

全污水处理厂数学模拟的 BioWin 模型

胡志荣 Chapman K. Dold P. Jones R. Takács I.

(加拿大 EnviroSim 环境咨询公司, Ontario, Canada)

摘要 目前污水处理厂的数学模拟已经朝全污水处理厂模拟的方向发展,着眼于污水处理厂整体的优化设计和运行。随着厌氧消化模型和旁流工艺模型的开发,建立包括一个污水处理厂水区和泥区在内的全厂污水处理工艺模拟已经成为可能。全污水处理厂数学模拟将是污水处理厂节能减排方案分析和评价的重要工具。全面介绍了全污水处理厂模拟的 BioWin 模型,主要包括活性污泥模型、厌氧消化模型和旁流处理工艺模型,并将此模型与现行其他常用模型进行对比。

关键词 活性污泥模型 全污水处理厂数学模拟 BioWin 数学模型 优化设计 节能减排

一个现代化的生物污水处理厂由于包括了脱氮除磷的功能而使得活性污泥工艺变得复杂。其优化设计和运行在没有模型帮助的情况下几乎不可能实现。活性污泥工艺优化设计、运行和研究的要求极大地推动了过去 30 年中活性污泥工艺模型的研究,开发和工程应用。到目前已经开发了各种动态的活性污泥数学模型。典型的活性污泥工艺的动态模型有:①南非开普顿大学的系列模型,包括 UCTOLD 模型(Dold 等,1980,1991),这是第一个系统的除碳和氮的活性污泥动态模型,是国际水协 ASM1 模型的基础;

②UCTPHO 模型(Wentzel 等,1992),这是第一个生物脱氮除磷模型,是国际水协 ASM2/ASM2d 模型的基础;UCT 模型,(Hu 等,2007a,b),这是最新的 UCT 生物脱氮除磷改进模型;③国际水协系列模型(ASM1、ASM2/ASM2d、ASM3 模型, Henze 等,2000);④Barker 和 Dold 模型(1997)(本文将介绍的全污水处理厂 BioWin 模型的基础);⑤TUD 模型(Delft University of Technology, 荷兰代尔夫特工业大学的生物除磷的新陈代谢模型与 ASM2d 中去除 COD 和氮模型结合的综合模型, Brdjanovic 等., 2000; 性较差。

方案四在古镇建设原水泵站向中南部供水,由于管道较长,需穿越较多的河涌、道路及建成区,施工难度较大;西江江面开阔,江岸较直,咸潮上溯速度快,未来咸潮如进一步加剧,上溯到外海大桥一带的可能性较大,因此方案保障性较差;在经济性方面,咸潮期间每万 m³ 供水能力的投资是 1 233 万元,经济性较差。

方案五建设古宥水库,向坦洲水厂和南镇水厂供应原水实施难度一般;采用蓄淡方式抗咸,如水库容

因此,经分析研究,建议采用方案一“长江水厂扩建”和方案二“全禄水厂蓄淡抗咸”,解决中心片区咸潮期间用水问题。

8.2 南部片区方案比较

从实施难度、方案保障性和经济性对与南部片区有关的 2 个规划方案进行比较。

方案四在古镇建设原水泵站向中南部供水,同时对中心片区、南部片区起作用,在前面已介绍其优缺点,在经济性方案,如去掉供水中心片区功能,估算咸潮期间每万 m³ 供水能力的投资是 3 217 万元,经济

因此,经分析研究,建议采用方案五建设古宥水库,向坦洲水厂和南镇水厂供应原水来解决南部片区咸潮期间用水问题。

以上方案实施后,可基本解决中山市咸潮期间的用水需求。

○通讯处:528403 中山市银竹街中山市供水有限公司
技术部

电话:(0760)8231773

E-mail:zs_huang@sohu.com

收稿日期:2008-02-28

Veldhuizen 等., 1999)。

活性污泥模型借助于免费和商业化的模拟软件在活性污泥工艺的优化设计和运行以及研究中得到了广泛的应用并积累了丰富的经验。可是, 这些模型大多数集中在污水处理厂的主流工艺部分。因此, 这种优化仅仅是局部的优化。并没有考虑污泥处理工艺及其对主流工艺影响的整体优化(见图 1)。随着水污染控制要求的提高, 污水处理厂出水氮磷的排放标准也变得更加严格。因此, 目前污水处理厂的数学模拟已经朝全污水处理厂模拟的方向发展, 着眼于污水处理厂整体的优化设计和运行。全污水处理厂数学模拟是污水处理厂节能减排方案分析和评价的重要工具。BioWin 数学模型即是一个典型的全污水处理厂的数学模型。BioWin 已经经过十多年的开发并且已经在工程中得到广泛应用。为了对全污水处理厂的数学模拟有一个全面的了解, 本文将对 BioWin 数学模型的主要特征做一综合的介绍(更详细的可参考 EnviroSim 2007a, b)。

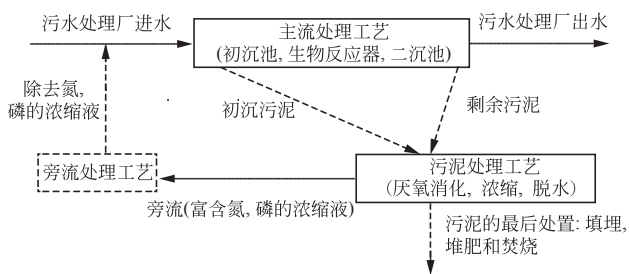


图 1 典型的生物脱氮除磷活性污泥法的全污水处理厂模拟模型的要求

1 全污水处理厂的 BioWin 数学模型

单一矩阵的全污水处理厂的 BioWin 数学模型是指在加拿大 EnviroSim 环境咨询公司开发的 BioWin 模拟软件中实施的模型。与其他的模拟软件相比, BioWin 模拟软件是唯一使用自己模型的软件, 而不像其他模拟软件使用国际水协的数学模型。这个模型在技术文献中通常称为 ASDM 模型。它主要起源于综合了各种活性污泥动力学模型(如 UCT 和 IWA)的 Barker/Dold 模型(Barker 和 Dold 1997)。BioWin 模型的结构使得在模拟一个全污水处理厂时集所有的物理、化学和生物工艺于一个综合的模型中成为可能, 即模拟污水处

理厂中每一个特定的工艺单元的行为和这个单元中依赖于其环境条件(泥龄、温度和 pH)的主要反应。BioWin 数学模型可以追踪整座污水处理厂中任何一个模型组分或状态变量在不同单元工艺中的变化(BioWin 能够追踪 50 个模型组分。如普通异养菌、氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌等)以及作用于这 50 个模型组分的 60 多个物理、化学和生物反应(包括活性污泥反应、厌氧消化、旁流工艺、气体转移及化学沉淀反应)。BioWin 数学模型的参数已经经过大量研究和工程应用的校正。虽然 BioWin 模型是一个单一矩阵的综合模型, 为了便于理解, 我们仍以单元工艺为基础按工艺模块(见图 1)的形式介绍 BioWin 模型, 即: ①主流处理工艺模型; ②污泥处理工艺模型; ③旁流处理工艺模型。图 2 给出了 BioWin 中一个典型的全污水处理厂的模拟工艺流程。有些工艺反应在活性污泥、旁流处理工艺与厌氧消化同时存在, 但模型参数可能不同。

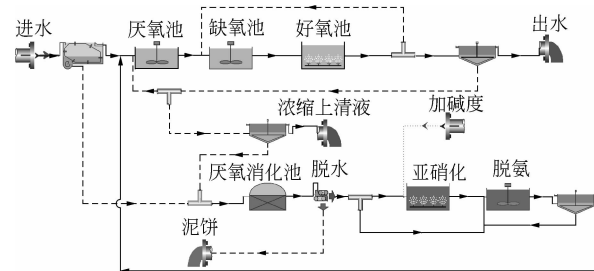


图 2 BioWin 中全污水处理厂的模拟工艺流程

该工艺除了活性污泥的主流处理工艺和污泥处理的厌氧消化外还包括旁流处理工艺(剩余污泥经脱水后与初沉污泥混合进入厌氧消化池, 厌氧消化池的上清液一部分进入 Sharon 单元另一部分直接进入厌氧氨氧化(ANAMMOX)反应器, 处理后返回主流工艺)。

2 BioWin 数学模型中的活性污泥模型

一般的活性污泥污水处理厂包括初沉池、生物反应器、二沉池。因此 BioWin 活性污泥工艺模型还包括了曝气系统的模型(扩散曝气、表面曝气、转刷曝气的模拟), 沉淀池模型(双指数沉淀模型)和生物膜模型, 能够模拟生物脱氮除磷活性污泥工艺、初沉污泥发酵、也可以模拟包含生物膜生长的自由漂浮的介质(填料)的活性污泥反应器(IFAS)工艺和

生物移动床反应器(MBBR)系统以及生物滤池、生物曝气滤池、二级反硝化滤池。由于篇幅所限,这里仅给出 BioWin 活性污泥模型的一些主要功能特征(表 1 给出了 BioWin 模型和其他模型的主要特征比较)。

2.1 普通异养菌(OHOs-非聚磷菌)的生长和衰减

共有 12 个工艺反应描述普通异养菌(OHOs)在好氧和缺氧条件下的生长和衰减。其生长的基质有醋酸、丙酸、RBCOD 和甲醇。注意 OHOs 只能在好氧条件下利用甲醇生长。在缺氧条

件下 OHOs 不能利用甲醇生长只有甲醇菌可以利用其生长(请参见下面的甲醇菌)。厌氧区的 RB-COD 发酵也是普通异养细菌的生长反应(请参见后面的厌氧消化部分)。这些反应的功能是描述活性污泥工艺中除 COD 和反硝化。它们的基本速率表达都是最大比生长率、浓度和生长基质的 Monod 公式的乘积,见式(1)。

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

式中 μ ——微生物的比增殖速度;

μ_{\max} ——微生物最大比增殖速度;

表 1 城市污水处理厂各种活性污泥模型的主要特征比较

模型名称	ASM1	ASM3	ASM2d	ADM1	BioWin
发表时间/更新时间	1987	1999	1995	2002	1991/2007
模型类型	除碳、氮	除碳、氮	除碳、氮和磷	厌氧消化	除碳、氮和磷,pH 和厌氧消化,旁流处理工艺
状态变量数	13	12	19	26	50
模型参数个数	19	38	73	40	246
参数的有效范围					✓
模型校正的工作量	中等	高	高	非常高	低
实际工程应用	广泛	较少	广泛	较少	广泛
精确预测 TSS					✓
详细的内源呼吸	✓		✓		✓
硝化	一步硝化	一步硝化	一步硝化		两步硝化作为插入模型
反硝化	✓	✓	✓		✓
同步硝化反硝化					✓
利用甲醇反硝化	近似	近似	近似		✓
反应器中 pH 计算				✓	✓
生物反应中 pH 限制	碱度替代	碱度替代	碱度替代	✓	✓
CO ₂ 、NH ₃ 气体剥离					✓
与铁(铝)盐的磷沉淀			✓(经验公式)		✓
与钙的磷沉淀					✓
发酵作用			✓	✓	✓
生物气体的产生(CH ₄ ,CO ₂ ,H ₂)				✓	✓
镁的转移,鸟粪石的形成					✓
温度依赖性(温度范围)	有(8~30℃)	有(8~30℃)	有(8~30℃)	有(25~55℃) (二个参数集)	有(8~35℃)
全污水处理厂模拟	要求活性污泥和厌氧消化模型之间的界面			各种模型使用一组共同的状态变量	

注:✓代表有此功能。

K_s ——半速度常数;

S ——有机底物浓度。

然后用这个基本速率乘以反映细菌生长的不同环境条件(溶解氧条件,亚硝酸盐和硝酸盐存在与否)和营养盐(氮、磷和其他离子如镁和钾)限制的条件以及 pH 抑制情况的各种修正项。普通异养菌(包括甲醇菌)在好氧、缺氧生长时的 pH 上限是 4, 下限是 10。即在 pH 等于上、下限时细菌的生长速率将减少 50%。细菌在好氧、缺氧条件下表现出对 pH 变化的极大忍耐性。因此 pH 变化范围很大。而普通异养菌在厌氧发酵时的 pH 的上限是 5.5, 下限是 8.5。这些细菌生长的氮源是氨。在氨浓度低时,一个同化反硝化反应将把亚硝酸盐和硝酸盐转化为氨以提供细菌生长所需的氮源。在缺氧条件下乘以一个缺氧生长减少因子。普通异养菌衰减速率在不同环境条件下不同。

2.2 甲醇菌(*Methylotrrophs*)的生长和衰减

在总氮要求非常严格的情况下,通常由于污水中碳源不足而在缺氧池中加入甲醇进行反硝化。一种专门利用甲醇的异养菌由于生长特征(生长速率和单位产率系数)同从普通异养菌中单独分出来。这是由于甲醇只能被甲醇菌利用,多余的甲醇投加量不仅增加费用而且增加泥量(多余的甲醇将被普通异养菌在好氧条件下利用)。甲醇菌的生长特征对于优化甲醇的投加量非常重要。共有三个工艺反应描述专门的利用甲醇的普通异养菌(甲醇菌)在缺氧条件下的生长和衰减。这些甲醇菌只能在缺氧条件下利用甲醇生长并把亚硝酸盐或硝酸盐反硝化为氮气。这要求一个类似于硝化菌最低的 SRT 以维持甲醇菌在系统中生存。甲醇菌利用氨作为氮源。这些生长反应的基本速率表达都是最大比生长速率,甲醇菌浓度和甲醇浓度的 Monod 公式的乘积。这个基本速率然后乘以反映甲醇菌生长的不同环境条件(溶解氧,亚硝酸盐和硝酸盐存在与否)和营养盐(氮、磷和其他离子如镁和钾)限制的条件以及 pH 抑制情况的各种修正项。BioWin 中甲醇菌优先利用亚硝酸盐。衰减速率在不同环境条件下不同。

2.3 氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NOB)的生长和衰减

BioWin 中的硝化反应适用于活性污泥工艺和旁流工艺,它是二阶段的硝化,即氨氧化为亚硝酸盐,亚硝酸盐氧化为硝酸盐:

(1) 氨氧化菌利用氨氧化为亚硝酸盐获得能量,把无机碳(固定二氧化碳)合成为有机材料。合成的氮源为氨。基本速率表达式为最大比生长率、氨氧化菌浓度和氨的 Monod 公式的乘积。然后用这个基本速率乘以反映氨氧化菌生长的不同环境条件(低溶解氧,亚硝酸的抑制)和营养盐(磷、无机碳和其他离子如镁和钾)限制的条件以及 pH 抑制情况的各种修正项。BioWin 中细菌利用氨作为氮源。氨氧化菌衰减速率在不同环境条件下不同。

(2) 亚硝酸盐氧化菌利用亚硝酸盐氧化为硝酸盐获得能量把无机碳(固定二氧化碳)合成为有机材料。合成的氮源为氨。基本速率表达式为最大比生长率、亚硝酸盐氧化菌浓度和亚硝酸盐的 Monod 公式的乘积。然后用这个基本速率乘以反映亚硝酸盐氧化菌生长的不同环境条件(低溶解氧,亚硝酸的抑制)和营养盐的(磷、无机碳和其他离子如镁和钾)限制条件以及 pH 抑制情况的各种修正项。BioWin 中细菌利用氨作为氮源。

氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌生长时的 pH 上限是 5.5, 下限是 9.5。即在 pH 等于上、下限时氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌的生长速率将减少 50%。氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌衰减速率在不同环境条件下不同。必须注意氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的生长速率受污水特征的影响非常显著以至往往把生长速率参数看成污水特征参数。通常在模型校准时必须测定。

2.4 聚磷菌(PAOs)的生长和衰减

共有 15 个工艺反应描述聚磷菌(PAOs)在所有条件下的生长和衰减。这包括了聚磷菌的好氧和缺氧生长,VFA(BioWin 中聚磷菌可以使用醋酸和丙酸)的储存和聚合磷的分解:

(1) 聚磷菌的好氧生长:好氧条件下聚磷菌有两个最大比生长速率。较低的速率用于磷限制的条件并具有不同的化学计量参数(没有聚合磷的储存)。同样有两个聚磷菌的缺氧生长,一个使用硝酸盐另一个使用亚硝酸盐。在磷酸盐充足的情

况下,聚磷菌生长的同时吸收磷酸盐和平衡所需的钙,镁和其他离子。如果缺少这些离子将通过合适的开关函数停止聚磷菌生长。这些生长反应的基本速率表达都是最大比生长率、聚磷菌浓度和聚磷菌 COD 浓度与 PHACOD 浓度比率的 Monod 公式的乘积。这个基本速率然后乘以反映细菌生长的不同环境条件(溶解氧条件、亚硝酸盐和硝酸盐)和营养盐(氮、磷和其他离子如镁和钾)限制的条件以及 pH 抑制情况的各种修正项。聚磷菌生长时的 pH 上限是 4,下限是 10。即在 pH 等于上、下限时聚磷菌的生长速率将减少 50%。聚磷菌利用氨作为氮源。在氨浓度低时,一个同化反硝化反应将把亚硝酸盐和硝酸盐转化为氨以提供细菌生长的氮源。

(2) 聚磷菌的缺氧生长:聚磷菌的缺氧生长与好氧相同,只是在缺氧条件下的电子接受者不是氧气而是亚硝聚盐或硝聚盐(聚磷菌优先使用亚硝聚盐),反应的基本速率是好氧速率乘以一个缺氧生长减少因子。

(3) 醋酸和丙酸的吸收和储存:聚磷菌使用聚合磷中储存的能量吸收 VFA(醋酸和丙酸)并把它们以 PHA 的形式储存在细胞中。醋酸和丙酸吸收的基本速率是吸收速率、聚磷菌浓度和醋酸(或丙酸)浓度的 Monod 公式的乘积。吸收的速率方程只在储存的聚合磷存在的条件下打开。

(4) 聚磷菌衰减:聚磷菌有两种衰减反应即好氧衰减和厌氧/缺氧衰减。衰减反应的同时储存的 PHA 和聚合磷产生水解。水解速率与衰减速率成正比。在厌氧条件下有一个维持聚磷菌生存的储存聚合磷的分裂并释放磷酸盐的反应。这个反应速率与聚磷菌厌氧衰减速率成正比。

2.5 颗粒物质的水解、胶体有机物的吸附、溶解有机氮的氨化和亚硝酸盐和硝酸盐的同化反硝化

这些工艺反应与细菌组分开讨论是因为它们涉及到一组以上的细菌(一般情况下是普通异养菌和聚磷菌)。这些反应的功能是描述活性污泥工艺和厌氧消化中有机组分(COD),氮和磷组分在细菌的作用下的转化(参见下面的厌氧消化)。

(1) 可降解的颗粒 COD(SBCOD)转化为快速降解的复杂 COD(RBCOD)的水解:反应的基本速

率表达是水解速率常数、普通异养菌和聚磷菌质量之和和颗粒基质与细菌质量比率的 Monod 公式的乘积。在缺氧和厌氧条件下分别有一个效率系数。在厌氧消化池中由异养生物产生的颗粒物质的厌氧水解速率高于活性污泥工艺中的厌氧水解速率。

(2) 可降解的颗粒有机氮和磷的水解:水解速率假定与 SBCOD 转化为 RBCOD 的水解速率相同,但是利用可降解的颗粒有机氮(或磷)与 SB-COD 的比率进行调整。

(3) 胶体有机物吸附和絮凝到颗粒有机物(与添加金属盐的化学辅助絮凝相反,它们是自发产生):反应的基本速率表达是吸附速率常数、胶体有机物浓度和普通异养菌和聚磷菌质量之和的乘积。这个速率随着颗粒基质与细菌质量 COD 的比率接近最大的吸附速率常数而减小。

(4) 溶解有机氮的氨化:反应的基本速率表达是氨化速率常数,溶解有机氮浓度和普通异养菌和聚磷菌质量之和的乘积。

(5) 同化反硝化:细菌利用氨作为氮源。在氨浓度低时,一个同化反硝化反应将把亚硝酸盐和硝酸盐转化为氨以提供细菌生长的氮源。反应的基本速率表达是同化速率常数,普通异养菌和聚磷菌质量的 COD 之和的乘积。这个速率在不同的环境条件下进行修正(在亚硝酸盐和硝酸盐之间选择)。

3 BioWin 数学模型中的厌氧消化模型

国际水协的厌氧消化模型 ADM1(IWA,2002)是一个综合详细的厌氧消化工艺模型。但是,该模型在应用于全污水处理厂模拟时有许多限制:

(1) ADM1 的状态变量与标准的活性污泥模型(ASM 系列以及其他模型)不同,需要一个界面模型在活性污泥模型和 ADM1 模型之间进行转换。建立这样一个质量守恒的界面转换模型不是一个简单的任务,特别是某些组分还表达为状态变量的一部分;

(2) ADM1 不包括磷为状态变量,而厌氧消化中磷的释放在生物脱氮除磷污水厂的模拟时特别重要(参见下面的旁流处理工艺);

(3) ADM1 不包括生物衰减时氮的释放,不能进行氮的质量平衡。而厌氧消化中氮的释放以及消

化池中上清液返回到水区是全污水处理厂模拟中的重要考虑(参见下面的旁流处理工艺)。

BioWin 模型中的厌氧消化模型是建立在四组微生物种群(异养菌、丙酸利用菌、酸甲烷菌和氢甲烷菌)的概念基础之上(概化模型如图 3 所示):

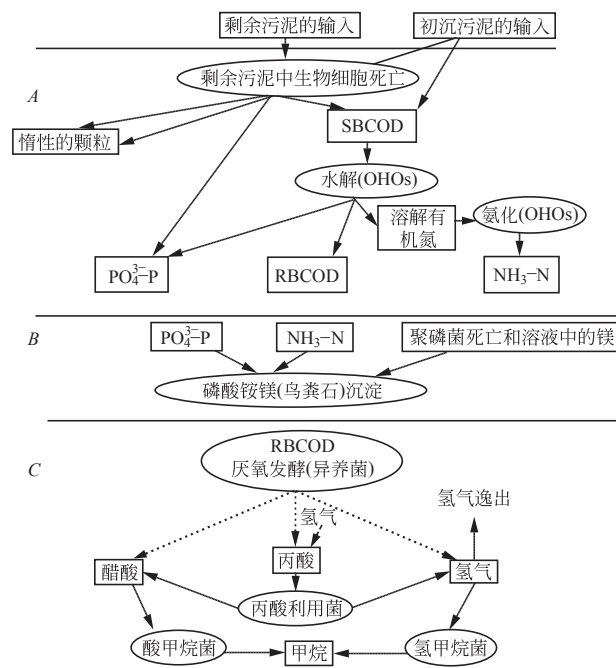


图 3 BioWin 模型中厌氧消化模型的概化示意

(1) 图中 A 段。活性生物的衰减、颗粒物质的水解和溶解有机氮的氨化——厌氧消化池中的这三种反应与活性污泥中的相同,不同之处是活性生物的厌氧衰减在活性污泥中作用不大或者说不显著以及颗粒物质在消化池中的厌氧水解速率低于活性污泥中的厌氧水解速率,因此在 BioWin 中使用不同速率参数值(消化池中的颗粒物质来源于消化池的输入(如初沉污泥)和池中活性生物(如来自于脱氮除磷的剩余污泥中的 OHOs 和 PAOs)的厌氧衰减);

(2) 图中 B 段。磷酸氨镁(鸟粪石)的化学沉淀——厌氧消化池中厌氧衰减和水解产生的镁、铵和磷酸盐在合适的条件下(特别是在 CO_2 逸出 pH 升高的情况下)形成磷酸氨镁。磷酸氨镁的沉淀是基于一个动力学的反应模型,主要参数是鸟粪石溶解常数。这个反应对于 pH 很敏感,并且与镁的浓度成线性关系,而且在高的碱度、氨和磷酸盐浓度的条件下发

生。鸟粪石的化学沉淀可能发生于活性污泥工艺中但通常条件难以满足。

(3) 图中 C 段。RBCOD 的厌氧发酵、丙酸产酸菌和甲烷菌的生长和衰减,详述如下。

a. RBCOD 的厌氧发酵。在厌氧消化中异养生物把溶解可降解 RBCOD 发酵为醋酸,丙酸和氢气的发酵反应与活性污泥厌氧区的发酵反应相同。溶解氢气的浓度控制了发酵成醋酸和丙酸的相对速率。低浓度有利于醋酸的形成而高浓度有利于丙酸的形成。形成醋酸的发酵产生氢气而形成丙酸的发酵消耗氢气。基本速率表达是最大比生长率,普通异养生物浓度和 RBCOD 浓度的 Monod 公式的乘积。这个基本速率然后乘以反映营养盐(磷、无机碳和其他离子如镁和钾)限制的条件和 pH 抑制情况的各种修正项。BioWin 中细菌利用氨作为氮源。氢气的逸出速率假定与溶解氢浓度和气体转移面积成线性关系。

b. 丙酸产酸菌的生长和衰减。丙酸产酸菌把丙酸转化为醋酸、 CO_2 和氢气。生长的基本速率表达是最大比生长率、丙酸产酸菌浓度和丙酸浓度的 Monod 公式的乘积。然后用这个基本速率乘以反映丙酸产酸菌生长的环境条件(只在厌氧打开并受氢气和甲酸的抑制)和营养盐(磷、无机碳和其他离子如镁和钾)限制的条件以及 pH 抑制情况的各种修正项。BioWin 中细菌利用氨作为氮源。丙酸产酸菌衰减速率在不同环境条件下不同。

c. 甲烷菌的生长和衰减。甲烷的产生是两组细菌生长的结果。酸甲烷菌利用醋酸生长,而氢甲烷菌利用氢气生长。生长的基本速率表达是最大比生长率、甲烷菌浓度和醋酸浓度(或氢气浓度)的 Monod 公式的乘积。然后用这个基本速率乘以反映甲烷菌生长的环境条件(只在厌氧打开并受氢气和甲酸的抑制)和营养盐(磷、无机碳和其他离子如镁和钾)限制的条件以及 pH 抑制情况的各种修正项。BioWin 中细菌利用氨作为氮源。甲烷菌衰减速率在不同环境条件下不同。

d 厌氧消化工艺中的弱酸弱碱系统(pH 模型): 一个基于水化学平衡包括了消化池中的各种组分(如磷酸盐、氨、醋酸、丙酸、钙、镁和其他强酸

强碱)和二氧化碳,氨气的气体转换的 pH 模型。这个 pH 模型可以计算污水处理厂中各个工艺包括活性污泥,厌氧消化和旁流工艺中的 pH 及其变化。

全污水处理厂中镁、氮和磷三个状态变量的变化:①活性污泥工艺中磷在厌氧、缺氧和好氧条件下的释放,吸收和储存以形成聚合磷或分解成磷酸盐。在聚合磷形成或分解的同时,镁和其他电荷平衡的阳离子按照试验确定的化学计量比例储存在聚磷菌中或从聚磷菌中释放到水溶液中。②厌氧消化工艺单元接受通过剩余污泥从活性污泥工艺排入的包含储存的磷,阳离子(包括镁)和氮的生物细胞。在厌氧条件下聚磷菌和其他生物细胞死亡时聚合磷和相关离子(包括镁)以及氮释放到水溶液中。BioWin 模型中包括了一个综合的模型矩阵,因此,有关镁、氮和磷以及其他组分的连续性和质量平衡将自动形成,不需要一个在活性污泥模型和污泥处理的厌氧消化模型之间进行转换的界面模型。

4 BioWin 数学模型中的旁流处理工艺模型

在污水处理厂的各种污泥处理工艺单元(如厌氧消化、脱水、浓缩)中产生的液体(通常称为上清液、浓缩液、废弃水)与污水主流相对应称为旁流。这些旁流通常返回到主流的活性污泥工艺的前端与原污水混合进入主流处理工艺。由于这种旁流的氮和磷浓度相当高,可导致进水中氮和磷含量的显著增加。旁流中的氮含量可达到原进水的 15%~25%。增加的氮含量不仅增加了处理费用,而且增加了污水处理厂氮达标的难度如碳源不足,碱度不够,曝气能力和 SRT 受限。为减少这些来自旁流增加的氮和磷对主流工艺的影响,必须在这些旁流返回到主流工艺之前除去高浓度的氮和磷。实际上,由于旁流的浓度高,温度高,流量小处理的效率将比在主流工艺中有效。旁流中除磷是通过自发的化学沉淀(如高浓度的氮,镁和磷酸盐在合适的 pH 下形成磷酸铵镁石)和加铁盐或铝盐形成磷酸盐沉淀物除去。这些反应可以通过与 BioWin 生物模型综合在一起的磷的沉淀和化学污泥形成的化学沉淀模型模拟。BioWin 中的化学沉淀模型由于篇幅所限在此不作详细介绍。

旁流中的除氮工艺近年来已经得到了广泛的研究并已开始实际的工程应用(如荷兰和美国纽约)。旁流处理工艺的结构多种多样但从生物反应的基本概念出发可以描述成下面的一个或多个生化反应的组合即两步硝化,两步反硝化和厌氧氨氧化反应(见图 4)。

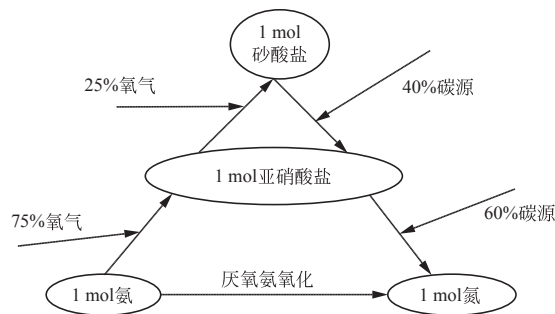


图 4 BioWin 模型中的厌氧消化模型的概化模型

两步硝化,两步反硝化已经在活性污泥工艺模型中描述。但是必须注意当模拟开始时旁流反应器单元选择的“引种”值不同于其他标准活性污泥反应器的值。厌氧氨氧化反应是指在厌氧氨氧化细菌作用下,无需碳源能够把氨和亚硝酸盐转换成氮气的自养生物(见图 4)。与主流处理工艺相比旁流处理工艺在工艺运行和控制上需要一些特别的考虑:

(1) 把硝化控制在亚硝酸盐的形成而避免硝酸盐的形成依赖于 AOB 和 NOB 的生长速率和温度依赖系数的差别以及基质和中间物的浓度对 AOB 和 NOB 二组细菌的抑制的差别。与把氨转换成硝酸盐相比,把氨转换亚硝酸盐所需的氧(和碱度)要少(从图 4 可知少 25%)。在旁流处理工艺中生长的硝化菌(氨氧化菌、亚硝化菌)可以引种到活性污泥工艺中(类似于添加生物制剂的生物补强作用)使工艺硝化所要求的泥龄缩短;

(2) pH 控制在工艺的成功中起重要作用;

(3) 厌氧氨氧化菌的生长速率很低,要求启动时间与泥龄较长。在厌氧氨氧化工艺中,反硝化不需要碳源,因此,没有生物污泥也没有 CO_2 增加;

(4) 硝酸盐相比,亚硝酸盐反硝化所需的碳源较少(从图 4 可知少 40%)。

厌氧氨氧化模型:厌氧氨氧化菌通过把氨或亚硝酸盐氧化成氮气的生长,生长中利用氨和亚硝酸

盐氧化为氮气获得能量把无机碳(固定二氧化碳)合成为有机材料。合成的氮源为氨。基本速率表达是最大比生长率,厌氧氨氧化菌浓度和氨浓度的 Monod 公式的乘积或者是最大比生长率,厌氧氨氧化菌浓度和亚硝酸盐浓度的 Monod 公式的乘积。然后用这个基本速率乘以反映厌氧氨氧化菌生长的不同环境条件(低溶解氧,亚硝酸的抑制)和营养盐(磷、无机碳和其他离子如镁和钾)限制的条件以及 pH 抑制情况的各种修正项。厌氧氨氧化菌利用氨作为氮源。厌氧氨氧化菌生长时的 pH 上限是 5.5,下限是 9.5,即在 pH 等于上、下限时厌氧氨氧化菌的生长速率将减少 50%。厌氧氨氧化菌衰减速率在不同环境条件下不同。

5 结语

生物污水处理工艺的数学模型已经从单纯的活性污泥模型发展到包括污泥处理工艺(如厌氧消化)和旁流处理工艺在内的全厂污水处理工艺模型。这使得污水处理厂整体优化设计和运行成为可能。全污水处理厂数学模拟将是污水处理厂节能减排方案分析和评价的重要工具。BioWin 模型是一个综合的全污水处理厂模型,已经过十多年的开发和广泛的工程应用。BioWin 全污水处理厂数学模型描述了生物污水处理厂中不同单元工艺中 9 组细菌(微生物组)的生长和死亡以及以不同形式存在的 3 种主要污染物(碳、氮和磷)在物理、化学和细菌的生物作用下的各种转化。BioWin 模型的动力学参数和化学计量参数已经通过大量的研究和工程应用得到校正。因此,在工程应用时模型校正的工作量已经大大减少。模型校正的工作主要集中在污水处理厂的污水特征化和运行参数(如各种循环流、泥龄)的分析评价。有关污水特征化的方法和监测数据的分析评价用于模拟的方法在北美已经标准化。这种污水处理工艺数学模型应用的标准化使得污水处理厂的数学模拟在北美成为日常的工程工具。

参考文献

- 1 胡志荣,周军,甘一萍,等.基于 BioWin 的污水处理工艺的数学模拟与工程应用.中国给水排水,2008,2
- 2 Barker P S,Dold P L.General model for biological nutrient removal activated sludge systems;Model presentation. Water Environment Research,(1997)69(5):969~984

- 3 Brdjanovic D, van Loosdrecht M C M, Versteeg P, et al. Modeling COD, N and P removal in a full-scale WWTP Haarlem Waarderpolder. Water, Res, 2000, 34(3): 846~58
- 4 Dold P L, Ekama G A, Marais G R. A general model for the activated sludge process. Prog. Water Technol, 1980, 12: 47~77
- 5 Dold P L, Wentzel M C, Billing A E, et al. Activated sludge simulation programs: Version 1.0 Nitrification and nitrification/denitrification systems. Pub. by Water Research Commission, P/Bag X03, Gezina 0031, South Africa, 1991
- 6 Dold P L, Takács I, Moxhayeri Y. Denitrification with carbon addition-kinetic considerations. Nutrient removal, state of the art, Baltimore, USA, 2007
- 7 Dold P L, Fairlamb P M, Jones R, et al. Sidestream Modelling Incorporated Into Whole Plant Simulation. Closing the Nitrogen Cycle from Urban Landfill Leachate by Biological Nutrient Removal over Nitrate and Thermal Treatment. Workshop Program. April 19-20, Barcelona, Spain, 2007
- 8 EnviroSim(2007a) BioWin User Manual, Model Description
- 9 EnviroSim (2007b) Process model formulation (<http://www.envirosim.com/downloads/modelsusedinbiowin.pdf>)
- 10 Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Scientific and Technical Report IWA. London, 2007
- 11 Hu Z, Wentzel M C, Ekama G A. A general model for biological nutrient removal activated sludge systems; Model development. Biotechnology & Bioengineering, 2007a, 98 (6): 1242~1258
- 12 Hu Z, Wentzel M C, Ekama G A. A general model for biological nutrient removal activated sludge systems; Model development. Biotechnology & Bioengineering, 2007b, 98 (6): 1259~1275
- 13 IWA. Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). Scientific and Technical Report No. 13. IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes, IWA Publishing, 2002
- 14 Takács I, Bye C M, Chapman K, et al. A biofilm model for engineering design. Water Science & Technology, 2006, 55: (8-9) 329~336
- 15 van Veldhuizen H M, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Modelling biological phosphorus and nitrogen removal in a full scale activated sludge process. Wat Res, 1999, 33 (16): 3459~3468
- 16 Wentzel M C, Ekama G A, Marais G R. Process and modeling of nitrification denitrification biological excess phosphorus removal systems-A review. Wat Sci Tech, 1992, 25(6): 59~82

&E-mail: Hu@envirosim.com

收稿日期: 2008-03-14

修回日期: 2008-06-07