为基础，而不是以反应物的质量守恒为基础。需要注意的是，任何反应物或产物，若其中的元素在生化氧化或还原中不改变氧化状态，那么它们的COD变化为零。如 CO_2 、碳酸盐和重碳酸盐等。

(2)生长系数 Y_h 的单位为g(生成细胞COD)/g(氧化COD)；

(3)因 S_s 是消耗，因此系数需加负号，即 $-1/Y_h$ ；

Activated Sludge Model No.1 (ASM1)

4相关速率方程

4.1异养菌好氧生长相关速率方程

(4)易降解有机碳被溶解氧生化氧化时，会发生电子得失，有机碳失COD，溶解氧与细胞得COD。有机碳失去的COD等于溶解氧与细胞各自所得COD之和。

设溶解氧的化学计量系数为K，根据COD守恒可得，

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_{COD} + \left(\frac{dS_o}{dt}\right)_{COD} = \left(\frac{dS_s}{dt}\right)_{COD}$$

$$\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_{COD} + K\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_{COD} = \frac{1}{Y_h}\left(\frac{dX_{bh}}{dt}\right)_{COD}$$

$$K = \frac{1 - Y_h}{Y_h}$$

因溶解氧是消耗，故乘以-1的系数

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/165223011144011240>