

文章编号:1000-582X(2005)04-0086-05

缺氧生物滤池处理城市污水模型与仿真*

方芳,郭劲松,刘苒,冯裕钊

(重庆大学城市建设与环境工程学院,重庆 400030)

摘要:为进一步了解缺氧生物滤池的工艺过程特性,基于影响缺氧生物滤池处理城市污水性能的分析,从生物滤池的流体力学、过滤特性及生物膜特性3方面考虑,建立了一个能反映生物滤池内微生物降解基质和生物滤池逐渐堵塞的数学动力学模型,并采用牛顿迭代法,通过MATLAB软件编程求解。实验室规模的上向流缺氧生物滤池试验结果与计算机仿真结果的对比表明:该模型能有效仿真上向流生物滤池在不同负荷和运行条件下的性能。

关键词:上向流缺氧生物滤池;生物膜模型;动力学模型;仿真

中图分类号:X703

文献标识码:A

应用缺氧生物滤池处理城市污水,具有流程简单,污泥产量少,运行能耗低且在较低温度下仍能维持较高的有机物去除率等特点,近年来受到了各国水处理专家的重视。但在处理污水的过程中,由于微生物生长和悬浮固体滞留容易引起滤池的堵塞,必须经常性地反冲洗,这种周期性的行为被认为是生物滤池的主要不足。因此,有必要建立一个既能反映生物滤池内微生物降解有机底物、又能描述生物滤池逐渐堵塞的动力学模型,以便对滤池进行动态数学分析,了解滤池的工艺过程特性,为滤池的运行性能优化、参数估计和过程控制仿真奠定理论基础。

1 缺氧生物滤池数学模型的建立

1.1 基本假设

1) 滤池是理想的推流式反应器,在流量相同时,整个生物滤池的流速是相同的。

2) 由于相对液相而言气相比较小,所以在模型中忽略气相部分。

3) 忽略滤池内的悬浮生物量,只考虑填料上的生物膜对有机物的降解作用。但要考虑滤池对进水中悬浮颗粒的物理截流作用。

4) 填料是直径为 d 的均质球形颗粒,生物膜均匀覆盖于填料表面,稳态下生物膜厚度不变。

5) 在整个生物膜膜厚范围内,生物膜密度、有机物在生物膜内的扩散系数是均匀的,微生物特性是一致的。

6) 假定温度和 pH 值不变。

1.2 基质去除过程动力学

基质在生物膜中的去除过程是基质首先从主体液体传递入生物膜,然后在生物膜内被微生物所降解。显然这里存在2个步骤:一是基质向生物膜内的传递,它主要取决于传质速率;二是生物膜内微生物降解已传入的基质,它主要取决于降解速率(反应速率)。

1.2.1 生物膜内基质去除动力学

Rittmann 和 McCarty^[1] 通过对生物膜内微元体积(图1)建立基质质量平衡方程,提出了稳态下的生物膜内基质去除模型。

设生物膜具有恒定的厚度 L_f 和恒定的生物物质浓度 X_f ,且当液相主体基质浓度为 S_b 时具有恒定的基质利用速率;以及在理想的生物膜内的任一点,基质浓度的一维扩散同细胞与基质之间的转化是同时发生的。根据生物膜内体积微元基质质量守恒,基质的变化率为:

$$\frac{\partial S_f}{\partial t} = D_c \cdot A_b \cdot \frac{dS_b}{dL} \Big|_L - D_c \cdot A_b \cdot \frac{dS_b}{dL} \Big|_{L+\Delta L} - A_b \cdot \Delta L \cdot r \quad (1)$$

* 收稿日期:2005-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50178069);国家十五科技攻关课题(2003BA80817-02)

作者简介:方芳(1973-),女,重庆市人,重庆大学讲师,博士,主要从事水污染控制的理论与技术研究。

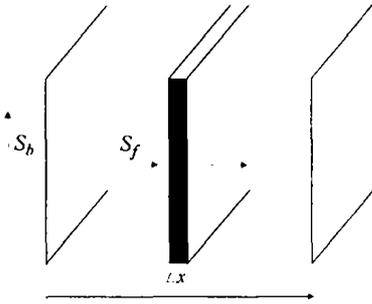


图 1 生物膜中微元的物料平衡示意

式(1)中, S_f 为生物膜中的基质浓度, (g 基质 COD/m³ 生物膜); D_e 为有效扩散系数, (m²/h); A_b 为垂直于扩散方向上的传质表面积, (m²); L 为从惰性固相填料到生物膜的距离, (m); r 为生物膜内的反应速率, (g 基质 COD/m³ 生物膜/h)。

一般认为 D_e 是一常数, 在相对稳定条件下, 生物膜中基质变化率为 0, 方程两边同除以 A_b 和 ΔL , 并取 ΔL 趋于 0, 有:

$$D_e \cdot \frac{\partial^2 S_f}{\partial L^2} = r \quad (2)$$

这一方程求解有 2 个边界条件, 一是在生物膜与填料间的界面上, 填料是惰性的和不可渗透的, 因而没有基质的传递, 其近似的边界条件是: $L = L_f$ 时, $\frac{dS_b}{dL} = 0$ 。

在液相与生物膜间的界面上 ($L = 0$), 由于不考虑滞液层内的通量, 因此界面处的基质浓度与主体液相中相等, 故边界条件是: $L = 0$ 时, $S_f = S_b$ 。

如果在生物膜中微生物的生长速率满足 Monod 动力学^[2], 根据产率系数 Y 的定义:

$$\frac{\Delta X}{\Delta S} = Y \quad (3)$$

式中: ΔX 为由于降解 ΔS 的基质量而产生的生物体增量。取 ΔS 趋于 0, 则有:

$$\frac{dX}{dS} = Y \quad (4)$$

由比生物增长率的定义: $\mu = \frac{(dx/dt)}{X}$ 和比基质降解率的

定义: $q = \frac{(dS/dt)}{X}$, 可得:

$$r = \frac{dS}{dt} = q \cdot X_f = \frac{\mu_{\max}}{Y} \cdot X_f \left[\frac{S_f}{S_f + K_s} \right] \quad (5)$$

式(2)则有:

$$D_e \cdot \frac{\partial^2 S_f}{\partial x^2} = \frac{\mu_{\max}}{Y} X_f \left[\frac{S_f}{S_f + K_s} \right] \quad (6)$$

其中: μ_{\max} 为最大比生长速率, (h⁻¹); Y 为产率系数, (g 微生物 COD/g 基质 COD); X_f 为生物体浓度, (g 微生物/m³

生物膜); K_s 为半速率常数(饱和常数), (g COD/m³ 生物膜)。

1.2.2 基质在主体液相中的去除动力学

基质在主体液体中的去除主要是由于对流扩散, 这种对流扩散是由反应器中水力流速和进生物膜的通量引起的。缺氧生物滤池的工作状态模型如图 2 所示, 假设滤池为理想的推流式反应器。按照反应器微元体积内基质物料质量守恒定律, 在图 2 中所示的滤池无穷小体积微元内 $dV = A \Delta h$, 由对流和进生物膜的通量而引起的沿反应器高度基质浓度随时间的变化为:

$$(A \Delta h) \frac{\partial(\varepsilon \cdot S_b)}{\partial t} = Q \cdot S_{b,y} - (A \cdot \Delta h) J - Q \cdot S_{b,y+\Delta y} \quad (7)$$

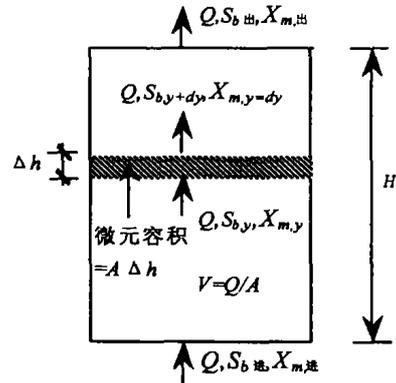


图 2 生物滤池工作模型示意

式(7)两边同除以 $A \cdot \Delta h$, 令 Δh 趋于 0, 整理得:

$$\frac{\partial(\varepsilon \cdot S_b)}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial S_b}{\partial h} - J \quad (8)$$

式(8)中: A 为生物滤池过水断面面积, (m²); Q 为进水流量, (m³/h); $S_{b,y}$ 为进水溶解性基质浓度, (gCOD/m³); $S_{b,y+\Delta y}$ 为出水溶解性基质浓度, (gCOD/m³); J 为生物膜通量, 即单位时间通过单位体积膜传递的基质质量。

在微元体积 dV 中的瞬时生物膜通量可以用 Fick 第一定律描述^[4]:

$$J = -D_e \cdot A_s \cdot \left[\frac{dS}{dx} \right]_{x=0} \quad (9)$$

式(9)中: D_e 为基质的有效扩散系数, (m²/h); A_s 为微元体积 dV 中的生物膜表面积, (m²), $A_s = dv \cdot \alpha$, α 为填料比表面积; dS/dx 为生物膜中基质浓度梯度; x 为生物膜厚度, (m)。

所以描述主体液体中由于反应器中水力流速和进生物膜通量引起的基质变化的方程为:

$$\frac{\partial(\varepsilon \cdot S_b)}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial S_b}{\partial h} + D_e \cdot A_s \cdot \left[\frac{dS}{dx} \right]_{x=0} \quad (10)$$

1.3 生物滤池的流体动力学

1.3.1 滤池过滤的作用

由于滤池本身具有很强的物理截留作用,对进水中的悬浮颗粒有很强的去除效果。但在以前的生物滤池模型中均假设反应器为稳态,且反应器中流速相同,没有考虑悬浮颗粒在生物滤池中的截留(悬浮颗粒 M 变成截留颗粒 Mr)。事实上,这种截留动力学可以表达为^[3]:

$$\frac{\partial X_{Mr}}{\partial t} = \frac{QkX_M}{A} \quad (11)$$

式(11)中 k 为过滤系数,它是依赖于填料粒径及停留时间而定的常数; X_M 为液相中悬浮颗粒浓度; X_{Mr} 为填料上截留颗粒浓度。

在如图 2 所示的微元体积($dV = Adh$)内,悬浮颗粒的浓度变化用数学方程表达为:

$$\begin{aligned} (A\Delta h) \frac{\partial(\varepsilon \cdot X_M)}{\partial t} &= Q \cdot X_{M,y} - \\ (A \cdot \Delta h) \frac{\partial X_{Mr}}{\partial t} &- Q \cdot X_{M,y+d_y} \end{aligned} \quad (12)$$

两边同除以 $A\Delta h$,令 Δh 趋于 0,并将式(11)代入式(12),整理得:

$$\frac{\partial(\varepsilon \cdot X_M)}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial X_M}{\partial h} - \frac{QkX_M}{A} \quad (13)$$

1.3.2 生物滤池的堵塞方程

笔者认为滤池逐渐阻塞的过程由 2 方面原因引

起:其一是微生物的增长和非活性生物的累积;其二是进水水质中的悬浮颗粒在填料表面形成截留颗粒。总生物量(X_B)的增长和悬浮颗粒的截留造成滤池内自由空间(free space)逐渐减少,滤池发生堵塞。因此,可以用空隙率的变化来反映滤池逐渐阻塞的过程,滤池中空隙率 ε 的变化为^[4]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\left(\frac{1}{X_B} \frac{\partial X_B}{\partial t} + \frac{1}{X_{Mr}} \frac{\partial X_{Mr}}{\partial t}\right) \quad (14)$$

总生物量 X_B 的增长可以表达为:

$$\frac{\partial X_B}{\partial t} = \mu_{\max} \left[\frac{S_f}{S_f + K_s} \right] X_B \quad (15)$$

式(15)中: μ_{\max} 为最大比生长速率, (h^{-1}); Y 为产率系数, (g 生物膜 COD/ g 基质 COD); K_s 为半速率常数(饱和和常数), (g COD/ m^3 生物膜)。

将式(11)和式(15)代入式(14),整理可得:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\mu_{\max} \left(\frac{S_f}{S_f + K_s} \right) - \frac{QkX_M}{X_{Mr}A} \quad (16)$$

上式的边界条件为: $\varepsilon(t=0) = \varepsilon_0$

1.4 生物滤池的数学模型

小结 1.2 ~ 1.3 节的分析,得到一组考虑了传质、降解、截留、水动力学在内的描述生物滤池特性的数学模型及边界条件如表 1:

表 1 生物滤池数学模型及边界条件

含 义	方 程	边界条件或初始条件
总的生物量产生	$\frac{\partial X_B}{\partial t} = \mu_{\max} \left[\frac{S_f}{S_f + K_s} \right] X_B$	$X_B(t=0) = X_{B0}$
截留颗粒的产生	$\frac{\partial X_{Mr}}{\partial t} = \frac{QkX_M}{A}$	$X_{Mr}(t=0) = 0$
主体液相中基质去除	$\frac{\partial(\varepsilon \cdot S_b)}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial S_b}{\partial h} + D_e \cdot A_s \cdot \left[\frac{dS}{dx} \right]_{x=0}$	$S_b(t=0) = S_b(h=0) = S_{b,进}$
生物膜中基质去除	$D_e \cdot \frac{\partial^2 S_f}{\partial x^2} = \frac{\mu_{\max}}{Y} X_f \left[\frac{S_f}{S_f + K_s} \right]$	$S_f(x=0) = S_b$
主体液相中悬浮颗粒去除	$\frac{\partial(\varepsilon X_M)}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial X_M}{\partial z} - \frac{QkX_M}{A}$	$X_b(t=0) = X_b(h=0) = X_{b,进}$
空隙率减少	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\mu_{\max} \left(\frac{S_f}{S_f + K_s} \right) - \frac{QkX_M}{X_{Mr}A}$	$\varepsilon(t=0) = \varepsilon_0$

2 模型的验证

2.1 模型参数的选取

模型中的参数可以分为 3 类:1) 模型的反应动力

学参数:最大比生长速率 μ_{\max} 和饱和常数 k_s ; 2) 生物膜的物理特性参数:有效扩散系数 D_e 、生物膜浓度 X_f 和生物膜厚度 x ; 3) 生物滤池的过滤特性参数:过滤系数 k 。所有的仿真都是基于如表 2 所示的参数。

表 2 参数的选取

参 数	参数值
温度 $T/^\circ\text{C}$	25
填料层高度 H/m	1.2
滤池横断面面积 A/m^2	0.03
填料比表面积 $\alpha/(\text{m}^2/\text{m}^3)$	700
滤池空床空隙率 ε_0	0.5
有效扩散系数 $D_e/(\text{m}^2/\text{h})$	0.000 048 ^[5]
生物膜厚度 x/m	0.000 18 ^[6]
最大比生长速率 μ_{\max}/h^{-1}	4 ^[5]
产率系数 $Y/(\text{g 生物膜 COD}/\text{g 基质 COD})$	0.67 ^[5]
生物体浓度 $X_f/(\text{g 微生物}/\text{m}^3 \text{ 生物膜})$	320 0 ^[7]
饱和常数 $K_f/(\text{g COD}/\text{m}^3 \text{ 生物膜})$	30 ^[7]
过滤系数 k/m^{-1}	0.6 ^[8]

2.2 模型验证的试验装置

试验主体装置为上向流变速缺氧生物滤池，系一变径有机玻璃柱，柱体上部内径为 210 mm，下部内径为 140 mm，总高为 1750 mm(含有 100 mm 的保护高度)，由布水区、反应区和出水区 3 部分组成，具体构造及设计参数见图 3。试验中 COD 在线仪选用美国哈希公司的 OptiQuant 紫外有机物分析仪。

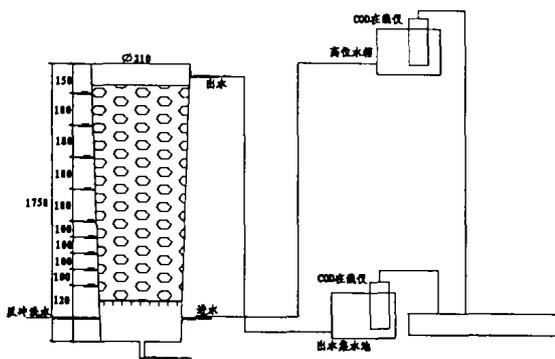


图 3 变速生物滤池构造图

2.3 试验与计算机仿真结果

将模型的 6 个方程及边界条件用 MATLAB 编程输入计算机，仿真滤池在不同负荷条件下的工况。这些偏微分方程是非均相和非线性的，其解析解是未知的，利用数值积分中的有限差分的方法来计算在整个运行时间中基质浓度和悬浮颗粒浓度沿滤池高度的变化。

由图 4 至图 9 可见，仿真的最终出水 COD 和 SS 数据与试验数据吻合较好，而且两者沿填料层高度上的变化也相当一致。表明模型能有效仿真上向流缺氧生

物滤池在不同负荷和运行条件下的性能。

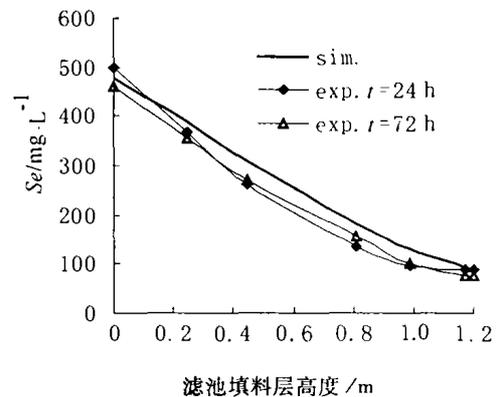


图 4 S_e 沿滤池高度的仿真比较 ($Q = 2.551/\text{h}$)

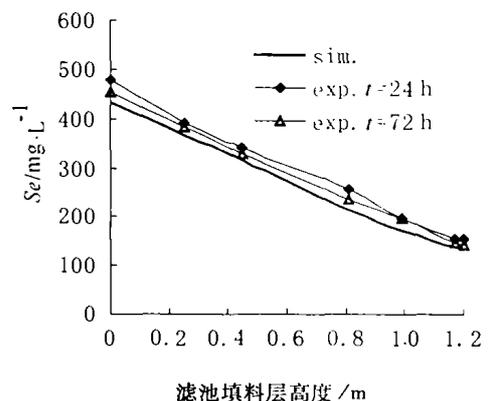


图 5 S_e 沿滤池高度的仿真比较 ($Q = 6.381/\text{h}$)

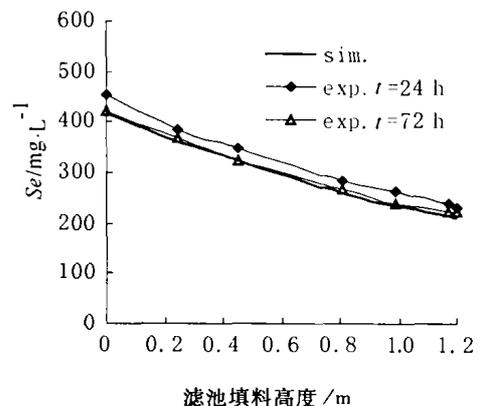


图 6 S_e 沿滤池高度的仿真比较 ($Q = 12.751/\text{h}$)

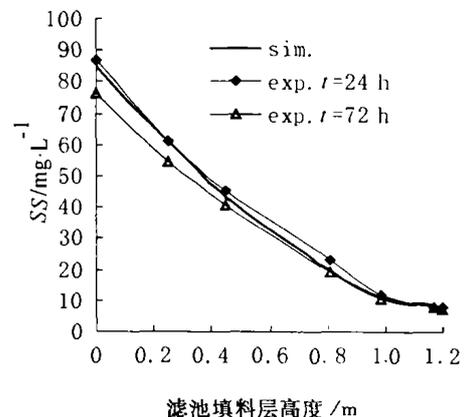


图 7 SS 沿滤池高度的仿真比较 ($Q = 2.551/\text{h}$)

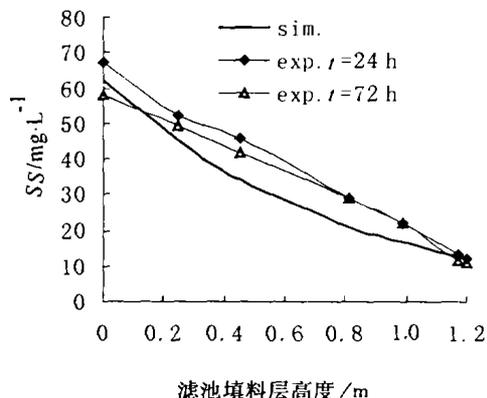


图8 SS沿滤池高度的仿真比较($Q = 6.381/h$)

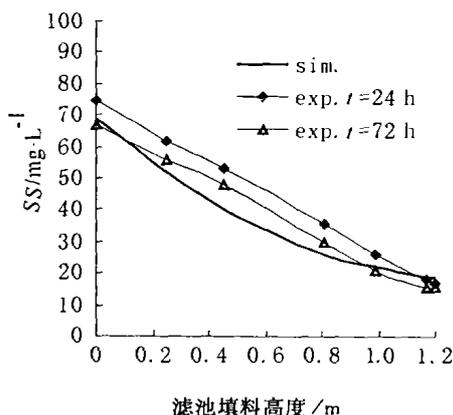


图9 SS沿滤池高度的仿真比较($Q = 12.751/h$)

说明:sim表示仿真曲线;exp. $t = 24$ h表示滤池反冲洗后运行24 h的试验曲线,exp. $t = 72$ h表示滤池反冲洗后运行72 h的试验曲线。

3 结论

基于影响上向流缺氧生物滤池处理城市污水性能的分析,分别从生物滤池的流体力学、过滤特性及生物

膜特性3方面考虑,建立了一个既能反映生物滤池内微生物降解基质,又能描述生物滤池逐渐堵塞的数学动力学模型。该模型共有6个非线性方程,包含了进水流量、有机物及悬浮固体浓度、填料粒径、表面面积、空隙率等影响因素。模型的求解采用数值积分中的有限差分方法,通过MATLAB编程,得出了基质浓度和悬浮颗粒浓度沿滤池高度的变化。将模型应用于实验室上向流缺氧生物滤池,试验结果与计算机仿真结果的对比表明:该模型能有效仿真上向流缺氧生物滤池在不同负荷和运行条件下的性能。

参考文献:

- [1] RITMANN B E, MCCARTY P L. Model of Steady State Biofilm Kinetics[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1980, 22(11): 2 343 - 2 357.
- [2] [美]拉里·D·贝尼菲尔德. 废水生物处理过程设计[M]. 北京:中国工业出版社, 1983.
- [3] JACOB J. Dynamic Simulation of Biofilters[J]. Simulation Practics and Theory. 1996,4(5):335 - 348.
- [4] BOLTE J P. Mathematical Simulation of Up-flow Anaerobic Fixed Bed Reactors[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1984, 27(5):1 483 - 1 490.
- [5] JACOB J. A Generalized Approach for Dynamic Modeling and Simulation of Biofilters: Application to Waste-water Denitrification[J]. Chemical Engineering Journal, 1997,65(1):133 - 143.
- [6] 张建丽. 反应器运行中厌氧生物膜性状的变化[J]. 重庆环境科学. 1997, 19(2): 55 - 57.
- [7] DAIGGER G T, LIM H C. 废水生物处理[M]. 张锡辉译. 北京:化学工业出版社, 2003.
- [8] TALLEC X L, VIDAL A, THORNBERG. Upflow Biological Filter: Modeling and Simulation of Filtration [J]. Wat SciTech. 1999, 39(4): 79 - 84.

Modelling and Simulation of Anoxic Biofilter for Municipal Wastewater Treatment

FANG Fang, GUO Jin-song, LIU Ran, FENG Yu-zhao

(College of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: For a further understanding of biofilter, a mathematical model is developed based on the analysis of the main effects on the up-flow anaerobic biofilter(UFAB), which can characterize not only the substrate removal dynamics but also the gradual biofilter clogging. The model considers three aspects: the biological reaction, deep filtration and hydrodynamics, and consists of flow rate of UFAB, the substrate and suspend solid concentration in the influent, and diameter, surface area, porosity of support medium. By applying the model to the experimental UFAB, and contrasting the simulated and experimental data, the authors prove the model can simulate availably the performance of the biofilter, which is operated on different loading and environment. The model can be used as an effective tool for the wastewater treatment plants operation management and the biofilter optimizing design accurately.

Key words: Up-flow anoxic biofilter; biofilm model; dynamic model; simulation