

丝状菌污泥膨胀理论分析

王凯军, 许晓鸣

(北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘 要: 对丝状菌污泥膨胀现象进行了综合分析, 并在广义 Monod 方程的基础上基本统一了污泥膨胀理论和建立了相关的数学模型。该模型可以很好地解释由基质限制、DO 限制、营养物缺乏、pH 和 H₂S 等因素引起的丝状菌污泥膨胀。利用广义 Monod 方程采用双基质限制(碳源和溶解氧)模型和系统动力学方程进行了计算机模拟研究, 对有机负荷、DO、水质和水量变化等因素对菌胶团细菌和丝状菌的竞争影响进行了深入的探讨, 并在此基础上针对不同的污泥膨胀类型提出了相应的控制策略。

关键词: 丝状菌污泥膨胀; 广义 Monod 方程; 丝状菌; 环境调控

早期控制丝状菌污泥膨胀(简称污泥膨胀)的主要手段是投加药剂杀死丝状菌, 或投加混凝剂和助凝剂以增加污泥絮体的比重 [1], 但这些方法往往无法彻底解决污泥膨胀问题, 相反地可能会带来出水水质恶化的不良后果。其后人们逐渐认识到, 活性污泥中的菌胶团细菌和丝状菌构成一个共生的微生物生态体系, 在这种共生关系中, 丝状菌是不可缺少的重要微生物, 对于高效、稳定地净化污水起着重要作用, 并逐渐地从简单杀死丝状菌过渡到利用曝气池中的生长环境调整丝状菌的比例, 从而达到控制污泥膨胀的发生即进入环境调控阶段。环境调控概念的使用是人们在污泥膨胀控制技术和实践上的一大进步, 其主要出发点是使曝气池中的生态环境有利于选择性地发展菌胶团细菌, 利用生物竞争机制抑制丝状菌的过度生长和繁殖, 将丝状菌数量控制在一个合理的范围之内, 从而控制污泥膨胀的发生和发展, 同时利用丝状菌的特性净化污水, 稳定处理工艺。近年来选择器理论得到充分的发展和应用就是这一概念的具体体现。

1 污泥膨胀理论的统一

活性污泥是一混合培养系统, 其中至少存在着 30 种可能引起污泥膨胀的丝状菌。在丝状菌与菌胶团细菌平衡生长时不会产生污泥膨胀问题, 只有当丝状菌生长超过菌胶团细菌时, 才会出现污泥膨胀。丝状菌和菌胶团细菌的生理和生化性质差异见表 1。

表 1 丝状菌与菌胶团细菌的差异 [1]

性质	菌胶团菌	参考值	丝状菌	参考值
最大生长速率($\mu_{\max}$)	高	4.4 d ⁻¹	低	3.0 d ⁻¹
基质亲和力(K _S)	低	64 mg/L	高	40 mg/L
DO亲和力(K _{DO})	低	0.1 mg/L	高	0.027 mg/L
内源代谢率(K _d)	高	0.012 d ⁻¹	低	0.010 d ⁻¹
产率系数(Y)	高	0.153 g/g	低	0.139 g/g
积累能力(A)	高		低	
耐饥饿能力及贮存能力	高		非常低	

通过近年来国内外对活性污泥膨胀问题研究进展的分析和综合, 可以将引起丝状菌污泥膨胀的原因分为 5 种类型, 即 a. 基质限制; b. DO 限制; c. 营养物缺乏; d. pH 影响; e. H₂S 影响 [2]。

1.1 广义 Monod 方程

丝状菌与菌胶团细菌竞争的数学模型遵循多种基质限制的广义 Monod 方程, 即 Monod-McGee 方程 [1]:

$$\mu = \mu_{\max} (S_1 / (K_1 + S_1)) (S_2 / (K_2 + S_2)) \dots (S_n / (K_n + S_n)) \quad (1)$$

式中 $\mu_{\max}$ ——最大生长速率，d⁻¹

K_i ——第*i*种基质亲和力，mg/L

S_i ——第*i*种基质浓度

根据式(1)可知，基质限制、DO限制和营养物缺乏型的污泥膨胀问题都可用广义Monod方程来加以解释(当氮严重缺乏时的污泥膨胀不能归入这一理论，原因在于若缺乏氮，微生物便不能充分利用碳源合成细胞物质，过量的碳源将被转变为多糖类胞外贮存物，这种贮存物是高度亲水型化合物，易形成结合水，影响污泥的沉降性能，从而产生高粘性膨胀，其不属于丝状菌污泥膨胀范畴)。

关于pH的影响，可在动力学方程参数的基础上，以动力学常数的乘积因子的形式进行耦合，或者单独列出其动力学方程，从而统一在广义Monod方程之下。关于H₂S的影响，文献报道引起污泥膨胀的H₂S浓度很低，一般是在1~2.0 mg/L。但通过向污水中添加H₂S的试验发现，即使H₂S浓度达到 50 mg/L也不会发生污泥膨胀。事实上，一些厌氧装置虽然出水含有大量H₂S，但是挥发性有机酸浓度很低时，好氧后处理也不发生污泥膨胀；当挥发性有机酸达到一定浓度时需引起注意，其中主要的低分子有机酸(乙酸、丙酸)易于降解，因此造成耗氧速率的增加 [3]，引起氧的限制型膨胀，这是造成污泥膨胀的根本原因。而H₂S的出现是污水厌氧发酵的一个伴随现象，也可归为DO限制型的膨胀，从而广义的Monod动力学模型可以在一定程度上很好地统一污泥膨胀的理论。

1.2 双基质Monod方程

由于城市污水中N、P和其他营养元素一般不缺乏，因此在一般情况下，可只考虑碳源限制和DO限制两种情况。这样，城市污水的丝状菌污泥膨胀问题就简化为两种主要类型，即基质限制和DO限制型。

$$\mu = \mu_{\max} \left(S / (K_S + S) \right) \cdot (DO / (K_{DO} + DO)) \quad (2)$$

式中 $\mu_{\max}$ ——最大生长速率，d⁻¹

K_S ——基质亲和力，mg/L

K_{DO} ——DO亲和力，mg/L

2 污泥膨胀数学模型的研究

为了简化系统模型，假设：①活性污泥由两大类微生物群组成，即丝状菌和菌胶团菌；②微生物生长主要受到碳源和 DO 限制；③微生物生长的动力学可用同一基本模型来描述；④曝气池是完全混合式。模型所描述的系统如图 1 所示。

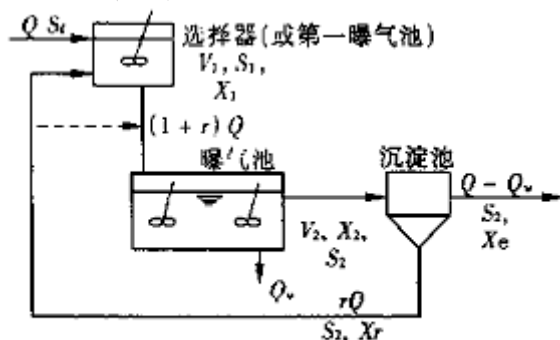


图 1 带选择器的活性污泥系统

其中反应器 1 根据不同的试验目的，可以分别是选择器、曝气池等，反应器 2 是曝气池。在没有选择器的系统中，回流污泥按虚线所示的途径回流。根据以上假设及图 1 中的物料平衡关系，可给出选择器和曝气池中基质(碳源和DO)和微生物(菌胶团和丝状菌)的一组方程。

选择器中菌胶团菌：

$$dX_{11} / dt = (\mu_1 - k_{d1} - 1/\theta_c) X_{11} \quad (3)$$



丝状菌:

$$dX_{21} / dt = (\mu_2 - k_{d2} - 1/\theta_c) X_{21} \quad (4)$$

碳源基质:

$$dS_{11} / dt = D_k(S_{10} + rS_{12}) - (1+r) \cdot D_1 S_{11} - \mu_1 X_{11} / Y_1 - \mu_2 X_{21} / Y_2 \quad (5)$$

DO:

$$dS_{21} / dt = -(1+r) D_1 S_{21} + K_{la}(S_{2S} - S_{21}) - \mu_1 X_{11} / Y_1 - \mu_2 X_{21} / Y_2 \quad (6)$$

曝气池中菌胶团菌:

$$dX_{12} / dt = (1+r) D_2 (X_{11} - X_{12}) + (\mu_1 - k_{d1}) X_{12} \quad (7)$$

丝状菌:

$$dX_{22} / dt = (1+r) D_2 (X_{21} - X_{22}) + (\mu_2 - k_{d2}) X_{22} \quad (8)$$

碳源基质:

$$dS_{12} / dt = (1+r) D_2 (S_{11} - S_{12}) - \mu_1 X_{12} / Y_1 - \mu_2 X_{22} / Y_2 \quad (9)$$

DO:

$$dS_{22} / dt = (1+r) D_2 (S_{21} - S_{22}) + K_{la}(S_{2S} - S_{22}) - \mu_1 X_{12} / Y_1 - \mu_2 X_{22} / Y_2 \quad (10)$$

式中 状态变量:

X_{ik} ——污泥浓度, mg/L; 其中*i*=1 或 2, 1 表示菌胶团菌, 2 表示丝状菌; *k*=1 或 2, 1 表示选择器, 2 表示曝气池

S_{jk} ——基质浓度, mg/L; 其中*j*=1 或 2, 1 表示碳源, 2 表示DO

S_{10} ——碳源基质初始浓度, mg/L

S_{2S} ——饱和DO浓度, mg/L

操作变量:

D_k ——稀释率, d⁻¹

r ——回流比

动力学常数:

k_{di} ——衰减常数, d⁻¹

Y_i ——产率系数, g/g

K_{la} ——传质系数, min⁻¹; 其常数见表1

μ_i ——比生长速率

2.1 进水负荷和曝气强度的影响

图2是方程10的计算机模拟结果。

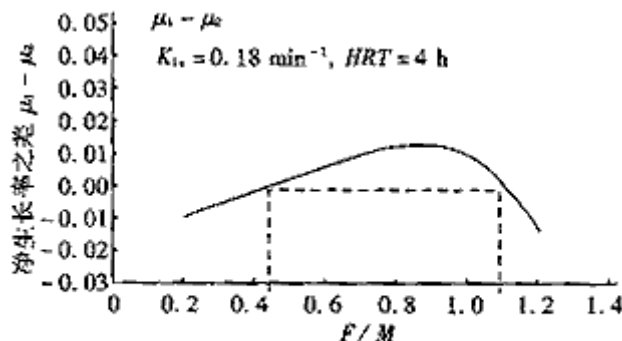


图2 进水负荷对菌胶团和丝状菌的影响

从图2可见, 丝状菌和菌胶团细菌的竞争优势随进水负荷而变化。低负荷阶段 [$< 0.4 \text{ kgCOD}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$], DO 的供应充分, 出现基质限制的情况; 高负荷阶段 [$> 1.1 \text{ kgCOD}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$],

基质浓度比较高，出现 DO 限制的情况；而在中间负荷范围内，丝状菌与菌胶团菌处于合理的比例，系统不发生污泥膨胀。

图 3 是在不同曝气条件下(Kla)的计算机模拟结果。

图 3 表明，即使存在选择器，低负荷和高负荷阶段仍然会发生污泥膨胀，其限值与没有选择器的系统不同。对于高负荷系统，曝气强度大可以提高污泥膨胀发生的上限，同样低负荷系统发生膨胀的下限也降低。对于中间负荷阶段，如果供氧不充分，丝状菌仍有可能大量繁殖并形成污泥膨胀。对于不同的曝气强度，两种微生物竞争优势发生转变的限值是不同的，这就是双基质动力学方程与传统的单一碳源基质限制动力学方程描述污泥膨胀现象的本质区别。试验的结果也表明，完全混合曝气池在不同负荷下维持稳定的沉降性能所需要的 DO 浓度是不一样的，而不是象文献报道的维持在固定的 1.0~2.0 mg/L 之间 [1]。

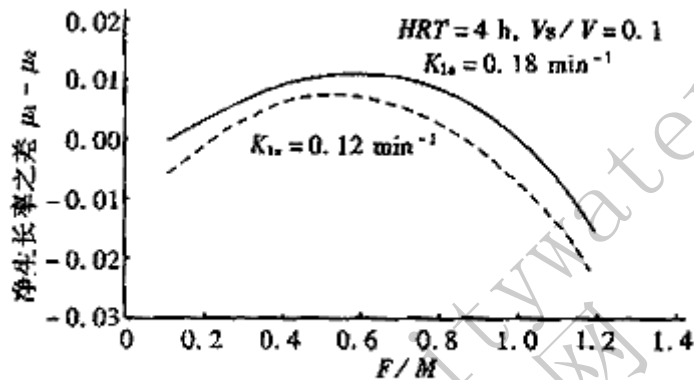


图 3 曝气强度对菌胶团和丝状菌的影响

2.2 进水流量和浓度变化的影响

试验发现在停留时间分别为 3、4、5 h 时，系统的 DO 浓度分别为 1.2、2.2、3.0 mg/L。图 4 是流量和基质浓度增加 1.5 倍时采用计算机模拟的结果。

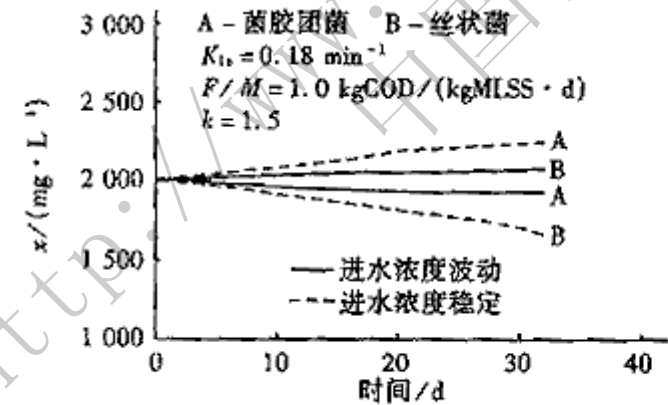


图 4a 进水浓度变化对菌胶团和丝状菌生长的影响

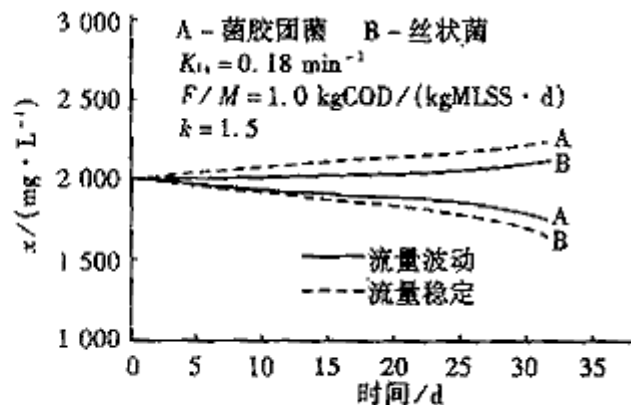


图 4b 进水流量变化对菌胶团和丝状菌生长的影响

在稳定的流量和浓度条件下长期运行的结果是菌胶团细菌占优势，而流量或基质浓度的变化会造成丝状菌的过度生长，且丝状菌的生长不是一简单的可逆过程，会造成污泥沉降性能的改变。上述结果是在相对高的负荷下的模拟结果，低负荷下的结论相反。

3 结论



①通过分析,将丝状菌污泥膨胀概括为 5 种类型,即:低基质浓度、低 DO、营养物(N、P)缺乏、H₂S 影响和 pH 引起的膨胀。采用广义 Monod 方程可解释大部分类型的污泥膨胀问题,这在一定程度上统一了污泥膨胀理论。由于城市污水中 N、P 和其他营养元素一般不缺乏,因此在一般情况下,只考虑碳源和 DO 限制两种情况。

②在双基质限制下,低负荷的完全混合曝气池不利于污泥沉淀性能的改善,但中、高负荷下的污泥膨胀则在完全混合曝气池中有所缓解。对于中、高负荷系统,由于首端缺氧对污泥沉降不利,所以在推流式曝气池需采取措施避免供氧不足;反之,推流式曝气池有利于克服低负荷的污泥膨胀,即高负荷与低负荷是两种类型完全相反的污泥膨胀现象。

③对活性污泥膨胀,既要从宏观角度考虑,也要从微观角度去考虑。就活性污泥工艺的运转条件而言,负荷、基质浓度和 DO 浓度的水平是宏观条件,但曝气池首端的实际负荷、基质浓度和 DO 浓度是更为重要的因素,后者是决定污泥膨胀的微环境,种群的动态是由其微环境中的营养物条件所决定的。

④传统的选择器仅仅考虑低基质浓度型污泥膨胀。选择器是在完全混合或推流曝气池前加一个停留时间非常短(15 min)的小池,在选择器内利用两类细菌不同的生长速率选择性地培养和发展菌胶团细菌,使其成为曝气池中的优势菌。在以上的理论分析和研究的基础上,可以对选择器的概念进行扩展。广义的选择器可以包括低 DO 型污泥膨胀,可采用不同的选择器的形式如再生池和强化曝气池等方法,恢复菌胶团细菌的降解能力、提高供氧能力和降低负荷以控制高负荷型的污泥膨胀。

参考文献:

- [1] 王凯军.活性污泥膨胀机理与控制 [M]. 中国环境出版社, 1993.
- [2] 王凯军.丝状菌型污泥膨胀的统一理论 [J]. 环境科学, 1992, 13(3): 76.
- [3] 王凯军.厌氧(水解)处理低浓度污水 [J]. 北京: 中国环境出版社, 1992.