

# 制定 BNR 工艺最佳运行策略 : 模拟预测并试验验证

郝晓地, 胡沅胜, 王克巍

(北京建筑工程学院可持续环境生物技术研发中心, 北京 100044)

**摘要** :应用一生物营养物去除(BCFS)工艺(BCFS)模型模拟预测工艺参数对出水水质的影响,同时在实验室建立试验装置对模拟预测结果予以试验验证,得出了模拟预测与试验结果近似一致的结果.这表明,在很大程度上数学模拟技术可以替代中间或现场试验,从而被用来诊断运行问题、并制定工艺运行优化策略.模拟与试验显示,回流 A 与进水之比( $r_A$ )为 1.5 时,生物除磷效果不受厌氧池微生物量所限制,回流 A 的大小与 COD 与 N 去除率无关;当回流 B( $r_B$ )>2 后流量再行增大对提高 TN 去除效果作用有限,且对 COD 及 TP 去除没有影响;回流 C( $r_C$ )开启与增大对 COD、TP 及 TN 的去除几乎没有影响;好氧池 DO( $DO_{RS}$ )在 1~2.5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以内时对 COD、TP 的去除均无影响,但当  $DO < 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  则升至 1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 因此,最终确定 BCFS 工艺最佳运行参数为  $r_A = 2$ ,  $r_B$  为 2~2.5,  $r_C = 0$ ,  $DO_{RS}$  为 2~2.5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

**关键词** :BNR 工艺;工艺参数;模拟预测;试验验证;混合液回流比;溶解氧(DO)

中图分类号 :X11;X703.1 文献标识码 :A 文章编号 :0250-3301(2010)03-0684-07

## Making Optimal Operation for a BNR Process : Modeling Prediction and Experimental Verification

HAO Xiao-di, HU Yuan-sheng, WAN Ke-wei

(The R & D Center for Sustainable Environmental Biotechnology, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract** :Based on the process model of a BNR system (BCFS), the effects of operational parameters on the effluent quality were predicted by modeling, and were testified simultaneously by a lab-scale experiment, from which almost the same results in the modeling and the experiment were obtained. This means that modeling can be realizably applied to make the optimal operation schemes regardless of pilot-scale and/or full-scale experiments. Both the modeling and the experiment demonstrated that the bio-P removal performance was not influenced by the biomass amount in the anaerobic tank when the returned ratio ( $r_A$ ) reached 1.5 and that  $r_A$  had no significant correlation with COD and N removals. After the returned mixed liquor ratio ( $r_B$ ) increased over 2, the TN removal efficiency was not improved any more, and the COD and TP removals were not influenced by the variations of the  $r_B$ . The returned mixed liquor ratio  $r_C$  had almost no influences on the COD, TP and TN removals. Further, the COD and TP removals were not influenced when the dissolved oxygen ( $DO_{RS}$ ) in the aerobic tank was in the range of 1-2.5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , but the effluent  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  increased over 1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  when  $DO_{RS}$  was below 2  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . So, the optimal operational parameters for the BCFS should be set at  $r_A = 2$ ,  $r_B$  2-2.5,  $r_C = 0$ ,  $DO_{RS}$  2-2.5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

**Key words** :BNR process; process parameters; modeling prediction; experimental verification; return ratio of mixed liquor; dissolved oxygen (DO)

为了最大限度地从生物营养物去除(biological nutrient removal, BNR)工艺角度创造反硝化除磷细菌(denitrifying phosphorus-removing bacteria, DPB)富集和磷回收的条件,荷兰代尔夫特理工大学在UCT(University of Capetown)工艺基础上研发出了一种变型工艺 BCFS(biologisch chemische fosfaat stikstof verwijdering),并已在 10 座以上升级/新建污水处理厂中得到实际应用<sup>[1]</sup>. 与目前 BNR 系统运行控制方式复杂程度不断提高趋势(如多回路反馈控制、模糊控制、神经网络控制以及专家系统等<sup>[2-5]</sup>)相反,BCFS 工艺在运行控制上力求简单、实效,建立了以 ORP 定点值为基础的运行控制策略<sup>[6]</sup>. 尽管 ORP 定点值运行策略能够保证稳定、良好的出水水

质( $\text{NH}_4^+ - \text{N} < 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{TN} < 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{TP} < 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),但在实际运行中由于内回流量有时过大或好氧池溶解氧(DO)水平过高而导致较多能量消耗问题.

本研究根据 BCFS 工艺流程,分别建立该系统工艺数学模型和实验室试验装置.应用已验证并校正后的 TUD 数学模型<sup>[7-9]</sup>首先预测 BCFS 工艺内回

收稿日期 2009-05-07;修订日期 2009-07-24

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z320);北京市属高等学校人才强教深化计划——高层次人才项目(PHR20100508)

作者简介:郝晓地(1960~),男,博士,教授,主要研究方向为污水处理生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术. E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

流及好氧池 DO 对系统性能的影响。然后,通过实验室试验对模拟预测结果进行试验验证。研究目的在于保证 BCFS 工艺获得良好出水水质前提下,尽可能采用最佳的内回流量以及好氧池 DO 水平,以避免运行过程中不必要的能量消耗,最终实现通过数学模拟技术来制定并实施实际污水处理厂 BNR 工艺优化控制策略。

## 1 模拟与试验方法

### 1.1 BCFS 工艺流程与运行控制

BCFS 工艺流程如图 1 所示,包括 5 个反应器与 3 个内(混合液)回流(回流 A、B、C)。缺/好池(R4)为间歇曝气设计,视进水水质与好氧池(R5)DO 决定曝气与否。实际 BCFS 工艺好氧池 DO 一般控制在  $2.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。若好氧池  $\text{DO} < 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,则需开启 R4 曝气系统,将 DO 维持在  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右。

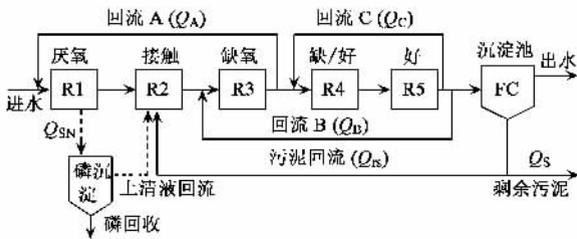


图 1 BCFS 工艺流程示意

Fig. 1 BCFS process

回流 A 目的是维持厌氧池污泥浓度处于最佳水平,以保证较好的厌氧释磷效果;其回流比  $r_A$  介于 2~6 倍进水量。回流 B 目标是为缺氧池(R3)及时提供  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,以充分发挥系统的反硝化除磷能力;其回流比  $r_B$  介于 4~12 倍进水量。回流 C 作用在于强化 R4 中同时硝化/反硝化(SND)效果;其回流比  $r_C$  介于 4~20 倍进水量。这 3 个混合液回流在设计上均采用 ORP 定点调节方式作为运行控制策略<sup>[1]</sup>。对于回流 A,若厌氧池  $\text{ORP} < -0.227 \text{ V}$ ,则维持最大流量;若  $\text{ORP} > -0.078 \text{ V}$  则维持最小流量; $-0.227 \text{ V} < \text{ORP} < -0.078 \text{ V}$  之间则随 ORP 值的增大而线性减小回流量<sup>[6]</sup>。回流 B 与回流 C 的运行控制方式与回流 A 基本类似。

以 ORP 定点控制的方法虽然保证了稳定、良好的出水水质,但这种控制策略可能造成较多能量浪费<sup>[6]</sup>。例如,在实际运行中厌氧池(R1)ORP 从未大于下限值,导致回流 A 长期维持在最大流量,在高进进水量 6 倍状态下运行。对于缺氧池(R3),在进水 TN 负荷小于设计负荷时,反硝化反应进行得

非常完全(以致缺氧池一般情况下  $\text{NO}_3^- - \text{N} < 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。增大回流 B 已不能进一步强化反硝化作用。但是,若采用上述 ORP 定点值控制策略,此时回流 B 仍处于最大流量状态下运行。

### 1.2 模拟方法

利用已嵌入 TUD 联合模型<sup>[10-14]</sup>的 AQUASIM2.0 软件<sup>[15]</sup>,且在对国内实际污水处理厂进行过实际模拟验证与校正的基础上<sup>[7-9]</sup>,建立图 1 所示 BCFS 工艺模型,对以下试验中给定的进水水质及工艺参数条件下的实际运行工况进行模拟预测。

### 1.3 试验方法

BCFS 实验室试验装置采用人工合成污水,配方如表 1 所示,以北京市自来水为配水水源。为消除进水波动影响以获得具有可比性的结果,试验采用静态的进水条件。试验装置处理水量为  $0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ;参考荷兰实际运行 BCFS 工艺的运行参数<sup>[1,6]</sup>,水力停留时间(HRT)确定为:厌氧池(R1) 2.2 h,接触池(R2) 18 min,缺氧池(R3) 2.2 h,缺/好池(R4) 6.4 h,好氧池(R5) 6.2 h,总 HRT 17.3 h。定义内回流比为  $r_i = Q_i / Q_{IN}$ ,试验期间运行条件见表 2。

表 1 配水成分表/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Components of influent wastewater/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	药剂	浓度	投加量
COD	牛肉蛋白胨		118.41
	牛肉浸膏	150	67.66
	葡萄糖( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )	450	435.99
TP	磷酸二氢钾	270	261.60
	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	170	164.71
TN	氯化铵 $\text{NH}_4\text{Cl}$	8	35.12
	牛肉蛋白胨	20.41	78
K	牛肉浸膏	15.39	118.41
	KCl	8.80	67.66
微量元素	EDTA	10.37	19.83
	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$		3.0
	$\text{H}_3\text{BO}_3$		0.45
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$		0.05
	KI		0.01
	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$		0.05
	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		0.04
	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		0.02
	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$		0.04

试验中,分别变化  $Q_A(r_A)$ 、 $Q_B(r_B)$ 、 $Q_C(r_C)$  及  $\text{DO}_{R5}$ ,考察这些运行参数变化时对出水水质以及释磷效果的影响。当  $r_A$ 、 $r_B$ 、 $r_C$  及  $\text{DO}_{R5}$  作为变量变化

时,其它工艺参数相对固定,变量与固定值范围见表 3.

试验过程中日常监测项目主要包括 2 大类:化学

分析与物理分析. 化学分析及物理分析中对 SS、VSS 分析按照文献 [16] 中相关方法进行,物理分析项目借助相关仪器完成. 具体分析项目及方法详见表 4.

表 2 试验运行参数

Table 2 Operational parameters

$Q_{IN}/L \cdot d^{-1}$	$Q_{RAS}/L \cdot d^{-1}$	$r_A$	$r_B$	$r_C$	SRT/d	$t/^\circ C$	$DO_{R5}/mg \cdot L^{-1}$	$DO_{R4}/mg \cdot L^{-1}$
450	450	0.5~3	0.5~3	0~2	15	20~24	1~3.5	0.5

表 3 模拟与试验变量及固定工艺参数范围

Table 3 Data range of variable and fixed parameters during the experiment

变量	固定值					
	$r_A$	$r_B$	$r_C$	$DO_{R4}/mg \cdot L^{-1}$	$DO_{R5}/mg \cdot L^{-1}$	$t/^\circ C$
$r_A$	0.5~3	2.5	0	0.5	3.5	20
$r_B$	2	0.5~3	0	0.5	3.5	22
$r_C$	2	2.5	0~2	0.5	3.5	22
$DO_{R5}$	2	2.5	0	0.5	1~3.5	24

表 4 监测项目与分析方法

Table 4 Monitoring subjects and analyzing methods

分类	项目	方法
物理分析	SS	103~105 $^\circ C$ 烘干后总残渣
	VSS	550 $^\circ C$ 烘干后总残渣
	SV	100 mL 量筒静沉 30 min
	DO	YSH700 溶氧仪
	ORP	WTW 便携式 ORP 仪
化学分析	COD	重铬酸钾氧化法
	TP	过硫酸钾消解法
	$PO_4^{3-}-P$	钼锑抗分光光度法
	TN	过硫酸钾氧化紫外分光光度法
	$NH_4^+-N$	水杨酸试剂光度法
	$NO_3^- -N$	紫外分光光度法
	$NO_2^- -N$	$N-(1-萘基)-乙二胺$ 光度法

$mg \cdot L^{-1}$  与  $30 mg \cdot L^{-1}$  左右.

## 2.2 回流 B 对系统性能的影响

回流 B 变化的模拟预测与试验验证结果示于图 3.

图 3(a) 与图 3(b) 显示, 随回流 B 逐渐增大, 出水 TN 及  $NO_3^- -N$  相应降低, 而出水  $NH_4^+ -N$  则不受影响. 虽然模拟预测值与试验结果未能完全吻合, 但模拟预测的趋势与试验结果完全一致. 图 3(a) 及图 3(b) 也显示  $r_B \geq 2$  后出水 TN 和  $NO_3^- -N$  趋于保持稳定,  $r_B$  从 2 增加到 3, 出水 TN 仅下降  $1 mg \cdot L^{-1}$ .

图 3(c) 与图 3(d) 显示, 回流 B 对出水 TP 和 COD 并没有实际影响, 出水 TP 和 COD 分别保持在  $0.6 mg \cdot L^{-1}$  与  $25 mg \cdot L^{-1}$  左右.

## 2.3 回流 C 对系统性能的影响

回流 C 变化的模拟预测与试验验证结果示于图 4.

图 4 显示, 回流 C 无论对 TN、 $NO_3^- -N$ , 还是  $NH_4^+ -N$  几乎没有任何影响, 出水 TN、 $NO_3^- -N$ 、 $NH_4^+ -N$  分别保持在 8.5、7.5 和  $0.2 mg \cdot L^{-1}$  上下. 模拟预测与试验结果近乎一致.

## 2.4 好氧池 DO 对系统性能的影响

好氧池(R5) 中 DO 变化的模拟预测与试验验证结果示于图 5.

图 5 显示, 从  $1 mg \cdot L^{-1}$  变化至  $2.5 mg \cdot L^{-1}$  的工况下, 好氧池 DO 除了对出水  $NH_4^+ -N$  有较明显影响和对  $NO_3^- -N$  略有影响外, 对 TN、TP 以及 COD 几乎影响不大. 只要  $DO_{R5} > 1 mg \cdot L^{-1}$  便可保证 COD、TP 以及 TN 具有较高去除效果. 但是, 若要获得出水  $NH_4^+ -N \leq 1 mg \cdot L^{-1}$  的实际效果, 则需要具备

## 2 模拟预测与试验验证结果

根据表 3 所示内回流及好氧池 DO 变化, 分别通过模拟与试验对这些工艺参数变化带来的系统性能影响进行了预测与验证, 结果如下.

### 2.1 回流 A 对系统性能的影响

回流 A 变化的模拟预测与试验验证结果示于图 2.

图 2(a) 显示,  $r_A \geq 1.5$  后出水 TP 基本保持不变, 模拟预测值为  $0.6 mg \cdot L^{-1}$ , 实测值介于  $0.6 mg \cdot L^{-1}$  与  $0.7 mg \cdot L^{-1}$  之间.  $r_A < 1.5$  时, 出水 TP 开始上升, 至  $r_A = 0.5$  时生物除磷效果出现恶化现象, 出水 TP 迅速攀升, 模拟预测值与实测值分别为  $3.6 mg \cdot L^{-1}$  和  $2.8 mg \cdot L^{-1}$ . 图 2(b) 显示, 在  $r_A = 1.5$  时, 厌氧释磷出现峰值(约  $30 mg \cdot L^{-1}$ ).

图 2(c) 与图 2(d) 显示, 回流 A 对出水 TN 和 COD 基本没有影响, TN 和 COD 分别保持在 9

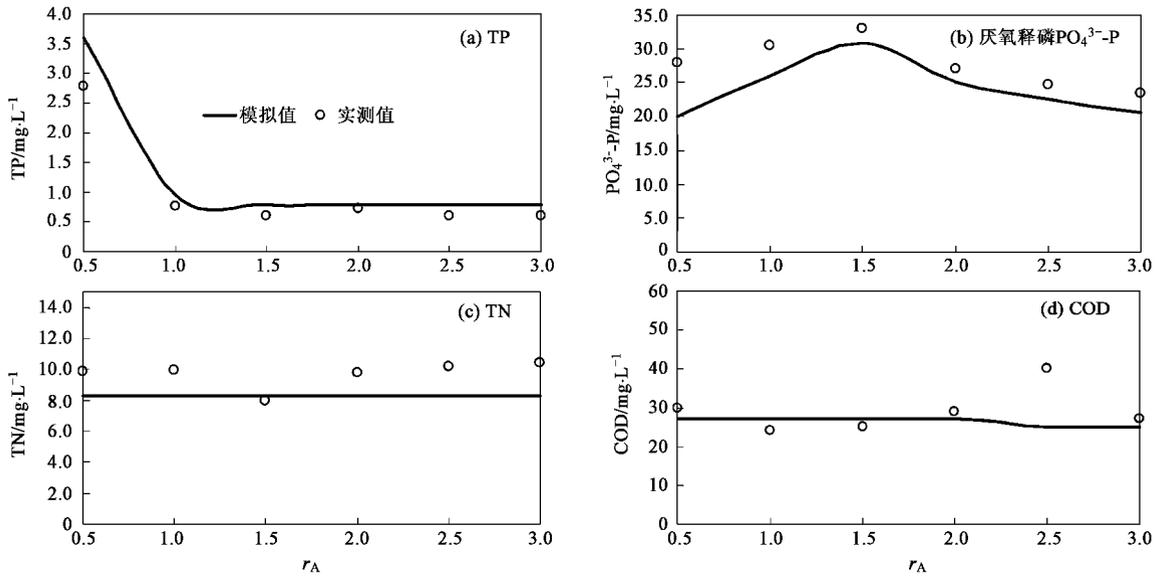


图 2 回流 A 对系统性能的影响

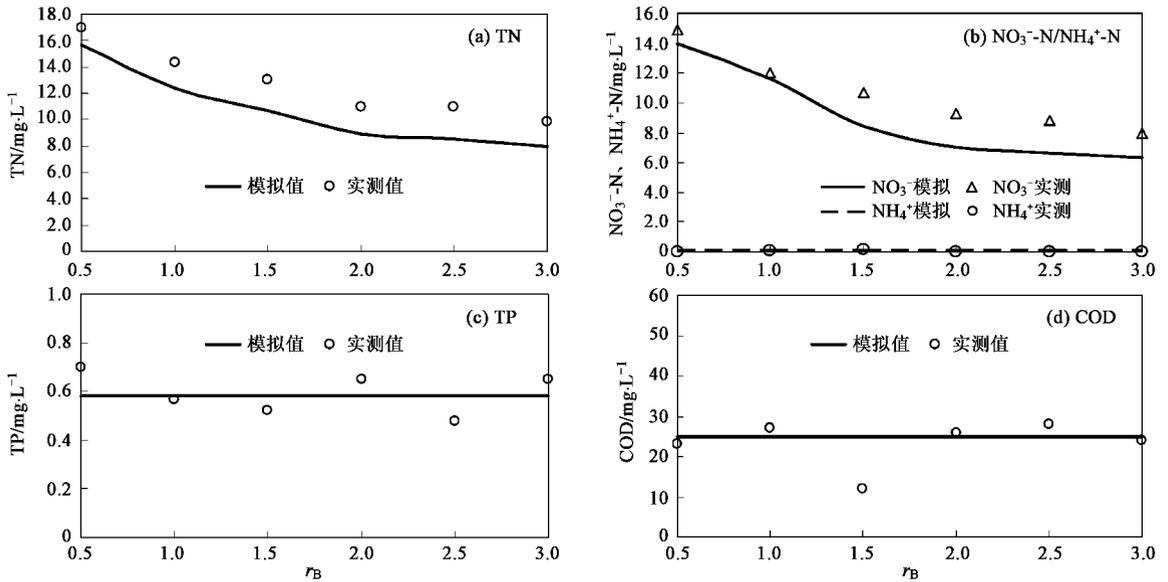
Fig. 2 Effects of  $Q_A$  on the system performance

图 3 回流 B 对系统性能的影响

Fig. 3 Effects of  $Q_B$  on the system performance

$\text{DO}_{\text{RS}} \geq 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的曝气条件。

### 3 讨论

上述试验结果表明,不同内回流及其比例以及好氧池 DO 对系统性能有着作用不尽相同的影响。所有这些影响同时经模拟预测与试验结果所验证,而且两者得出了近乎一致的趋势与结果。根据模拟预测与试验验证,就内回流、好氧池 DO 对系统性能影响进行分析,同时,就数学模拟技术作为系统运行

优化策略工具进行可行性分析。

#### 3.1 内回流对系统性能影响分析

图 2 显示,在给定进水与工艺条件下,回流 A 存在一个保证生物除磷效果的最佳值,位于  $r_A = 1.5$ 。回流 A 低于  $r_A = 1.5$  时,由于回流至厌氧池的磷细菌(PAOs/DPB)数量不足,即使进水中易生物降解的溶解性 COD 充足,厌氧释量也将明显降低;由于厌氧释磷不充分,当 PAOs/DPB 进入后续缺氧及好氧池后,其吸磷能力势必受到影响,出水

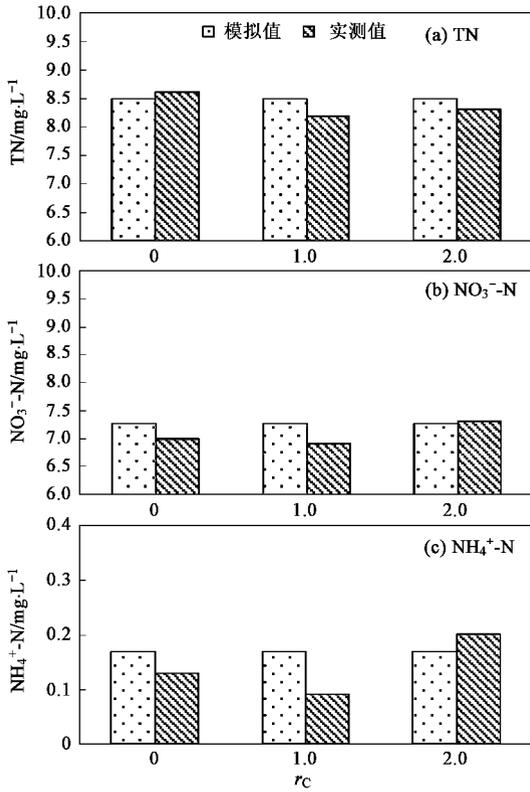
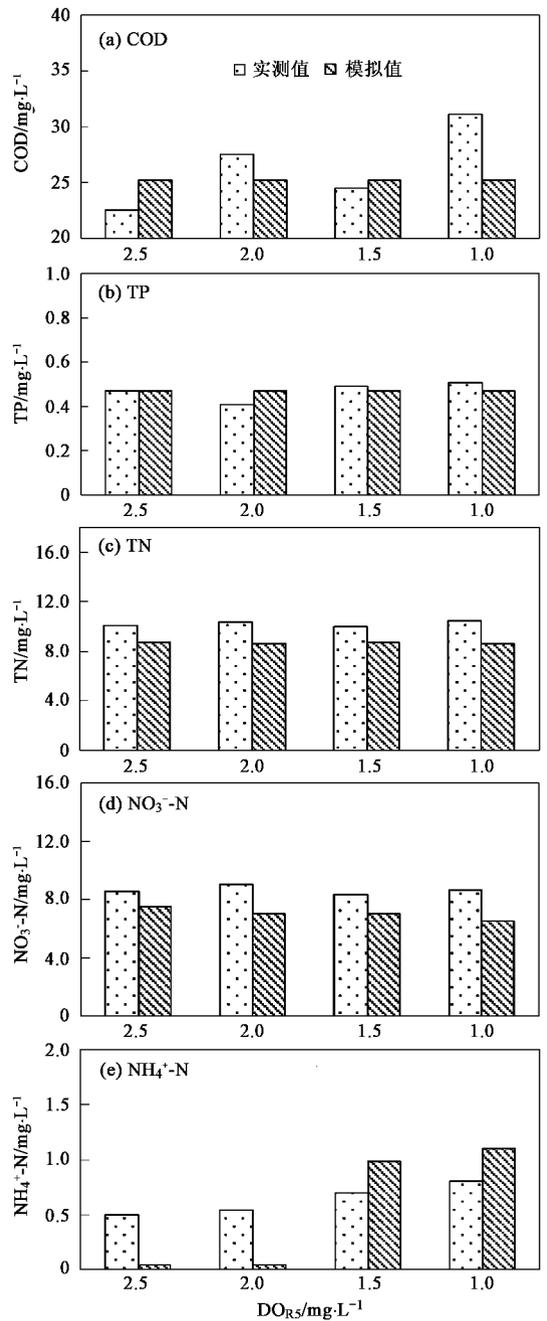


图4 回流 C 对系统性能的影响

Fig. 4 Effects of  $Q_c$  on the system performance

$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$  必然升高. 然而, 这并不意味着  $r_A$  值越大越有利于 PAOs/DPB 吸收 COD 并释放磷. 在进水 COD 负荷一定的情况下, 过多的 PAOs/DPB 回流至厌氧池, 将导致单位数量 PAOs/DPB 所获得的 COD 比例下降. 在此情形下, 虽然进入厌氧池的溶解性 COD (原水中或由水解酸化而来) 几乎均可被 PAOs/DPB 吸收, 但由于单位数量 PAOs/DPB 所获得的 COD 比例下降, 其结果亦会使磷的释放量下降, 以至于在后续缺氧及好氧池中的吸磷量并不会进一步升高.

图 3 显示, 随着回流 B 增加, 出水  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  及 TN 呈下降趋势, 这是因为回流 B 的功能是将好氧池中产生的  $\text{NO}_3^-$  及时输送至缺氧池进行反硝化除磷. 显然  $r_B$  比值越高, 回流至缺氧池的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  量就越多, 从而被反硝化去除的机会就越大. 于是, 高  $r_B$  比值可导致较低的出水  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  及 TN. 然而, 当  $r_B \geq 2$  后, 随  $r_B$  比值增加  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  及 TN 下降趋势变缓, 以至于当  $r_B$  从 2 增加至 3 时,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  及 TN 仅仅下降  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右. 这是因为在一定进水 COD 和运行条件下, 系统总的反硝化能力具有一个极限值. 超越系统的反硝化能力后, 一味增加回流 B 并没有太大强化反硝化的作用, 带来的只能是能量消耗. 图 3 显

图5 好氧池 DO ( $\text{DO}_{R5}$ ) 对系统性能的影响Fig. 5 Effects of  $\text{DO}_{R5}$  on the system performance

示, 在本研究中给定进水与工艺条件下, 选择  $r_B = 2$  作为回流 B 工艺参数已可满足运行要求.  $\text{NH}_4^+$  [图 3 (b)] 不受  $r_B$  影响, 始终保持在较低水平; 这表明好氧池 ( $R_5$ ) 及其前缺/好池 ( $R_4$ , 微曝气) 的硝化能力已足以将进水中的  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  一次氧化至  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ .

图 4 显示, 在  $R_4$  维持微量曝气的情况下, 开启及加大回流 C 并不会对生物脱氮带来任何影响. 这表明, 在本研究进水以及工艺条件下, 不仅系统的硝

化能力足够的高,而且系统的反硝化能力在  $r_B = 2.5$  的情况下已接近极限值。因此,回流 C 增加对促进硝化、反硝化已无作用,开启回流 C 实际上相当于“空转”,只能是消耗能量。

图 2~4 表明,在给定进水及工艺条件下,系统的 3 个内回流中回流 C 并不起任何作用,回流 A 与回流 B 均存在一个最佳的回流量。在实际 BNR 工艺运行中如果能根据进水水质和选定的工艺条件及时了解和掌握最佳内回流比之信息,不仅可以获得满意的出水水质,而且可以做到最大限度地节省污水处理厂能量消耗。

### 3.2 好氧池 DO 对系统性能影响分析

好氧池(R5)DO 水平高低与系统曝气量直接关联,而曝气量又与能量消耗相联系。因此,在获得满意的 COD、TP 及  $\text{NH}_4^+$ -N 去除的前提下,寻求最佳的 DO 控制水平具有重要的现实意义。

图 5 表明,R5 中 DO 从  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  变化至  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的工况下,除了对出水  $\text{NH}_4^+$ -N 有较明显影响和对  $\text{NO}_3^-$ -N 略有影响外,对 TN、TP 以及 COD 几乎影响不大。这意味着,在本研究进水水质及工艺条件,只要 R4 中  $\text{DO} \geq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  即可满足去除 TN、TP 以及 COD 的要求。但是,如果出水对  $\text{NH}_4^+$ -N 有较严格的要求(如  $\text{NH}_4^+$ -N  $\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) ,则需要有相对较高的 DO 水平。图 5 显示,本例研究中当  $\text{DO} \geq 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时即可满足  $\text{NH}_4^+$ -N  $\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的出水水质要求。显然,混合液中 DO 梯度的增加有利于硝化进行。

### 3.3 数学模拟技术作为系统运行优化策略工具可行性

图 2~5 模拟预测显示,预测趋势与试验结果趋势完全一致。尽管预测趋势并没有 100% 与试验点重合,但是平均而言,模拟预测与试验结果的平均偏离差不到 20%。这表明,经国内污水处理厂实际运行数据验证并校正后的 TUD 数学模型模拟预测实际 BNR 系统工艺运行性能已经具有很高的吻合度。从实际污水处理厂制定 BNR 工艺运行优化策略角度出发,数学模拟技术完全可以取代经验调控或中间试验而达到目的。采用这样的方法,省时、省力、省钱,使污水处理厂面对复杂的水量、水质变化和期望达到的出水水质采取较为准确的运行控制策略,在保证获得良好出水水质的前提下,做到内回流以及曝气量能量消耗最优化程度。

## 4 结论

(1)回流 A 存在一个最佳的比值( $r_A$ );本研究

实例中,这一比值为  $r_A = 1.5$ 。  $r_A < 1.5$  时,出水 TP 逐渐开始攀升。 $r_A > 1.5$  时,出水 TP 并不会进一步改善。回流 A 对 COD 及 TN 去除并没有实际影响。

(2)回流 B 比值( $r_B$ )大小决定着出水的 TN 及  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度,即控制着系统的反硝化能力;但并不是越高的回流 B 比值对应于越低的出水 TN 与  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度。当  $r_B > 2$  后回流 B 增加对提高 TN 去除效果的作用已十分有限。本研究实例中,控制回流 B 在  $r_B = 2$  已足以满足良好的出水 TN。回流 B 对 COD 及 TP 去除没有实际影响。

(3)在本研究实例中,回流 C 开启并增大对 COD、TP 及 TN 几乎没有影响。在某种程度上,开启的回流 C 实际上相当于“空转”而消耗能量。

(4)只要好氧池  $\text{DO} \geq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  便可获得满意的 COD、TN 以及 TP 去除效果。但是,如果要保证出水  $\text{NH}_4^+$ -N  $\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ,则需将 DO 维持在较高水平。本研究实例中,当 DO 维持在  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时便可达到出水  $\text{NH}_4^+$ -N  $\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的效果。

(5)模拟预测与试验结果有着完全一致的趋势效果。模拟预测与试验结果具有 >80% 的吻合度。因此,数学模拟及技术完全可以应用于实际污水处理厂运行优化策略制订。

### 参考文献:

- [1] van Loosdrecht M C M, Brandse F A, de Vries A C. Upgrading of waste water treatment processes for integrated nutrient removal-the BCFS® process [J]. *Water Sci and Technol*, 1998, 37(9):209-217.
- [2] Menzi S, Steiner M. Model-based control for nitrogen-eliminating wastewater treatment plants [A]. In: *IEEE Control System Society. Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications* [C]. New York: Control Applications, 1995. 842-847.
- [3] Wen C H, Vassiliadis C A. Applying hybrid artificial intelligence techniques in wastewater treatment [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1998, 11(6):685-705.
- [4] Baeza J, Gabriel D, Lafuente J. Expert supervisory system for a pilot WWTP [J]. *Environmental Modelling and Software*, 1999, 14(5):383-390.
- [5] Belanche L, Valdes J J, Comas J, et al. Towards a model of input-output behaviour of wastewater treatment plants using soft computing techniques [J]. *Environmental Modelling and Software*, 1999, 14(5):409-419.
- [6] Meijer S C F. Theoretical and practical aspects of modeling activated sludge processes [D]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2004. 134-136.
- [7] 郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等.采用 TUD 联合模型模拟倒置  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺的运行工况[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(5):1-4.

- [ 8 ] 郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 数学模拟应用中的污水水质 ( COD )特征化方法[ J ]. 中国给水排水, 2007, **23**( 13 ): 7-10.
- [ 9 ] 郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 采用 TUD 模型动态模拟倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺运行工况[ J ]. 中国给水排水, 2007, **23**( 16 ): 85-89.
- [ 10 ] Smolders G L F. A metabolic model of the biological phosphorus removal ; stoichiometry , kinetics and dynamic behaviour [ D ]. Delft , the Netherlands : Delft University of Technology , 1995. 25-100.
- [ 11 ] Smolders G L F , van der Meij J , van Loosdrecht M C M , *et al.* Structured metabolic model for anaerobic and aerobic stoichiometry and kinetics of the biological phosphorus removal process [ J ]. *Biotechnol Bioeng* , 1995 , **47**( 33 ) : 277-287.
- [ 12 ] Kuba T , Murnleitner E , van Loosdrecht M C M , *et al.* A Metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms [ J ]. *Biotechnol Bioeng* , 1996 , **52**( 6 ) : 685-695.
- [ 13 ] Murnleitner E , Kuba T , van Loosdrecht M C M , *et al.* An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorous removal [ J ]. *Biotechnol Bioeng* , 1997 , **54**( 5 ) : 434-450.
- [ 14 ] van Veldhuizen H M , van Loosdrecht M C M , Heijnen J J. Modeling biological phosphorus and nitrogen removal in a full scale activated sludge process [ J ]. *Water Res* , 1993 , **33**( 16 ) : 3459-3468.
- [ 15 ] Reichert P. AQUASIM 2.0-Computer Program for the Identification and Simulation of Aquatic Systems [ M ]. Switzerland : EAWAG , Dübendorf , 1998. 10-29.
- [ 16 ] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[ M ]. ( 第四版 ). 北京 : 中国环境科学出版社 , 2002. 105-284.