

细微泥沙在活性污泥系统中的迁移模型

徐璇^{1,2}, 周碧^{1,2}, 何莉^{1,2}, 周卫威^{1,2}

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学 低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045)

摘要: 在不同进水细微泥沙负荷条件下, 以质量守恒为基础, 建立了活性污泥系统中细微泥沙的迁移模型。研究表明, 影响期混合液中细微泥沙浓度与进水细微泥沙浓度、细微泥沙可悬浮比例、污泥龄、水力停留时间及影响时间有关, 恢复期混合液中细微泥沙浓度与恢复开始时混合液细微泥沙浓度、污泥龄、及恢复时间有关。通过模型计算影响期各系统中细微泥沙浓度平均相对误差为 11.7%~24.6%, 恢复期为 29.1%~46.0%; 污泥中挥发性悬浮固体含量平均相对误差为 0.9%~7.3%; 恢复期为 2.3%~34.4%。混合液中细微泥沙最大浓度、细微泥沙淤积速率与进水细微泥沙负荷呈正比关系。

关键词: 城市污水处理厂; 活性污泥; 细微泥沙; 迁移模型
中图分类号: X703 **文献标志码:** A

Modelling the Migration of Influent Fine Sediment Through Activated Sludge System

XU Xuan^{1,2}, ZHOU Bi^{1,2}, HE Li^{1,2}, ZHOU Weiwei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region' Eco-Environment of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: A simple model based on mass balance was constructed for the prediction of fine sediment migration in activated sludge reactor under different influent fine sediment load. The results shown that, during the influence period, the predicted fine sediment concentration was mainly effected by concentration of influent fine sediment, proportions of suspended fine sediment, sludge age, hydraulic retention time and impact time. During the recovery period, however, it was mainly effected by initial fine sediment concentration, sludge age, and recovery time. The relative errors of the predicted fine sediment concentration during the influence and recovery period were between 11.7% and 24.6%, 29.1%

and 46.0%, respectively. The relative errors of volatile suspended solids ratio in sludge during the influence and recovery period were between 0.9% and 7.3%, 2.3% and 34.4%, respectively. The maximum fine sediment concentration in mixed liquor and deposition rate of fine sediment are proportional to influent fine sediment load.

Key words: wastewater treatment plants; activated sludge; fine sediment; migration model

活性污泥主要包括挥发性悬浮固体 (mixed liquor volatile suspended solid, MLVSS) 和无机悬浮固体 (mixed liquor inorganic suspended solid, MLISS)。研究者大多关注污泥中挥发性悬浮固体, 并建立了预测活性污泥系统中挥发性固体浓度 X_v 的相关模型, 如稳态模型^[1]、适用于完全好氧或缺氧好氧系统的 ASM1 (活性污泥模型 1)^[2] 以及适用于脱氮除磷系统的 ASM2d (活性污泥模型 2d)^[3]。ASM2d 模型则首次引入总悬浮固体 (mixed liquor suspended solid, MLSS) 的概念, MLSS 包括了污水处理厂进水中的无机颗粒固体和化学除磷过程产生的固体物质, MLISS 也是活性污泥的组成部分, 当进水无机悬浮固体 (inorganic suspended solid, ISS) 较大时, 会直接影响污泥浓度 X 以及污泥中挥发性悬浮固体含量 f ^[4-5]。吉芳英等^[6-7] 研究发现, 污水处理厂取消或超越初沉池后^[8-10], 沉砂池不能有效去除的粒径小于 200 μm 的细微泥沙 (fine sediment, FS), FS 进入生物处理系统会降低 f 值 ($f = X_v/X$), 影响污水厂的正常运行。所以, 准确预测活性污泥系统中无机悬浮固体浓度 X_i 显得尤为重要^[5, 11]。

Ekama 等^[12-13] 通过对 30 座脱碳脱氮系统以及 18 座除磷脱氮系统的监测数据的分析研究, 首次建立了活性污泥系统中无机悬浮物预测模型, 考虑了

收稿日期: 2014-05-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大科技专项 (2013ZX07314-001-002); 高等学校学科创新引智计划 (B13041); 重庆市院士基金 (cstc2011ggys20001)

第一作者: 徐璇 (1982—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制理论及技术, E-mail: xuxuan@cqu.edu.cn

通讯作者: 何莉 (1987—), 女, 工学博士, 主要研究主要研究方向为水污染控制理论及技术, E-mail: hl@cqu.edu.cn

进水中无机悬浮物浓度 ρ_{ISS} 、污泥龄 t_s 、水力停留时间 t_h 、聚磷菌对污泥中无机悬浮固体浓度 X_I 的影响,但该模型没有考虑微生物内源呼吸产物和进水惰性有机物对 MLSS 的贡献^[4, 14],且建立模型数据中进水无机悬浮物浓度较低,进水中无机悬浮物浓度与有机物浓度比值 $\rho_{\text{ISS}}/\rho_{\text{COD}}$ 仅为 0.041~0.050 $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$,未考虑无机悬浮物的沉淀.我国城市污水厂进水 $\rho_{\text{ISS}}/\rho_{\text{COD}}$ 普遍远高于此比值,细微泥沙不仅导致 f 值降低,较大粒径泥沙在反应器中还存在淤积现象^[6, 15-16],Ekama^[12-13]所建模型不能有效预测我国污水厂无机悬浮物浓度.本文针对细微泥沙对活性污泥 X_I 的影响以及其在生化系统中的淤积,在较高 $\rho_{\text{ISS}}/\rho_{\text{COD}}$ 条件下,初步研究了细微泥沙在生化系统中的迁移情况,建立了细微泥沙迁移模型,为城市污水处理厂的设计、运行和管理提供理论基础.

1 试验材料与方法

1.1 细微泥沙特性

课题组前期研究得出,山地城市排水管网中细微泥沙粒径 D_v 为 $(43.74 \pm 14.12) \mu\text{m}$ (体积平均粒径,下同)^[7],且小于 $73 \mu\text{m}$ 的石英砂可以部分悬浮于混合液中,在污水处理系统中是基本稳定的,可以忽略它的转化^[6].所以选择和污水厂生物单元进水中细微泥沙粒径分布相近的石英砂模拟进水细微泥沙:体积平均粒径 $42.7 \mu\text{m}$,中位粒径 $35.28 \mu\text{m}$,跨度 2.35,粒径分布如图 1 所示.

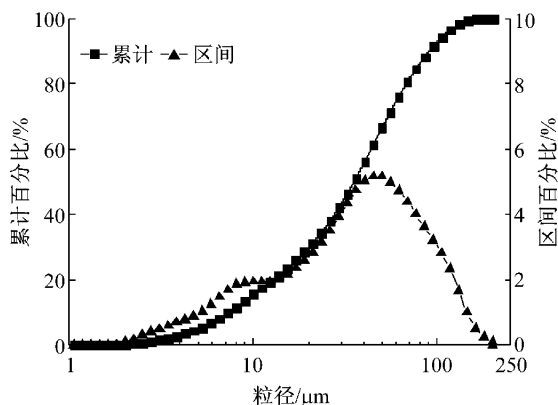


图1 进水中细微泥沙粒径分布特征

Fig.1 Particle size distribution of influent fine sediment

1.2 试验装置及运行方式

污水处理系统采用序批式活性污泥法(SBR)工艺,SBR反应器有效容积为 20L,共 6 个,编号分别为 1[#]~6[#].其中,2[#]~6[#]反应器进水分别添加不同

量的细微泥沙,1[#]反应器进水未添加细微泥沙,作为空白对照组.

系统采用间歇进水、间歇排水方式运行.反应器每个周期 8 h,其中进水 10 min,缺氧为 1.5 h,厌氧搅拌为 1.5 h,好氧曝气 4 h,沉淀出水 50 min.充水比为 0.4,溶解氧质量浓度控制在 $2 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,好氧末期排出混合液 900 mL,即系统污泥龄控制为 22 d 左右.系统稳定 2 个月后进行试验.

1.3 研究方法

反应器进水为校园生活污水,经过沉淀后取上清液,其中 ISS 基本可以忽略不计,本研究中 ISS 即指细微泥沙.通过投加葡萄糖、淀粉、乙酸钠、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾调节水质,COD(化学需氧量)、TN(总氮)、TP(总磷)和 SS(悬浮固体)质量浓度分别为 416 ± 126 、 73.9 ± 16.0 、 8.2 ± 1.1 、 $(42.9 \pm 24.2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.系统共运行 79 d,按进水条件变化,共分两个阶段:影响期 1~23 d 和恢复期 24~79 d.

影响期,在进水阶段向 2[#]~6[#]反应器中投加不同量的细微泥沙,以模拟 5 种不同细微泥沙负荷 ($\rho_{\text{ISS}}/\rho_{\text{COD}}$) 的试验污水,以研究不同进水细微泥沙负荷条件下细微泥沙在活性污泥系统中的迁移,具体细微泥沙负荷见表 1.恢复期,停止投加细微泥沙,观测活性污泥系统自然恢复情况.

表1 各个系统进水细微泥沙负荷

系统编号	1	2	3	4	5	6
质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	50	250	500	750	1 000
总量/ $(\text{g} \cdot \text{次}^{-1})$	0	0.4	2	4	6	8
$\rho_{\text{ISS}}/\rho_{\text{COD}}$	0	0.12	0.6	1.2	1.8	2.4

1.4 测试分析方法

测试指标为 X 、 X_I 、 D_v 等. X 、 X_v 采用重量法进行分析,其中 $X_I = X - X_v$, $f = X_v/X$; D_v 采用 BT-9300HT 激光粒度测试系统测定;运用 Matlab 进行数据分析.

2 结果与分析

2.1 进水 $\rho_{\text{ISS}}/\rho_{\text{COD}}$ 对活性污泥浓度的影响

不同 $\rho_{\text{ISS}}/\rho_{\text{COD}}$ 条件下,各个系统 X_I 和 X_v 见表 2,从表中看出,进水 $\rho_{\text{ISS}}/\rho_{\text{COD}}$ 越大,污泥 X_I 值越大,但污泥 X_v 值则相对稳定,基本不随 $\rho_{\text{ISS}}/\rho_{\text{COD}}$ 变化.污泥浓度变化情况如图 2 所示.在影响期 1~23 d,由于进水细微泥沙部分悬浮于混合液中,2[#]~6[#]系统污泥 X 呈增加趋势,剩余污泥量增加;在恢复期 24~79 d,混合液中细微泥沙通过剩余污泥排出系

统,污泥 X 呈下降趋势. X_v 的相对稳定与 X 的变化直接影响 f 值,2[#]~6[#] 系统污泥 f 值变化情况如图 3 所示, f 值呈现先降低后上升的趋势,1[#] 对照系统 f 值为 0.813 ± 0.018 ,2[#]~6[#] 系统污泥 f 值最小值分别为 0.740、0.603、0.441、0.372、0.254;进水细微泥

沙部分悬浮于混合液中,引起混合液 f 值降低,进水中 ρ_{ISS}/ρ_{COD} 越大,活性污泥系统 f 值降低速率越大.恢复期间,混合液中细微泥沙通过排泥而减少,2[#]~6[#] 系统 f 值不断升高;在 79 d 时, f 值分别升高到 0.817、0.797、0.734、0.654、0.656.

表 2 不同 ρ_{ISS}/ρ_{COD} 条件下污泥中无机悬浮固体浓度 X_I 和挥发性悬浮固体浓度 X_v

Tab.2 The concentration of MLSS X_I and MLVSS X_v at different ρ_{ISS}/ρ_{COD}

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

系统编号	ρ_{ISS}/ρ_{COD}	X_I			X_v		
		范围	平均值	标准差	范围	平均值	标准差
1	对照	350~675	487.5	88.4	1 823~2 680	2 136	247
2	0.12	327~798	650.7	103.6	1 455~2 862	2 303	281
3	0.6	452~1 537	928.6	336.1	1 724~2 981	2 297	253
4	1.2	581~2 156	1 187.5	440.4	1 349~2 680	2 150	490
5	1.8	589~2 885	1 755.5	808	1 373~3 077	2 227	451
6	2.4	497~4 092	2 023.4	1 173.2	1 279~2 856	1 909	436

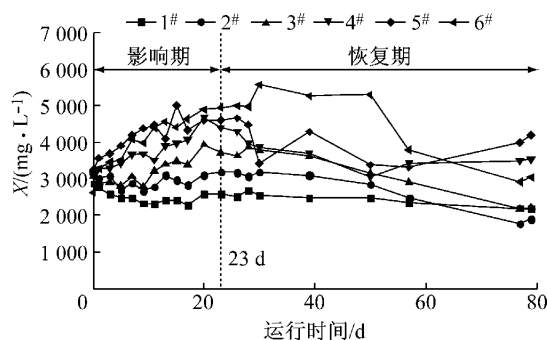


图 2 各个反应器中污泥浓度 X

Fig.2 The mixed liquid suspended solids X of each system

2.2 细微泥沙在活性污泥系统中的迁移模型

2.2.1 细微泥沙迁移模型建立

进入生化系统的细微泥沙质量 M 的去向包括:悬浮于活性污泥混合液中的质量 M_I 、淤积在反应器底部的质量 M_{II} 、随剩余污泥的质量 M_{III} 或出水排出系统的质量 M_{IV} . 基于质量守恒原则,它们之间存在如下平衡:

$$M = M_I + M_{II} + M_{III} + M_{IV} \quad (1)$$

系统中出水中 ISS 浓度很低,忽略不计($M_{IV} \approx 0$). 反应器运行期间,每日排混合液体积 V_e 为 0.9 L,则影响期间(1~23 d)有

$$M_{I,i+1} = (M_{I,i} + m\theta)(1 - V_e/V), 1 \leq i \leq 23 \quad (2)$$

$$M_{III,i} = \sum_{n=1}^i V_e \frac{M_{I,n}}{V - V_e} \quad (3)$$

$$M_{II,i} = M_i - M_{I,i} - M_{III,i} \quad (4)$$

$$M_{I1} = m\theta(1 - V_e/V) \quad (5)$$

式(2)~(5)中: M_i 为截至第 i 天进入系统细微泥沙

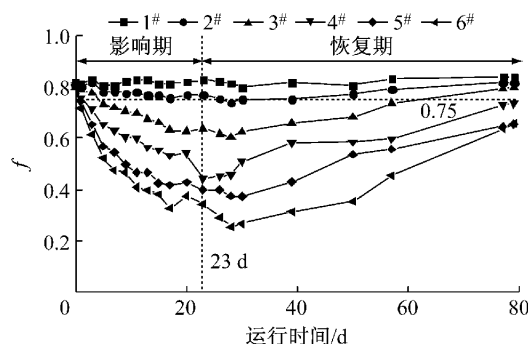


图 3 各个反应器中污泥 f 值变化情况

Fig.3 Change of f value in each system

累计总量(以 ISS 计), g ; $M_{I,i+1}$ 为第 $i+1$ 天悬浮于活性污泥混合液中细微泥沙总量(以 ISS 计), g ; $M_{I,i}$ 为第 i 天悬浮于活性污泥混合液中细微泥沙总量(以 ISS 计), g ; $M_{II,i}$ 为第 i 天淤积于活性污泥反应器底部中细微泥沙总量(以 ISS 计), g ; $M_{III,i}$ 为第 i 天通过排泥方式排出活性污泥系统的细微泥沙累计总量(以 ISS 计), g ; $M_{I,n}$ 为第 n 天悬浮于活性污泥混合液中细微泥沙总量(以 ISS 计), g ; θ 为进水 ISS 中可以悬浮部分所占比例,假设淤积 ISS 不再悬浮; V 为反应器有效容积,为 20 L; m 为每日进入系统的细微泥沙总量(以 ISS 计), g .

$$m = mn_0 = \rho_{ISS} Q_d \quad (6)$$

式中: n 为每日周期数, $n=24/t_c$, t_c 为每个周期运行时间,本试验为 8 h; m_0 为每次进水中细微泥沙(以 ISS 计)总量, g ; Q_d 为日处理污水量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.

通过式(2)可以推出,理论混合液中细微泥沙总量为

$M_{I,i} =$

$$m\theta(1 - \frac{V_e}{V}) \frac{1 - (1 - V_e/V)^i}{V_e/V}, 1 \leq i \leq 23 \quad (7)$$

因为本实验通过排混合液控制污泥龄,所以在本研究中污泥龄 t_s 为

$$t_s = V / V_e$$

令 $a = 1 - V_e / V = 1 - 1 / t_s$, 经过代换, 式(7)变为

$$M_{I,i} = m\theta \frac{1 - a^i}{1/a - 1}, 1 \leq i \leq 23 \quad (8)$$

在第 23 d 中午停止增加进水细微泥沙($\rho_{ISS} = 0$), 恢复期混合液细微泥沙总量为

$$M_{I,i} = M_{I,23} a^{i-23}, 24 \leq i \leq 79 \quad (9)$$

混合液中细微泥沙总量按式(10)计算:

$$M_{I,i} = (V - V_e)(X_{I,i} - \eta X_{v,i}) / 1\,000 \quad (10)$$

式中: $X_{I,i}$ 为第 i 天混合液中无机悬浮物 MLSS 质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $X_{v,i}$ 为第 i 天混合液中挥发性悬浮固体 MLVSS 质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; η 为系统中源生无机物和有机物比例, 本研究中 η 取对照系统的比例: $\eta = (1 - f) / f = 0.227$, 略高于 Wentzel 的取值^[4].

由式(8)一(9)可得出系统中细微泥沙浓度 $X_{TSS,i}$

$$X_{ISS,i} = \frac{M_{I,i}}{V - V_e} = \frac{m\theta(1 - a^i)}{V(1 - a)} = \frac{\rho_{ISS}\theta(1 - a^i)}{t_h(1 - a)}, \quad (11)$$

$$1 \leq i \leq 23$$

$$X_{ISS,i} = X_{ISS,23} a^{i-23}, 24 \leq i \leq 79 \quad (12)$$

由式(11)可知, 影响期, 生物反应器中 X_{ISS} 与进

水 ρ_{ISS} 、 θ 、 t_h 、 t_s 及影响时间有关. 在暴雨期间, 水量较大, t_h 较短, 细微泥沙浓度较高, 对 X_{ISS} 影响较大. 细微泥沙中可悬浮比例则和细微泥沙粒径分布和比重有关, 我国沉砂池去除粒径大于 $200 \mu\text{m}$ 、重度大于 2.65 的泥沙, 淤积于生物单元的泥沙为细微泥沙, 不同地区 θ 也不同. t_s 对悬浮液中细微泥沙浓度有重要影响, 污泥龄越长, 排泥量减小, 这将增加混合液中细微泥沙的累积程度.

由式(12)可知, 恢复期, 生物反应器中 X_{ISS} 与恢复开始时生物反应器中细微泥沙浓度(本次试验中为 $X_{ISS,23}$)、 t_s 和恢复时间有关. 恢复开始时生物反应器中细微泥沙总量越小, 恢复时间越短; t_s 越短, 系统排出悬浮态细微泥沙能力越强, 恢复时间越短.

2.2.2 参数 θ 确定

由式(8)一(9)可知, 在系统运行工况(污泥龄、处理水量等)、进水细微泥沙可悬浮比例及进水细微泥沙浓度稳定不变条件下, 2#~6# 系统 M_I 是运行时间对细微泥沙质量的函数, 式(8)中仅参数 θ 未知, 根据式(10)可以计算得出影响期间混合液中的 M_I 真实值. 在 Matlab 中利用 Lsqcurvefit 非曲线回归分析, 时间为自变量, M_I 为因变量, θ 为待定参数, 回归结果见表 3. 从表 3 可以看出, 非线性回归效果较好, 回归系数 R_{adj}^2 为 0.718 8~0.968 8; 在不同系统中, 悬浮部分占进水细微泥沙的质量比例大致相同, 统计均值为 $0.205\,6 \pm 0.031\,0$, 这是因为进水细微泥沙的粒径分布和比重是相同的, 具有相同的迁移特性^[16].

表 3 Lsqcurvefit 法曲线回归结果

Tab.3 Results of curvilinear regression with method of Lsqcurvefit

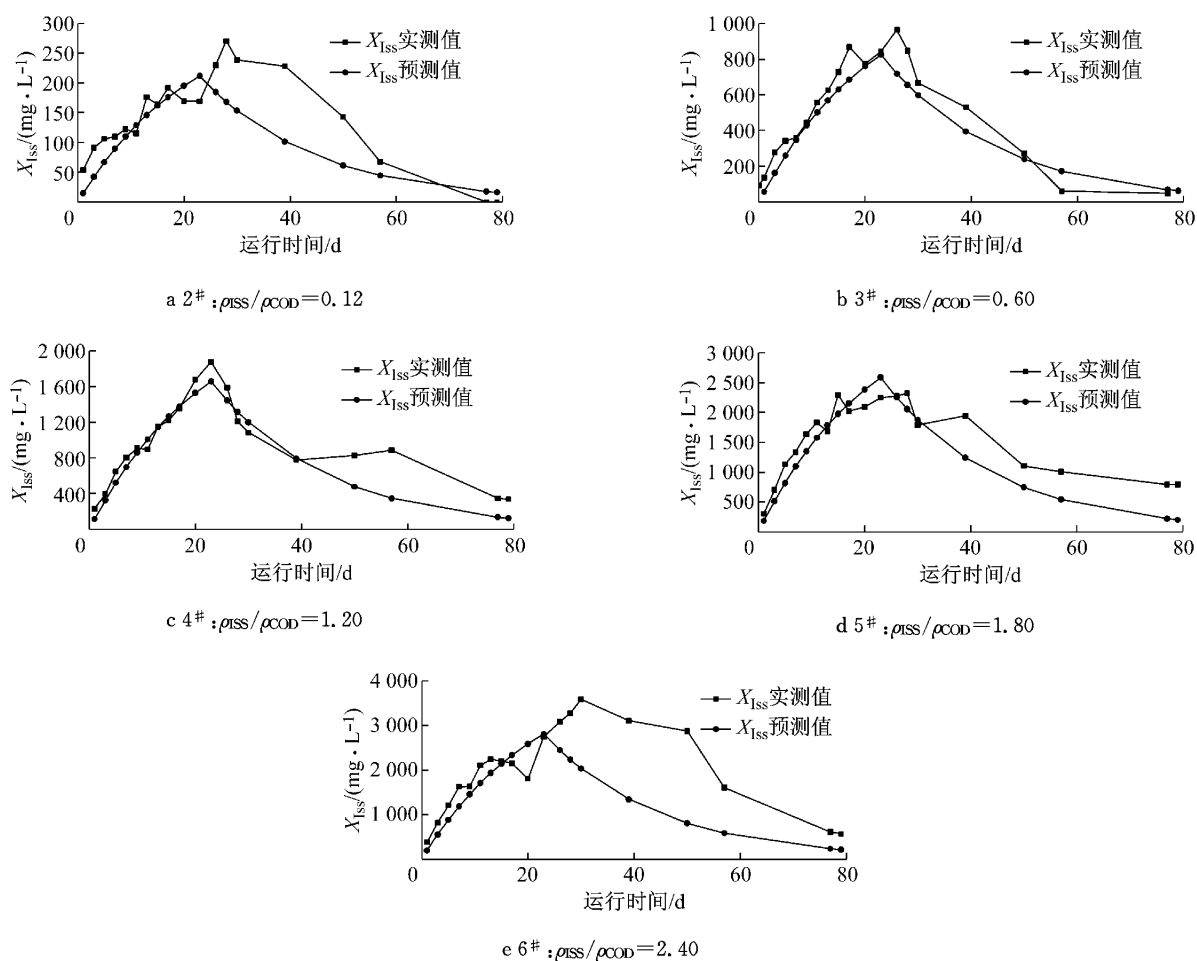
	系统编号				
	2	3	4	5	6
ρ_{ISS}/ρ_{COD}	0.12	0.6	1.2	1.8	2.4
θ	$0.254\,5 \pm 0.037\,0$	$0.198\,1 \pm 0.012\,3$	$0.199\,3 \pm 0.011\,4$	$0.207\,6 \pm 0.020\,7$	$0.168\,7 \pm 0.021\,6$
R_{adj}^2	0.718 8	0.968 8	0.971 7	0.890 4	0.820 8

2.2.3 模型检验

将表 3 中的 θ 代入式(11)一(12), 计算出影响期和恢复期 2#~6# 系统悬浮态细微泥沙浓度预测值(图 4), 由图可知, 平均相对误差为 20.2%~34.1%. 从图 4 中还可以看出, 模型对于影响期细微泥沙浓度预测较准, 平均相对误差为 11.7%~24.6%; 模型对于恢复期细微泥沙浓度预测值小于实际观测值, 平均相对误差为 29.1%~46.0%. 当大量泥沙进入系统后, 部分可悬浮部分被携带沉淀于池底或反应器中部出水泵上方, 在后续进水过程扰

动作用下重新悬浮, 这就会导致悬浮量增加具有一定的迟缓性, 从而导致系统恢复期间混合液中细微泥沙浓度上升.

由式(8)一(9)计算出系统中细微泥沙含量预测值 $M_{I,i}$, 再通过式(10)计算出系统中无机悬浮物浓度预测值 $X_{I,i}$, 进而结合实测污泥中挥发性组分浓度 $X_{v,i}$ 得出系统 f 值预测值(图 5). 从图 5 中看出, 模型预测精度较高, 总体平均相对误差范围为 1.5%~18.2%; 模型对影响期间 1~23 d 的预测结果好于恢复期间 24~79 d, 平均相对误差分别为 0.9%~

图 4 各个系统混合液中细微泥沙浓度 X_{ISS} 实测值与预测值Fig. 4 The tested and predicted concentration of fine sediment X_{ISS} in mixed liquor

7.3%和2.3%~34.4%;系统恢复期间,部分淤积于反应器底部及出水泵上的细微泥沙可能再次在进水等水力扰动条件下进入混合液中,从而导致实测混合液中MLISS浓度偏大,这在进水细微泥沙浓度较大的系统中表现得尤为明显。

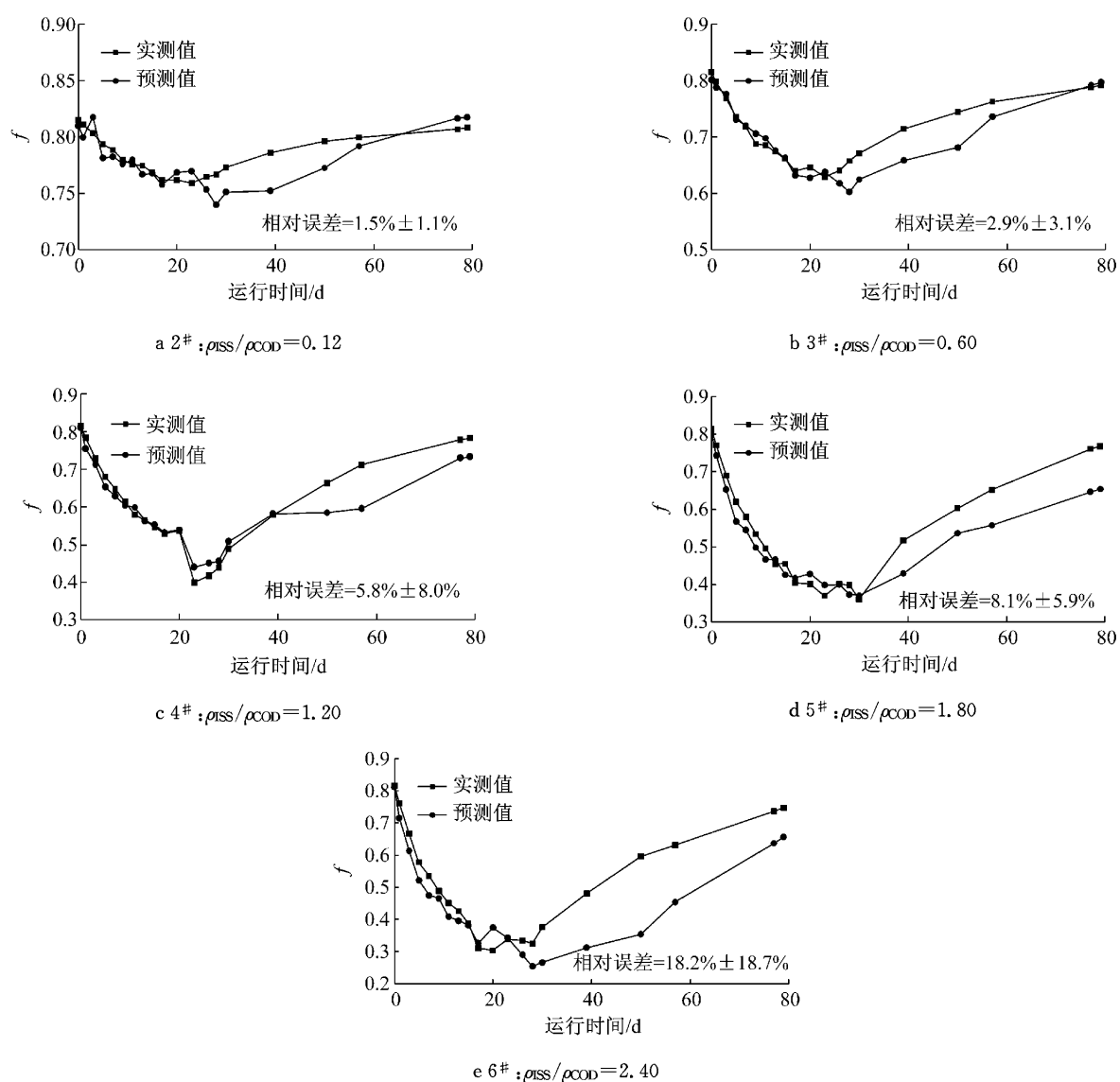
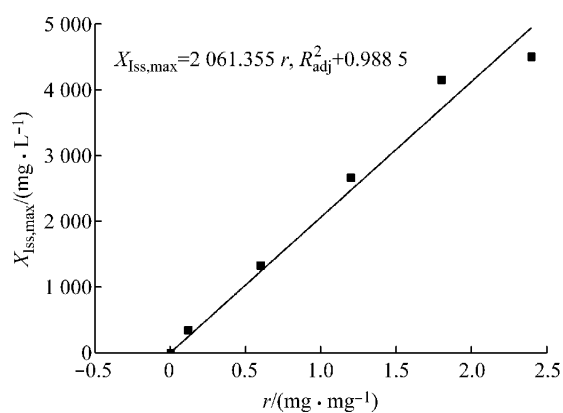
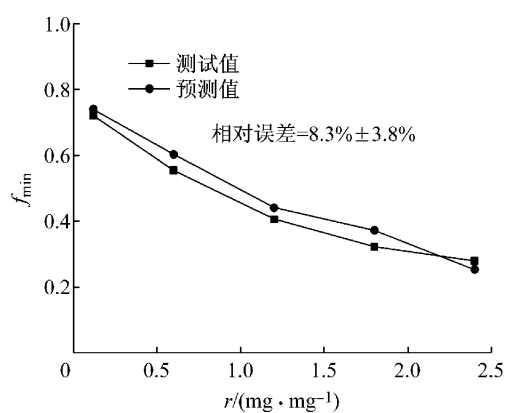
当 $i \rightarrow \infty$, 由式(8)计算得出, 2#~6# 系统混合液中细微泥沙总量 M_I 值平衡时将分别趋近于6.48、25.22、50.75、79.30和85.92 g, 由式(10), 得出2#~6# 系统混合液细微泥沙浓度平衡时混合液中最大细微泥沙浓度预测值, $X_{ISS,max}$ 分别为339、1321、2657、4152、和4499 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $X_{ISS,max}$ 与 ρ_{ISS}/ρ_{COD} 呈较好的正比例关系, 如图6所示。图中, $X_{ISS,max} = 2061.355r$, $R_{adj}^2 = 0.9885$, 其中 r 代表 ρ_{ISS}/ρ_{COD} 。同理, 通过模型得出2#~6# 系统 f 值最小值 f_{min} 分别为0.740、0.603、0.441、0.372和0.254, 与试验过程中实测最小值相近, 相对误差仅为8.3%±3.8%(图7)。

系统运行结束后, 2#~6# 系统泥沙淤积量(M_{II})预测值分别为20.58、110.66、220.99、328.05和

458.88 g, 实测泥沙淤积量为14.3、123.8、182.6、317.2和339.5 g, 预测量和实测总体上非常接近, 平均相对误差为22.8%±16.8%(图8)。6# 系统($\rho_{ISS}/\rho_{COD} = 2.4$)淤积泥沙实测值与预测值相差较大, 因为6# 系统恢复期间混合液中细微泥沙浓度较预测值高, 通过剩余污泥排出系统的细微泥沙增多, 从而导致实测淤积量小于预测淤积量; 其他系统相差则较小。

3 结论

(1) 建立了生物反应器中细微泥沙迁移模型, 影响期生物反应器中悬浮态细微泥沙浓度仅与进水细微泥沙浓度、细微泥沙可悬浮比例、水力停留时间、污泥龄及影响时间有关; 恢复期生物反应器中悬浮态细微泥沙浓度与恢复开始时生物反应器中细微泥沙浓度、污泥龄和恢复时间有关。试验用细微泥沙可悬浮部分比例 θ 为 0.2056 ± 0.0310 , 在反应器中容易淤积。预测平衡状态下, 混合液中细微泥沙最大

图5 各个系统 f 值测试值与预测值Fig.5 The tested and predicted f value of each system图6 混合液中细微泥沙量浓度最大值 $X_{ISS,max}$ 与 ρ_{ISS}/ρ_{COD} 拟合关系Fig.6 The fitting relationship between ρ_{ISS}/ρ_{COD} and the maximum concentration of fine sediment $X_{ISS,max}$ in mixed liquor图7 f_{min} 测试值与预测值的比较Fig.7 Comparison of the tested and predicted f_{min}

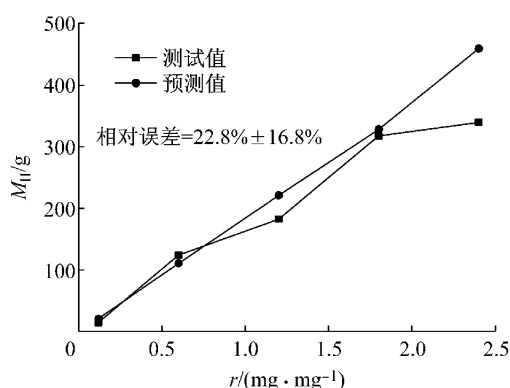


图8 不同 ρ_{ISS}/ρ_{COD} 条件下各系统实测和预测淤积量 M_{II}
Fig.8 The tested and predicted value of deposited part of fine sediment M_{II} in systems with different ρ_{ISS}/ρ_{COD}

浓度预测值和 ρ_{ISS}/ρ_{COD} 呈较好的线性关系 ($X_{ISS,max} = 2061.355r, R^2_{adj} = 0.9885$). 影响期间, 模型对系统 f 值预测较好, 平均相对误差为 $0.9\% \sim 7.3\%$; 恢复期间, 因淤积泥沙在水力扰动下进入混合液, 导致模型预测值偏大, 平均相对误差为 $2.3\% \sim 34.4\%$.

(2) 细微泥沙在系统中累积现象显著; 进水 ρ_{ISS}/ρ_{COD} 越大, 混合液 f 值下降越快, f_{min} 越小, 细微泥沙淤积速率越大, 反应器底部淤积量越大. f_{min} 测试值与预测值相近 (相对误差 $= 8.3\% \pm 3.8\%$), 淤积量实测值与预测值相近 (相对误差 $= 22.8\% \pm 16.8\%$), 淤积速率 w 与 ρ_{ISS}/ρ_{COD} 线性拟合效果较好 ($w = 8.260r - 0.2065, R^2_{adj} = 0.9982$), 模型预测精度较好. 淤积泥沙粒径大于进水细微泥沙粒径, 粒径均值为 $(85.24 \pm 5.87) \mu m$, 粒径越大的颗粒越容易淤积.

参考文献:

- [1] Ekama G A, Siebritz I P. Considerations in the process design of nutrient removal activated sludge processes [J]. Water Science & Technology, 1983, 15(3-4): 283.
- [2] Henze M. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3[M]. London: IWA Publishing, 2000.
- [3] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated sludge model no. 2d, ASM2d[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(1): 165.
- [4] Wentzel M C, Ubisi M F, Lakay M T, et al. Incorporation of inorganic material in anoxic/aerobic-activated sludge system mixed liquor[J]. Water Research, 2002, 36(20): 5074.
- [5] 韦启信, 郑兴灿. 污水悬浮固体组分对活性污泥产率的影响及计算方法[J]. 中国给水排水, 2013, 29(18): 1.
- [6] WEI Qixin, ZHENG Xingcan. Calculation methods of activated sludge yield and impact of influent suspended solids in municipal wastewater treatment systems[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(18): 1.
- [7] 吉芳英, 何小玲, 何莉, 等. 细微泥沙对污水生化处理系统的影响及其归趋特性[J]. 环境工程学报, 2014, 8(3): 801.
- [8] JI Fangying, HE Xiaoling, HE Li, et al. Effect of fine sediment on wastewater treatment biochemical system and its fate characteristics [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(3): 801.
- [9] 吉芳英, 晏鹏. 山地城市排水管网特细颗粒物特性及变化规律[J]. 环境科学研究, 2012, 25(3): 322.
- [10] JI Fangying, YAN Peng. Characteristics and variation of superfine particles in a drainage pipe network of a mountainous city[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(3): 322.
- [11] 许劲, 孙俊贻, 方俊华, 等. 生物除磷脱氮系统工程设计中值得探讨的几个问题[J]. 给水排水, 2005, 31(5): 14.
- [12] XU Jin, SUN Junyi, FANG Junhua, et al. Discussion on problems in design of biological P and N removal system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2005, 31(5): 14.
- [13] 邵林广. 城市污水处理中初沉池的设置[J]. 给水排水, 2001, 27(9): 5.
- [14] SHAO Linguang. On the primary sedimentation tank in urban WWTP[J]. Water & Wastewater Engineering, 2001, 27(9): 5.
- [15] 袁泉. 城市污水厂初沉池的设置方式及运行效果[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(1): 126.
- [16] YUAN Quan. The first clarifier of circulate result and establish a way inquiry into in WWTP[J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(1): 126.
- [17] 吴帆, 程晓如. 城市污水处理厂污泥量计算方法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(2): 244.
- [18] WU Fan, CHENG Xiaoru. Calculation methods of sludge volume in municipal sewage treatment plant[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(2): 244.
- [19] Ekama G A, Wentzel M C. A predictive model for the reactor inorganic suspended solids concentration in activated sludge systems[J]. Water Research, 2004, 38(19): 4093.
- [20] Ekama G A, Wentzel M C. Modelling inorganic material in activated sludge systems[J]. Water Sa, 2004, 30(2): 153.
- [21] Gujer W. ASIM-Activated sludge simulation program [R]. Switzerland: EAWAG, 1993.
- [22] He L, Ji F Y, Zhou W W. Deposition pattern, effect on nitrogen removal and component analysis of deposited sludge in a carousel oxidation ditch[J]. Taylor & Francis, 2014, 52(31-33): 6079.
- [23] He L, Ji F Y, He X L, et al. Validation of accumulation models for inorganic suspended solids of different particle size in an activated sludge system[J]. Bioresource Technology, 2013, 149: 51.