

基于 TUD 模型模拟优化 MSBR 工艺反硝化脱氮除磷

汪林¹ 张代钧^{1,2,3*} 李振亮^{1,4}

(1. 重庆大学环境科学系, 重庆 400030;

2. 重庆大学杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400030;

3. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030;

4. 重庆教育学院, 重庆 400030)

摘要 基于 TUD 模型(delft university of technology model)对实验室 MSBR(modified sequencing batch reactor)工艺进行了模拟与优化,强化反硝化除磷,以提高系统脱氮除磷效率。结果表明,工艺运行参数为厌氧池 90 min、好氧池 90 min、SBR 池缺氧段 150 min、污泥回流比 1.0 和污泥龄 15 d 时,MSBR 工艺 COD、TN 以及磷酸盐去除效率达 95%、92% 和 83%; SBR 池缺氧段吸磷量达到 23.20 mg/L,占系统总吸磷量 43% 左右;好氧池和 SBR 池缺氧段平均吸磷速率分别为 0.35 ~ 0.42 和 0.12 ~ 0.17 mg PO_4^{3-} -P/(L·min)。TUD 模型能够较好模拟各水质组分在 MSBR 工艺空间和时间上的浓度分布,COD 和 NH_4^+ -N 的模拟误差低于 15%, PO_4^{3-} -P 模拟值高于实测值 5% 左右。

关键词 TUD 模型 反硝化除磷 改良型序批反应器 模拟 优化

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2011)12-2727-06

Simulation and optimization to the denitrifying phosphorus and nitrogen removal of MSBR based on TUD model

Wang Lin¹ Zhang Daijun^{1,2,3} Li Zhenliang^{1,4}

(1. Department of Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

3. Key Laboratory of Southwest-China Resource Exploitation & Environmental Disaster Control

Engineering, Ministry of Education, Chongqing 400030, China;

4. College of Chongqing Education, Chongqing 400030, China)

Abstract Based on TUD model (delft university of technology model), a bench-scale MSBR (modified sequencing batch reactor) was simulated and optimized to enhance denitrifying phosphorus removal for improving nitrogen and phosphorus removal efficiency. The resulted showed that when the hydraulic retention time of anaerobic tank, aerobic tank and anoxic phase of SBR, sludge return ratio and sludge retention time were 90 min, 90 min, 150 min, 1.0 and 15 d, respectively, COD, TN and phosphorus removal rates were about 95%, 92% and 83%. The phosphorus uptake capacity in anoxic phase of SBR was up to 23.20 mg/L, which was 43% of the total phosphorus uptake. The mean aerobic and anoxic phosphorus uptake rate was 0.35 ~ 0.42 and 0.12 ~ 0.17 mg PO_4^{3-} -P/(L·min), respectively. TUD model could model the timely concentration distribution in the MSBR well, wherever simulation error of COD and NH_4^+ -N was lower than 15%, the simulated values regarding PO_4^{3-} -P were 5% higher than the measured ones.

Key words TUD model; denitrifying phosphorus removal; MSBR; simulation; optimization

荷兰 Delft 技术大学的 Meijer^[1] 根据 ASM2D 和 Delft 生物除磷代谢模型在模拟除碳脱氮和除磷方面的优势,提出了新的耦合活性污泥模型,简称 TUD 联合模型。TUD 模型在碳、氮模拟方面优势并不明显,但其对除磷的模拟是基于最根本的生物代谢转化机制,因此其对除磷的模拟相比于 ASMs 更

基金项目:国家自然科学基金项目(50578166,50908241)

收稿日期:2010-06-20; 修订日期:2010-10-19

作者简介:汪林(1980~),男,博士研究生,从事水污染控制理论与技术的研究。E-mail:linwang6666@163.com

* 通讯联系人,E-mail:dzhang@cqu.edu.cn

为准确,尤其对反硝化除磷的模拟,同时 TUD 模型中需要校核的参数大大减少。Hauduc 等^[2]对 ASMs、TUD 模型等的组分表述、计量学系数符号等进行了统一。郝晓地等^[3,4]利用 TUD 联合模型及其默认值对北京某污水处理厂倒置 A/A/O 工艺进行了数学模拟,结果表明 TUD 联合模型可用于我国污水处理厂的运行实践。Satoshi 等^[5]通过对厌氧/好氧/缺氧 SBR 研究发现,随着 SRT 和好氧段碳源投加量增大,A/O/A 工艺缺氧段/好氧段吸磷速率比值增大,这表明了反硝化吸磷贡献率增大。而当好氧段投加外源 COD 量大于 40 mg/L 时,好氧吸磷受到抑制。Koichi 等^[6]对好氧段乙酸盐投加量对 A/O/A 工艺好氧吸磷抑制影响也进行了研究,结果表明,当投加 COD 约为 10 mg/L 时,好氧段吸磷速率与释磷速率相等,缺氧段发生了缺氧吸磷。当投加量大于 40 mg/L 时,好氧吸磷完全被抑制,缺氧段吸磷作用得到强化。

MSBR^[7]是在空间和时间序列上实现了厌氧-好氧-SBR(缺氧/好氧)组合的连续流工艺。本文利用 Matlab 建立 MSBR 工艺数学模型,基于 TUD 联合模型对 MSBR 工艺进行模拟,并优化工艺运行参数(厌氧池 HRT、好氧池 HRT、SBR 池缺氧段、污泥回流比和污泥龄),旨在提高 MSBR 工艺脱厌氧段 VFA 吸收能力,强化缺氧段同步脱氮除磷,实现反硝化聚磷菌富集,提高系统的脱氮除磷效率,解决后置反硝化碳源不足问题造成脱氮效率不高的问题。TUD 模型中部分重要参数采用间歇实验校核值^[8],其他动力学和化学计量学参数均采用 Meijer^[1]和 Hauduc 等^[2]推荐值。

1 实验材料与方法

1.1 实验设备及实验用水

MSBR 工艺采用有机玻璃制成,由缺氧池(1个)、厌氧池(1个)、主曝气池(1个)、SBR 池(2个)组成,工艺流程图如图 1 所示,2 个 SBR 池交替充当反应单元和沉淀单元,即 SBR1 进水时,SBR2 污泥回流。系统接种活性污泥取自大渡口茄子溪污水处理厂 SBR,利用人工合成污水进行长时间驯化。为了避免回流污泥携带 DO 进入厌氧池,在厌氧池前设置了体积较小的缺氧池,不是主反应单元,因此在工艺模型中并没有单独考虑,只是将其体积合并至厌氧池。

人工合成废水成分:乙酸 400 mg COD/L;

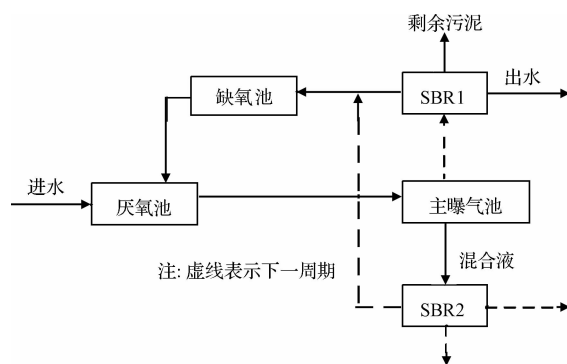


图 1 MSBR 工艺流程图

Fig. 1 Schematic flowchart of MSBR process

KH_2PO_4 6 mg PO_4^{3-} -P/L; NH_4Cl 50 mg NH_4^+ -N/L; NaHCO_3 300 mg/L。微量元素 2 mL/L。

微量元素组成: 61.30 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 17.20 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 75.00 g/L $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 0.50 g/L $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 0.01 g/L $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 0.05 g/L H_3BO_3 ; 0.05 g/L ZnCl_2 ; 0.15 g/L CuCl_2 ; 0.50 g/L $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。

分析方法: COD, 重铬酸钾法; NO_3^- -N, 酚二磺酸分光光度法; NH_4^+ -N, 钠氏试剂分光光度法; TP、 PO_4^{3-} -P, 钼锑抗分光光度法; TN, 紫外分光光度法。

1.2 MSBR 工艺数学模型建立

MSBR 工艺中的厌氧池和好氧池属于连续流完全混合反应器,因此可以建立如下物料平衡(溶解性组分 S_i 和颗粒性组分 X_i 统一用 C 表示):

$$V_{\text{ana}} \cdot \frac{dC_{\text{ana}}}{dt} = Q_0 \cdot C_0 + R \cdot Q_0 \cdot C_r - (1 + R) \cdot Q_0 \cdot C_{\text{ana}} + V_{\text{ana}} \cdot r_{\text{ana}}$$

$$V_{\text{aer}} \cdot \frac{dC_{\text{aer}}}{dt} = (1 + R) \cdot Q_0 \cdot (C_{\text{ana}} - C_{\text{aer}}) + V_{\text{ana}} \cdot r_{\text{aer}}$$

序批式反应器在进水阶段没有出水($Q_{\text{out}} = 0$)。注意体积 V 必须包含在求导项中,因为它在进水段反应段不再是恒定的。为了满足大多数仿真软件的要求,必须将求导项展开如下:

$$V_{\text{SBR}} \cdot \frac{dC_{\text{SBR}}}{dt} + C_{\text{SBR}} \cdot \frac{dV_{\text{SBR}}}{dt} = Q_{\text{in}} \cdot C_{\text{in}} + r_{\text{SBR}} \cdot V_{\text{SBR}}$$

$$\Rightarrow \frac{dC_{\text{SBR}}}{dt} = Q_{\text{in}} \cdot (C_{\text{in}} - C_{\text{SBR}}) / V_{\text{SBR}} + r_{\text{SBR}}$$

$$\frac{dV_{\text{SBR}}}{dt} = Q_{\text{in}} \Rightarrow V_{\text{SBR}} = Q_{\text{in}} \cdot t_{\text{SBR}} + V_{\text{SBR0}}$$

式中: V_{SBR} 为 SBR 池体积; t_{SBR} 为 SBR 池进水阶段时间; Q_{in} 为 SBR 池进水流量; V_{SBR0} 为 SBR 初始体积; r_{SBR} 为 SBR 池反应速率。

为简化 SBR 系统沉淀过程,假设 SBR 进入沉淀期时,泥水迅速分离,排水在短时间内完成,所有颗粒性组分全部存在于活性污泥中,出水中不含有任何颗粒性组分。在 SBR 池反应结束后立即进行剩余污泥的排放。假设其排放剩余污泥浓度与反应结束时的池污泥浓度相等($X_w = X$)。MSBR 系统含有两个 SBR,属于多级反应器,因此 MSBR 系统的污泥龄 SRT 可以表示为:

$$SRT = T \cdot (V_{ana} \cdot X_{ana} + V_{aer} \cdot X_{aer} + V_{SBR} \cdot X_{SBR}) / (24 \cdot V_w \cdot X_w)$$

式中: T 为 SBR 运行周期(h); X_i 为每个反应单元污泥浓度。

2 结果与讨论

2.1 MSBR 工艺模拟及优化

2.1.1 模型验证

MSBR 工艺运行参数为厌氧池 2.0 h,好氧池 2.0 h,SBR 池缺氧段 2.5 h,好氧段 0.5 h,回流比 0.8,污泥龄 12 d,连续运行 6 个月。如图 2 所示,MSBR 系统的 COD、磷酸盐以及氨氮处理效果较好,处理效率达 96%、85% 和 95% 左右,TN 处理效率不高,仅为 70% 左右。出水 COD 浓度低于 30 mg/L,氨氮浓度低于 0.5 mg/L,磷酸盐浓度达 1.0 mg/L,TN 浓度偏高,约为 15~20 mg/L,主要为硝态氮,系统后置反硝化效率不高。

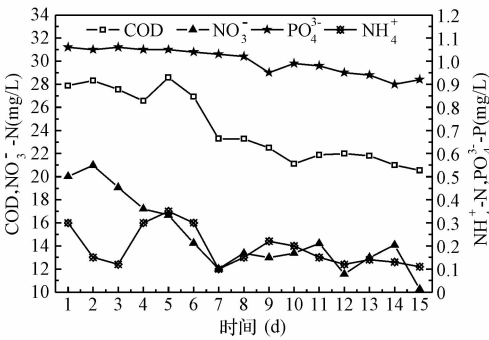


图 2 优化前 MSBR 工艺出水水质

Fig.2 Effluent quality of MSBR before optimization

反硝化脱氮除磷是解决后置反硝化碳源不足,系统脱氮效率不高的最好途径。通过强化 MSBR 工艺反硝化脱氮除磷提高系统脱氮效率。实现反硝化脱氮除磷要求缺氧段有足够的有机碳源(PHA)作为电子供体,同时含有 PO_4^{3-} 和 NO_3^- 或者 NO_2^- 。系统优化前反硝化效果不明显,主要原因在于好氧池时间

过长,导致 PHA 消耗较多,磷酸盐吸收较为彻底,后置缺氧段没有足够有机碳源 PHA 和磷酸盐进行反硝化脱氮除磷。因此有必要对系统运行参数进行优化,强化反硝化除磷脱氮,提高系统脱氮除磷效率。

利用上述建立的数学模型对 MSBR 工艺单周期运行效果进行了模拟计算。从模拟结果来看(见图 3),各阶段 COD、氨氮以及硝酸盐模拟精度较高,误差低于 10%,绝对误差仅为 1~10 mg/L。但磷酸盐预测值均高于实测值,模拟误差约为 15%。因此,利用 TUD 模型默认参数建立的工艺模型能够较为准确地对 MSBR 工艺基质浓度变化进行模拟,可以利用模型模拟技术对 MSBR 工艺运行参数进行优化。

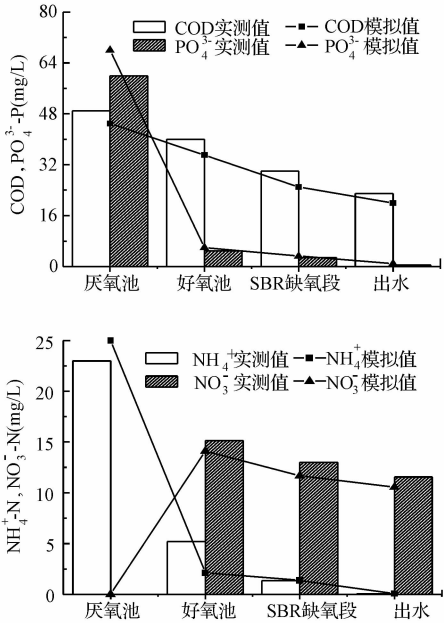


图 3 MSBR 工艺各阶段基质模拟值与实测值比较

Fig.3 Comparisons of measured and simulated values in each phase of MSBR

2.1.2 工艺优化

基于 2.1.1 中已验证的模型,通过多因素多水平正交模型实验确定 MSBR 工艺的最优运行工况,提高系统脱氮除磷效率,强化系统反硝化除磷效率。选取的因素及其水平包括厌氧池 HRT(60、70、80 和 90 min)、好氧池 HRT(90、120、150 和 180 min)、SBR 池缺氧段(90、120、150 和 180 min)、污泥回流比(0.4、0.6、0.8 和 1.0)以及污泥龄(5、10、12 和 15 d)。

(1) 厌氧池 COD

最优运行工况要求厌氧池 VFA 尽量吸收,磷酸盐充分释放。结果表明(如表 1 所示),各工艺参数分

别为 90 min、90 min、150 min、1.0 和 15 d 时,厌氧段出水 COD 最小,磷酸盐释放充分。污泥龄对厌氧池出水 COD 影响较为显著,污泥龄越大,厌氧段出水 COD 最低。其次是污泥回流比和好氧池水力停留时间。

表 1 模型正交实验厌氧池 COD 直观分析结果
Table 1 Results of model orthogonal tests with the target for COD of anaerobic tank (mg/L)

指标	反应时间			回流比	污泥龄
	厌氧池	好氧池	缺氧段		
K_{i1}	102.57	50.91	89.36	104.89	171.42
K_{i2}	83.79	66.46	74.78	89.42	83.17
K_{i3}	72.21	93.22	65.20	70.76	41.95
K_{i4}	63.54	111.51	92.77	57.03	25.56
极差	39.03	60.60	27.57	47.86	145.86

(2)出水 NO_3^- -N 及 PO_4^{3-} -P

由 2.1.1 可知,系统对 NH_4^+ -N 处理效果较好,出水中仅 NO_3^- -N 偏高,同时考虑除磷,因此选取出水 NO_3^- -N 及 PO_4^{3-} -P 作为评价指标。模型正交实验结果显示,污泥龄对系统出水磷酸盐影响最大,当 SRT 为 5 d 时,出水磷酸盐浓度达 1.60 mg/L。厌氧池、好氧池以及 SBR 池缺氧段反应时间、污泥回流比对其影响较小,各水平条件模型正交实验出水磷酸盐浓度均低于 1 mg/L(未列出)。如表 2 所示,当厌氧池、好氧池以及 SBR 池缺氧段反应时间、污泥回流比和污泥龄分别为 90 min、90 min、150 min、1.0 和 5 d 时,模拟出水 NO_3^- -N 浓度最低。考虑到当 SRT 为 5 d 时,磷酸盐浓度较高,需要将 SRT 增大降低出水磷酸盐浓度。而当将 SRT 增大至 15 d 时,出水硝酸盐浓度仅增大了 0.7 mg/L,不会影响出水 TN 浓度,因此综合考虑选取厌氧池、好氧池以及 SBR 池缺氧段反应时间、污泥回流比和污泥龄分别为 90 min、90 min、150 min、1.0 和 15 d 作为最优参数组合。

表 2 模型正交实验出水 NO_3^- -N 直观分析结果
Table 2 Results of model orthogonal tests with the target for NO_3^- -N of effluent (mg/L)

指标	反应时间			回流比	污泥龄
	厌氧池	好氧池	缺氧段		
K_{i1}	9.49	5.61	10.19	10.74	8.41
K_{i2}	9.40	8.40	9.37	8.76	8.73
K_{i3}	8.85	10.17	8.45	8.14	10.90
K_{i4}	7.41	10.97	7.14	7.51	9.11
极差	2.08	5.36	3.05	3.23	4.49

(3)SBR 池缺氧段吸磷量/总吸磷量比值

此比值能够表征系统缺氧反硝化脱氮除磷效

率。为使系统富集反硝化聚磷菌,实现后续缺氧段反硝化脱氮除磷,要求缺氧段磷吸收对系统除磷量贡献率达到最大,发挥系统最大的反硝化除磷潜力。模拟结果表明(如表 3 所示),好氧池 HRT 对其影响最大,厌氧池和 SBR 池缺氧段时间对其影响较小。其次是系统污泥龄,较长的污泥龄不利于系统除磷效率的提高。短污泥龄不能够维持良好的硝化效果。如果好氧池反应时间较短,好氧吸磷不充分,则会将系统除磷压力过多地转移至缺氧段,同时硝化效果受限,会造成系统除磷脱氮效率恶化,因此好氧池反应时间不宜过短。厌氧池、好氧池以及 SBR 池缺氧段反应时间、污泥回流比和污泥龄分别为 90 min、90 min、150 min、1.0 和 5 d 时,SBR 池缺氧段吸磷比例达最大,反硝化除磷效果最好。

表 3 模型正交实验 SBR 池缺氧段吸磷比例直观分析结果
Table 3 Results of model orthogonal tests with the target for the ratio of phosphorus uptake in anoxic phase of SBR (%)

指 标	反应时间			回流比	污泥龄
	厌氧池	好氧池	缺氧段		
K_{i1}	8.12	24.09	8.47	11.99	5.70
K_{i2}	9.01	14.85	12.29	10.49	11.13
K_{i3}	15.95	6.99	14.44	13.49	11.48
K_{i4}	15.66	2.81	13.54	12.77	20.44
极差	7.83	21.28	5.97	3.00	14.74

从以上模拟可以看出,在本研究的实验范围内,通过模型模拟计算所得的 MSBR 工艺最佳运行工况为厌氧池 90 min,好氧池 90 min,SBR 池缺氧段 150 min,污泥回流比为 1.0,污泥龄为 15 d。

2.2 实验验证

根据模型正交实验得到的最优工况条件运行 MSBR 工艺,连续驯化培养活性污泥,系统稳定运行 3~4 个月,对进出水水质进行分析。如图 4 所示,工艺运行处理效率较为稳定,乙酸在厌氧阶段已全部吸收,出水 COD 浓度低于 30 mg/L,系统对 COD 处理效率大于 95%。出水 PO_4^{3-} -P 浓度约为 1.00 mg/L,除磷效率达 83%,其中好氧池吸磷量占系统总吸磷量 57%,SBR 池缺氧段吸磷量占 43%。好氧池和缺氧段平均吸磷速率为 0.35~0.42 和 0.12~0.17 mg PO_4^{3-} -P/(L·min),缺氧段反硝化吸磷速率为好氧吸磷速率 42%,据此估计反硝化聚磷菌占系统总聚磷菌的 42%。出水 NH_4^+ -N 浓度 0~

1.35 mg/L, 系统硝化效果良好。SBR 池二级好氧段对缺氧段残存的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进一步吸收和硝化, 使出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 偏高 (3.30 ~ 7.70 mg/L), 系统脱氮效率为 85% ~ 92%。与系统优化前比较, 除磷效率虽然有所下降, 但系统脱氮效率得到很大提高, 强化了系统后置反硝化脱氮除磷。

将 15 d 水质参数输入 TUD 联合模型, 对 MSBR 工艺厌氧段、好氧段、SBR 池缺氧段以及出水水质进行模拟。如图 4 所示, 总体来看, 模型对各基质浓度变化预测效果较好, 厌氧池出水 COD 模拟平均误差为 9%, 磷酸盐浓度模拟值略高于实测值, 误差约

为 5% ~ 9%。好氧池 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 模拟值相对于实测值偏低 5% ~ 14%, 可能原因是好氧段 COD 对好氧吸磷有抑制作用, 而 TUD 模型并没有考虑, 导致对好氧吸磷过高估计。好氧池 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度模拟误差低于 10%, 实测均值为 5.18 mg/L, 模型模拟均值为 5.21 mg/L。随着进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化, 好氧池 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度发生一定波动, 实测均值为 15.16 mg/L, 而模拟值均值为 15.17 mg/L。模型对 SBR 池缺氧段反硝化脱氮除磷和出水模拟效果较好, 缺氧段硝酸盐和磷酸盐模拟精度达 84% 和 90% 左右, 出水硝酸盐和磷酸盐模拟精度高达 93% 左右。

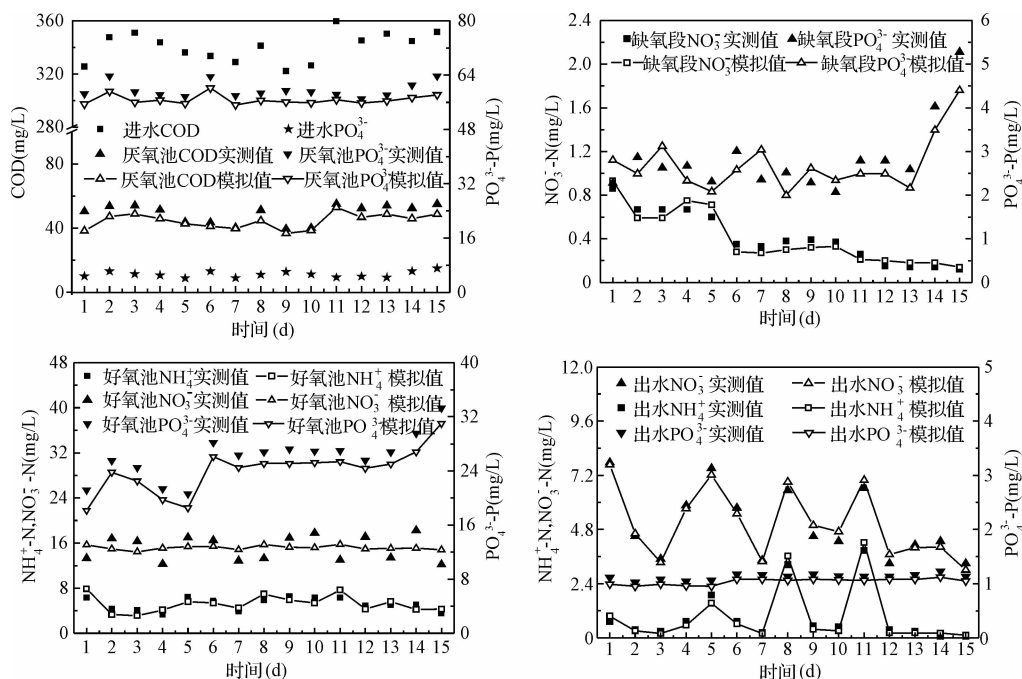


图 4 优化后各阶段各基质实测值与模拟值比较

Fig.4 Comparisons of measured and simulated values in each phase of the optimized MSBR

3 结 论

(1) 利用 TUD 联合模型对 MSBR 工艺进行了最优优化模拟, 确定了 MSBR 工艺最优运行条件: 厌氧池 90 min, 好氧池 90 min, SBR 池缺氧段 150 min, 污泥回流比为 1.0, 污泥龄为 15 d。

(2) 利用模型模拟获得的最优参数运行 MSBR 工艺, 连续驯化培养活性污泥, 系统处理效率较为稳定, 系统的 COD、TN 以及 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效率达 95%, 92% 和 83%; 出水 COD 浓度低于 30 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度约为 1.00 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度低于检测限, 出水硝酸盐浓度 3.30 ~ 7.70 mg/L。

(3) MSBR 工艺好氧池吸磷量占系统总吸磷量 57%, SBR 池缺氧段吸磷量占 43% 左右, 平均吸磷速率分别为 0.35 ~ 0.42 和 0.12 ~ 0.17 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/(\text{L} \cdot \text{min})$, 缺氧段反硝化吸磷速率为好氧吸磷速率 42%。这是由于前端好氧池对 PHA 有一定消耗, 影响了后续缺氧段反硝化吸磷。

(4) TUD 模型较为精确地模拟 MSBR 工艺各基质的浓度变化。COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 模拟精度较高, 误差控制在 15% 以内。好氧池 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 预测值略低于实测值 5% 左右。模型对 SBR 池缺氧段反硝化脱氮除磷和出水模拟效果较好, 缺氧段硝酸盐和磷酸盐模拟精度达 84% 和 90% 左右, 出水硝酸盐和磷酸盐

模拟精度达 93% 左右。

参 考 文 献

- [1] Meijer S. C. F. Theoretical and practical aspects of modeling activated sludge processes. Delft University of Technology, The Netherlands, **2004**
- [2] Hauduc H., Rieger L., Takacs I., *et al.* A systematic approach for model verification: Application on seven published activated sludge models. *Water Science and Technology*, **2010**, 61(4):825-839
- [3] 郝晓地, 宋虹苇, 胡沅胜, 等. 采用 TUD 联合模型模拟倒置 A²/O 工艺的运行工况. *中国给水排水*, **2007**, 23(5):1-4
Hao Xiaodi, Song Hongwei, Hu Yuansheng, *et al.* Modeling operation condition of reversed A²/O process with TUD model. *China Water & Wastewater*, **2007**, 23(5):1-4 (in Chinese)
- [4] 郝晓地, 宋虹苇, 胡沅胜, 等. 采用 TUD 模型动态模拟倒置 A²/O 工艺运行工况. *中国给水排水*, **2007**, 23(16):85-89
Hao Xiaodi, Song Hongwei, Hu Yuansheng, *et al.* Dynamic simulation of reversed A²/O process by TUD model. *China Water & Wastewater*, **2007**, 23(16):85-89 (in Chinese)
- [5] Satoshi T., Takashi O., Koichi S., *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate accumulating organisms in a sequencing batch reactor. *Biochemical Engineering Journal*, **2006**, 27(3):191-196
- [6] Koichi S., Shinya M., Satoshi O., *et al.* Modeling and experimental study on the anaerobic/aerobic/anoxic process for simultaneous nitrogen and phosphorus removal: The effect of acetate addition. *Process Biochemistry*, **2008**, 43(6):605-614
- [7] 严晨敏, 张代钧, 唐然, 等. 一种改进的 MSBR 工艺脱氮除磷性能的仿真模拟与实验研究. *环境科学学报*, **2005**, 25(3):391-395
Yan Chenmin, Zhang Daijun, Tang Ran, *et al.* Mathematical simulation and lab-scale experimentation to an upgrading MSBR process for nitrogen and phosphorus removals. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2005**, 25(3):391-395
- [8] Wang L., Zhang D. J., Lu P. L., *et al.* Calibration and verification of biological phosphorus metabolism ASM 2D for a bench-scale MSBR system. *Disaster Advances*, **2010**, 3(4):334-339