

郝晓地, 张璐平, 胡沅胜, 等. 2009 侧流化学磷回收强化生物除磷的模拟预测与试验验证 [J]. 环境科学学报, 29(11): 2274-2281

Hao X D, Zhang L P, Hu Y S, et al. 2009. Modeling prediction and experimental verification of enhancing bio-phosphorus removal by chemical precipitation of anaerobic digester supernatant [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(11): 2274-2281

侧流化学磷回收强化生物除磷的模拟预测与试验验证

郝晓地*, 张璐平, 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

收稿日期: 2009-02-06 修回日期: 2009-05-01 录用日期: 2009-08-07

摘要: 为了强化污水中生物除磷作用, 本研究通过模拟预测与实验室试验验证了厌氧上清液侧流化学磷沉淀与回收对强化生物除磷的促进作用。模拟预测与试验结果表明, 在进水 COD/P = 37.5 工况下, 当侧流比增加至 30% 时, 通过化学磷沉淀 (调节 pH > 9.0) 可使出水中 TP 浓度从碳源抑制时的 $< 6.0 \text{ mg L}^{-1}$ (以 P 计) 下降至 $\leq 1.0 \text{ mg L}^{-1}$ (以 P 计), 同时可回收进水中 P 负荷的 64%。经验证与校正后的 TUD 数学模型模拟预测有着与试验结果近乎一致的效果。因此, 数学模拟技术完全有可能取代中间试验过程而直接将小试结果放大至工程应用。

关键词: 生物除磷; COD/P; 厌氧上清液; 侧流比; 化学磷沉淀; 模拟预测

文章编号: 0253-2468(2009)11-2274-08 中图分类号: X703 文献标识码: A

Modeling prediction and experimental verification of enhancing bio-phosphorus removal by chemical precipitation of anaerobic digester supernatant

HAO Xiaodi*, ZHANG Luping, HU Yuansheng, WANG Kewei

The R & D Centre for Sustainable Environmental Biotechnology, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044

Received 6 February 2009; received in revised form 1 May 2009; accepted 7 August 2009

Abstract By means of modeling prediction and a lab-scale experiment, we tested bio-P removal by chemical-P precipitation in the side-stream of an anaerobic digester supernatant. Both the modeling prediction and the experimental results indicate that TP in the effluent could be decreased to $\leq 1.0 \text{ mg L}^{-1}$ from $> 6.0 \text{ mg L}^{-1}$ (in terms of P) at COD/P = 37.5 by chemical-P precipitation with the side-stream ratio at 30%. At the same time, 64% of the influent P load could be recovered. The verified and calibrated TUD model predicted almost the same results as those obtained from the experiment. Therefore, modeling technology is fully capable of replacing pilot-scale experiments in the scale-up of biological nutrient removal (BNR) processes.

Keywords Bio-P removal; COD/P; anaerobic supernatant; ratio of side-stream to influent; chemical-P precipitation; modeling prediction

1 引言 (Introduction)

原污水中碳源不足往往成为生物营养物去除 (BNR) 工艺工程应用的限制性因素 (Hao *et al.*, 2006). 针对这一问题, 技术上通常采取增加碳源的方式予以应对: ①投加外部碳源, 如甲醇、酒精等; ②释放内部碳源, 如, 对初沉、剩余污泥水解酸化、裂解等方式释放内部有效碳源 (Ellitt *et al.*, 2007; Novak *et al.*, 2007). 投加外部碳源固然十分奏效, 但运行成本与剩余污泥产量势必增加。取消初次沉

淀池将原污水中颗粒性有机物予以水解、酸化可以释放一定量的挥发性有机酸 (VFAs), 但这并不会增加进水中总的有机物含量; 只要进水中总的 COD/P (或 COD/N) 比值已经成为限制性因子, 水解/酸化对生物脱氮除磷的促进作用则十分有限。剩余污泥从理论上说是一种可以利用的内部有机碳源, 正因为如此, 剩余污泥通常被利用来进行厌氧消化产生甲烷 (CH₄)。然而, 由于细菌细胞在常规厌氧消化条件下不易裂解, 所以, 为增加 CH₄ 产量不得不采取一些预处理措施 (Ellitt *et al.*, 2007; Novak *et al.*, 2007)。这样的预处理技术若应用于剩余污泥的水

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (No. 2006AA06Z320); 北京市“可持续水与废物循环利用技术”学术创新团队项目 (No. BJE10016200611)

Supported by the National High-Tech R&D Program of China (No. 2006AA06Z320) and the Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning Under the Jurisdiction of Beijing Municipality (No. BJE10016200611)

作者简介: 郝晓地 (1960—), 男, 教授 (博士), E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn * 通讯作者 (责任作者)

Biography: HAO Xiaodi (1960—), male, professor (Ph.D.), E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn * Corresponding author

解酸化,其设施投资和运行成本可能比外加碳源还要高昂,未必适合于强化 BNR 工艺。

实际上,提高进水中 COD/P 比值除了在分子项中增加 COD 绝对量方式以外,理论上亦可以通过降低 COD/P 比值中分母项 P 含量来实现.这就意味着需要从原污水中或 BNR 工艺系统内部有效分离出一部分 P 负荷.实现这样的目标采用化学磷沉淀方式显然较为简单.但是,对原污水实施化学磷沉淀一方面会因进水量大、磷浓度低而导致较低的 P 去除效率和高昂的运行成本,另一方面亦会导致原污水中部分 COD 因絮凝而被去除.这就需要从 BNR 工艺系统内部寻找更为有效的化学磷沉淀途径.研究与应用表明,BNR 工艺中厌氧池上清液因释磷量高(最高可达 $40\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 P 计))而非常适合于实施侧流化学磷沉淀(van Loosdrecht *et al.*, 1998; van Rensburg *et al.*, 2003; Heinemann *et al.*, 2004).

另一方面,磷是自然界一种非常有限的自然资源.地壳中优质磷矿石(P_2O_5 含量 $> 15\%$)以目前开采速度计算,将在 100 年之内耗至殆尽(Isherwood, 2000);中国磷矿产资源将在不到 70 年的时间内耗竭(郝晓地等, 2003).在此情况下,污水处理中将磷单纯地“去除”转变为有意识的“回收”已受到国际社会的普遍重视.因此,对 BNR 工艺部分厌氧上清液实施侧流化学磷沉淀,不仅有助于相对提高 COD/P 比而强化生物除磷作用,而且还能回收一部分污水中的磷,使污水中营养物去除和磷回收有效合二为一(Gatereel *et al.*, 2000; Kuroda *et al.*, 2002; 郝晓地等, 2002).换句话说,这种侧流化学

磷沉淀回收技术方式具有一箭双雕的功能。

本研究在前期对一 BNR 工艺(BCFS)模拟预测(Hao *et al.*, 2006)与试验研究(郝晓地等, 2002)的基础上,分别以数学模拟与人工配水方式改变进水 COD/P 比,模拟预测并试验考察了低 COD/P 比对出水 P 浓度的影响.同时,在 COD/P 比降低至严重影响出水 P 浓度时,再次通过模拟预测和试验考察研究了厌氧池上清液侧流磷沉淀促进出水 P 浓度的效果及相关关系.最后,在获得模拟预测与试验结果相吻合的情况下,验证了数学模拟技术取代中间试验,将小试试验直接放大至实际工程设计的可行性,旨在为实现 BNR 工艺问题诊断及运行优化提供参考。

2 试验/模拟方法与材料 (Experimental/modeling methods and materials)

2.1 工艺流程

试验中小试 BNR 工艺采用荷兰 BCFS 流程(郝晓地等, 2003),成型装置处理水量按 $0.45\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 设计,实验装置如图 1 所示.装置中各反应器及二沉池(底部锥形)用圆柱形有机玻璃加工而成,在厌氧池、接触池、缺氧池和缺好氧池上端设有调速搅拌器,缺好氧池和好氧池底端设有盘式曝气头.进水和各内、外回流通过蠕动计量泵提升实现,厌氧池泥水分离与上清液抽取通过一专利装置实现(郝晓地等, 2008).当辅以化学磷沉淀回收时,用蠕动计量泵按比例抽取厌氧上清液(Q_S)至化学沉淀单元(图 1 虚线部分),磷沉淀后的上清液再回流至接触池。

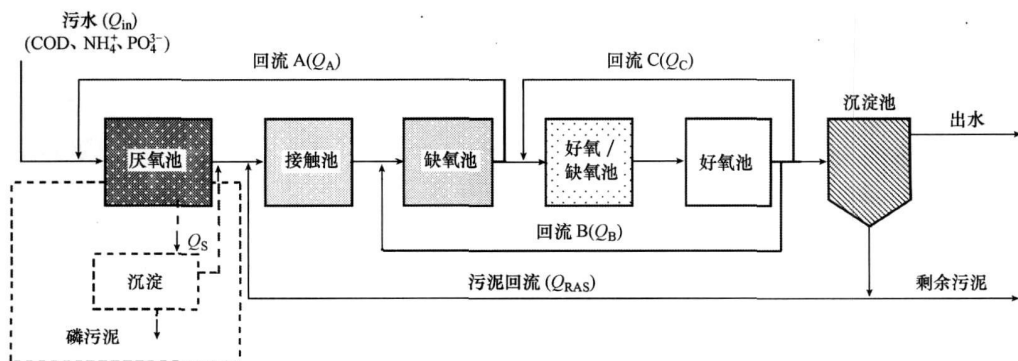


图 1 实验室小试 BCFS 工艺流程 ($Q_{in} = 18.75\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_A = 37.5\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_B = 46.99\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_C = 0\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_{RAS} = 18.75\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, $Q_S = kQ_{in}$, $V_{厌氧}(R1) = 40\text{ L}$, $V_{接触}(R2) = 6\text{ L}$, $V_{缺氧}(R3) = 40\text{ L}$, $V_{好/缺}(R4) = 120\text{ L}$, $V_{好氧}(R5) = 120\text{ L}$, $V_{沉淀} = 60\text{ L}$)

Fig. 1 Schematic representation of a lab-scale BCFS process

2.2 试验方法与分析项目

试验进水采用人工配水,以北京市自来水为配水水源,配方如表 1 所示。

试验过程中通过改变进水 COD (进水 TP 保持在 8 mg L^{-1} (以 P 计)) 来调整 COD/P 比值. 以 COD = 600 mg L^{-1} 作为进水初始值, 以充分培养活性污泥 (污泥取自北京某污水处理厂活性污泥工艺). 待污泥浓度达到预期范围 ($3000 \sim 4000 \text{ mg L}^{-1}$) 且污泥性状良好 ($\text{SVI} = 100 \sim 130 \text{ mL g}^{-1}$) 后, 依次降低进水 COD 值, 直至 COD 低至 300 mg L^{-1} .

当实施侧流化学磷沉淀/回收时, 从厌氧池按 3 种侧流比: 10%、20% 和 30% 引出上清液, 投加 NaOH 调节 pH (> 9.0) 后即可藉水中钙、镁离子 (北京市自来水中 Ca^{2+} 平均浓度为 310 mg L^{-1} , Mg^{2+} 平均浓度为 150 mg L^{-1}) 形成磷的沉淀混合物 (郝晓地等, 2009).

表 1 配水成分表

Table 1 Components of Influent wastewater

指标	药剂	浓度 / (mg L^{-1})	450L 投加量 / g
COD	牛肉蛋白胨	150	118.41
	牛肉浸膏		67.66
	葡萄糖	450	435.99
	($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	270	261.60
		170	164.71
TP	磷酸二氢钾	8	35.12
	KH_2PO_4	15	65.85
TN	氯化铵 NH_4Cl	20.41	78.00
	牛肉蛋白胨	15.39	118.41
	牛肉浸膏	8.80	67.66
K	KCl	10.37	19.83
微量元素	EDTA	3.00	
	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.45	
	H_3BO_3	0.05	
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.01	
	KI	0.05	
	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.04	
	$\text{Na}_2\text{MgO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02	
	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.04	
	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.05	

试验过程中日常监测项目主要包括两大类: 化学分析与物理分析. 化学分析及物理分析中对 SS、VSS 分析按照中国环境出版社出版的《水和废水监测分析方法》(第 4 版) 中相关方法进行 (王心芳等, 2002); 物理分析项目借助相关仪器完成. 其中, 物理分析包括 SS、VSS、SV、DO、ORP 的测定. SS 采用 $103 \sim 105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干后总残渣法测定; VSS 采用 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干后总残渣测定; SV 采用泥水混合样放入 100 mL

量筒静沉 30 min 后测定; DO 使用 YSI1700 溶氧仪测定; ORP 使用 WTW 便携式 ORP 仪测定. 化学分析包括 COD、TP、 PO_4^{3-} 、TN、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、VFA s 的测定. COD 采用重铬酸钾氧化法测定; TP 采用过硫酸钾消解法测定; PO_4^{3-} 采用钼锑抗分光光度法测定; TN 采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定; NH_4^+ 采用水杨酸试剂光度法测定; NO_3^- 采用紫外分光光度法测定; NO_2^- 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定; VFA s 采用五点 pH 滴定法测定.

2.3 试验条件与环境

由于 BCFS⁵ 工艺具有氧化沟的特点, 故将污泥龄 (SRT) 控制在 30d 好氧池溶解氧 (DO) 随温度变化进行相应调整, 一般维持在 $2 \sim 4 \text{ mg L}^{-1}$; 缺氧池 DO 一般固定于 0.5 mg L^{-1} . 厌氧池厌氧状态以氧化还原电位 (ORP) 衡量, ORP 范围在 $-270 \sim -300 \text{ mV}$ 之间. 试验水温随季节变化在 $27 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间.

2.4 模拟方法

利用已嵌入 TUD 联合模型 (Smolders, 1995a; Smolders *et al.*, 1995b; Kuba *et al.*, 1996; Mumleitner *et al.*, 1997; van Veldhuizen *et al.*, 1993) 的 AQUASM 2.0 软件 (Reichert, 1998), 并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 (郝晓地等, 2007a, 2007b, 2007c), 建立如图 1 所示工艺模型, 在试验给定进水水质及工艺参数条件下对实际运行工况进行模拟预测.

3 模拟预测与试验结果 (Modeling prediction and experimental results)

3.1 低 COD/P 比进水对出水 P 的影响

前期试验研究表明, COD/P ≥ 50 时, 试验系统运行效果良好, 出水水质一般为: TP = 0.5 mg L^{-1} (以 P 计)、TN = 10 mg L^{-1} (以 N 计)、COD = 25 mg L^{-1} . 然而, 我国城市生活污水中碳源普遍较低. 以北京为例, 原污水中 COD/P 比值大多低于 50 水平, 且其中较多 COD 属不易降解和难降解成分. 这也是我国很多污水处理厂脱氮除磷作用不能奏效的主要原因.

本研究中, 当逐渐降低配水的 COD/P 比值至 37.5 在保持 SRT 为 30 d 不变的情况下, 污泥浓度 (MLSS) 受进水低 COD 影响降低至 $3000 \sim 3500 \text{ mg L}^{-1}$ (MLVSS/MLSS = 0.83), 系统出水 TP 迅速攀升至 $> 6 \text{ mg L}^{-1}$. 与此同时, 运用数学模拟手段得出在该运行工况下相应模拟预测结果 (表 2). 试验系统各反应器沿程试验与模拟预测结果见图 2.

表 2 COD/P=37.5 下的试验与模拟预测结果

Table 2 Experimental and modeling results at COD/P=37.5

试验条件	COD _{TOT}	COD _S	TN	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	TP	PO ₄ ³⁻
进水	296	203	46.5	38.9	1.9	9.7	7.9
出水	27	19	13.3	0.4	12.9	6.1	5.4
模拟出水	26	16	13.7	0.2	13.0	5.9	5.4

注: TN、NH₄⁺、NO₃⁻ 浓度以 N 计; TP、PO₄³⁻ 以 P 计。

试验结果与模拟预测基本吻合, 说明验证校正后的 TUD 模型对试验运行有着较好的预测能力, 可以进一步用于后续试验的定向预测作用 (见表 2 与图 2)。试验及模拟均显示, 在 COD/P=37.5 这一工况下, 调控各混合液回流已无法起到强化生物脱氮除磷的作用, 即使减小 SRT 也不能起到强化生物

除磷的作用, 反而会进一步减小系统内的生物量。因此, 必须在常规控制手段以外寻找针对低碳源情况的控制方法。于是, 本研究通过侧流抽取厌氧上清液进行化学磷沉淀并强化生物除磷作用的后续试验与模拟预测。

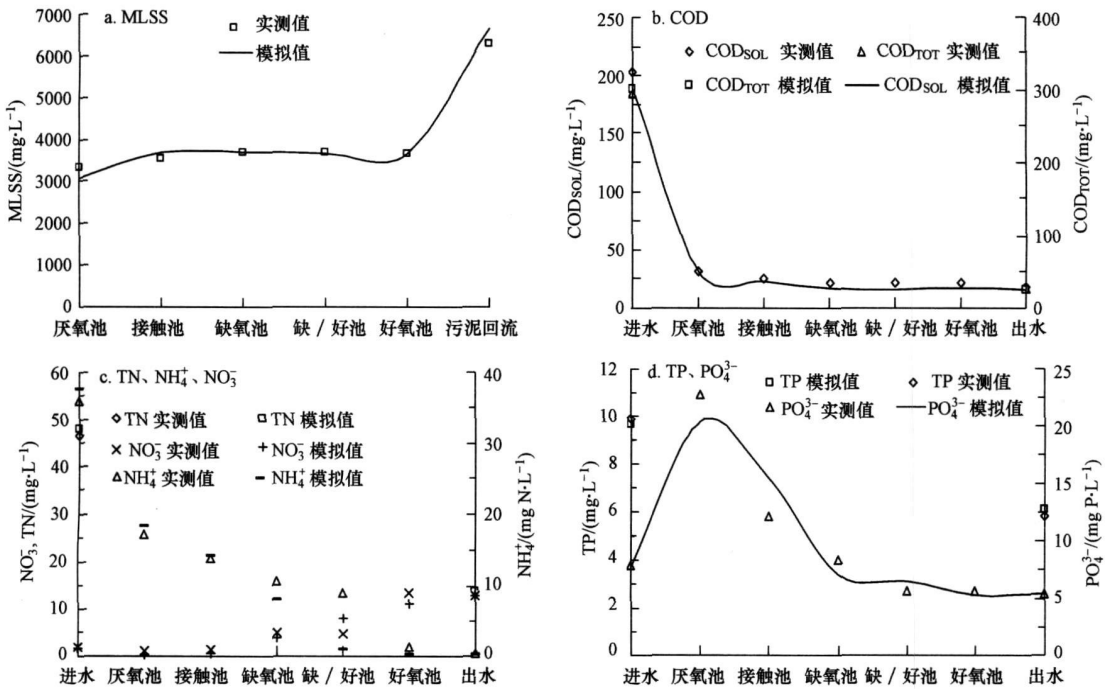


图 2 COD/P=37.5 下的沿程试验与模拟预测结果

Fig. 2 Experimental results and modeling prediction along the reactors at COD/P = 37.5

3.2 侧流厌氧上清液化学磷沉淀强化生物除磷

由 3.1 节可知, 数学模拟技术完全可用于不同工况下试验结果的预测。利用这种方法可以减少试验方向的盲目性, 起到定向导航试验方向的作用。在模拟定向试验前提下开展试验研究, 将试验结果与模拟预测进行对比, 以确定模拟预测的精确性。

在上述 COD/P=37.5 工况下, 选择 3 种侧流比考察化学磷沉淀对强化系统生物除磷作用的效果。先模拟后试验, 然后对比两种结果。

3.2.1 模拟预测 3 种侧流比下对各反应器及出水中 COD、NH₄⁺、NO₃⁻ 及 PO₄³⁻ 的模拟预测结果如图 3 所示。由图 3 可知, 侧流比对 COD 去除没有影响; 在较高侧流比 (>30%) 下, 出水 NO₃⁻ 略有降低, 而 NH₄⁺ 浓度基本保持不变; 出水 TN 由于 NO₃⁻ 在较高侧流比时略微降低而呈现出略有下降的趋势; 随侧流比的增加, 厌氧反应器释磷浓度虽然有所降低, 但出水 PO₄³⁻ 浓度呈明显下降趋势, 在侧流比增加到 30% 时, 出水 PO₄³⁻ 可降至 1 mg·L⁻¹ (以 P 计) 以下。

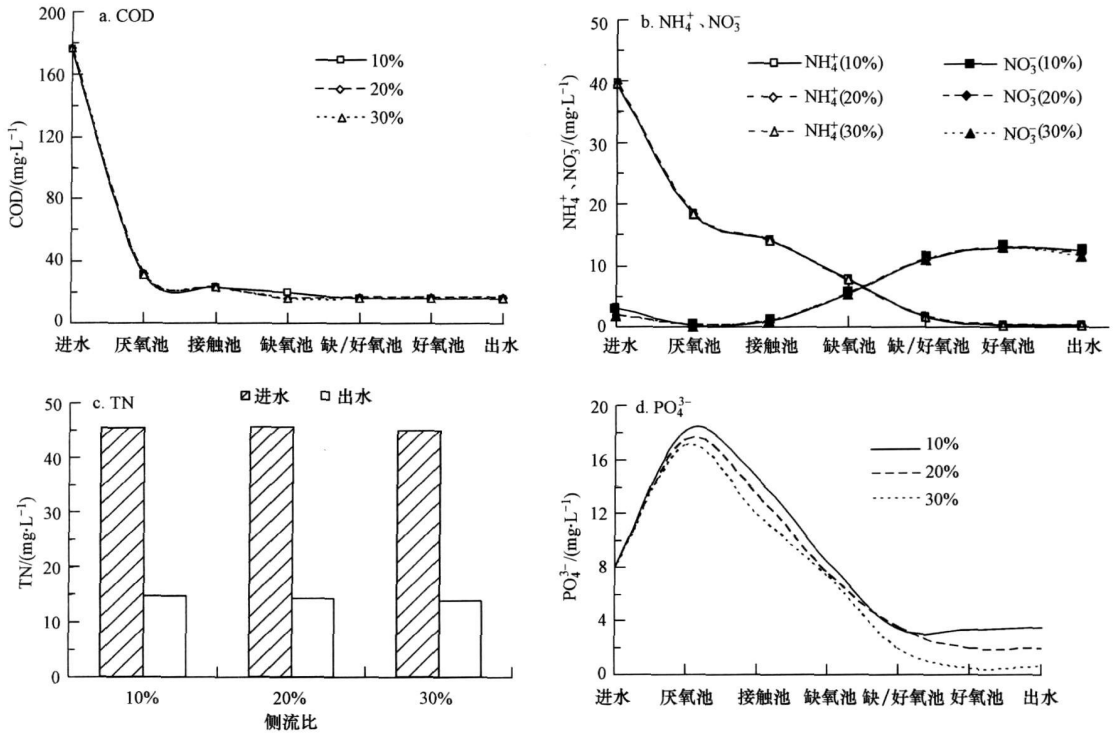


图 3 模拟预测不同侧流比下各反应器及出水水质变化
Fig 3 Predicted changes of supernatants in the reactors and effluents

3 2 2 试验结果 在相同工况下, 3种侧流比下的

试验结果如图 4所示. 由图 4可知, 随侧流比的增

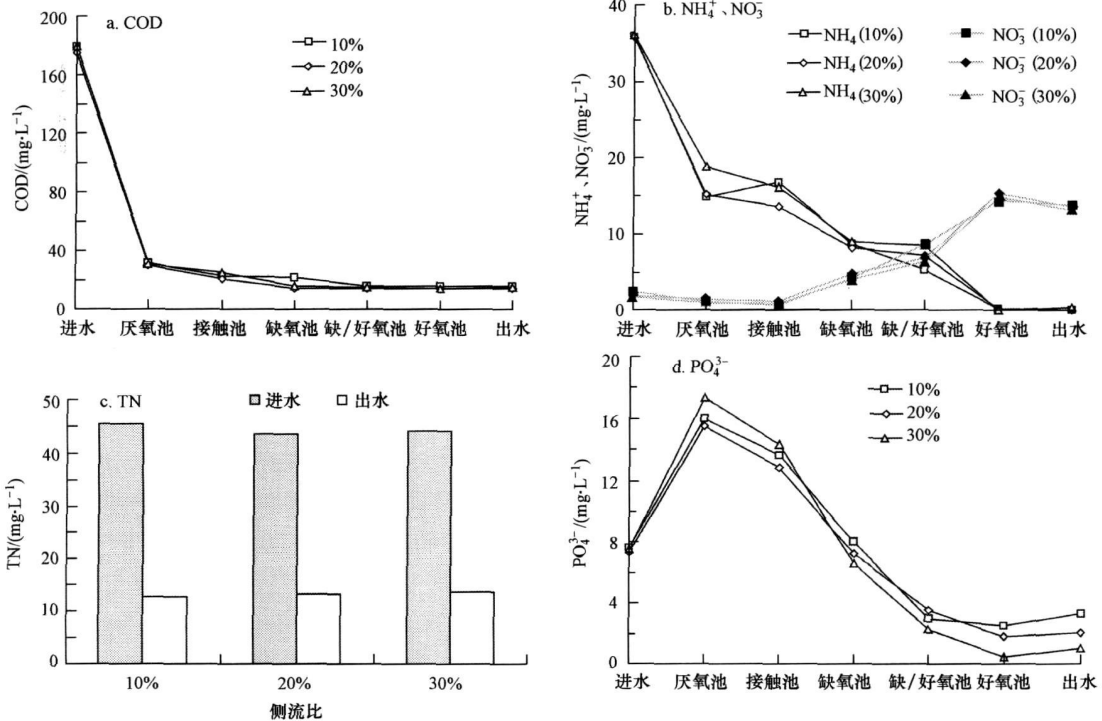


图 4 不同侧流比下各反应器及出水水质变化试验结果
Fig 4 Experimental results of the reactors and effluents at different side-stream ratios

加, COD 沿程基本保持不变, 总去除率稳定在 95% 左右, 出水中 COD 浓度最高为 $22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 各反应器及出水中 NH_4^+ 、 NO_3^- 及 PO_4^{3-} 的变化趋势与浓度范围也与上述模拟预测结果大体吻合。

与模拟预测结果 (图 3b 3c) 对比, 在侧流比为 20% 和 30% 时, NH_4^+ / NO_3^- 在 R4 (缺氧/好氧反应器) 处试验结果与模拟预测存在一定偏差 (图 4b 4c)。模拟预测结果显示, NH_4^+ 、 NO_3^- 在 R4 处将分别有明显下降、上升趋势, 即 R4 处会发生明显的硝化反应, 这是因为模拟中 R4 设置为微量曝气状态 ($\text{DO} = 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。而试验结果显示, NH_4^+ 、 NO_3^- 在 R4 处几乎没有变化。试验结果偏差的形成一方面与溶氧仪在低 DO 浓度下敏感度下降造成的 DO 测量误差有关, 另一方面是由于在实际反应器中曝气不均匀, 在中心区 ($\text{DO} = 0.5 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 与边缘侧 ($\text{DO} = 0.1 \sim 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 形成一定的 DO 梯度。因而导致试验中输入 R4 的 DO 值较模拟预测时要小, 从而抑制了硝化反应。

4 讨论 (Discussion)

根据上述模拟预测及试验结果的一致性以及化学磷沉淀对 BNR 系统生物除磷的促进作用, 针对本研究中几个主要关心的问题展开以下讨论。

4.1 化学磷沉淀强化生物除磷作用

试验结果显示, 当 COD/P 下降至 37.5 时, 试验系统出水 TN 没有明显下降 (表 3 与图 2c), 仍保持在 $13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 但此时出水 TP 已从非碳源条件抑制 ($\text{COD}/\text{P} \geq 50$) 下的 $\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 攀升至 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 P 计) 以上, 即使是 PO_4^{3-} 也会上升至 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上 (图 4d)。由此可见, 进水中外部碳源不足对生物除磷的抑制要较生物脱氮明显。

在此工况下, 按试验研究目的开始实施厌氧上清液侧流化学磷沉淀。当以化学方式从试验系统中除去一部分 PO_4^{3-} 后, 磷沉淀后厌氧上清液回流至后续主流系统后显然会使 COD/P 比相对提高, 这与单纯靠增加外部碳源 (COD) 具有异曲同工的效果, 必然会使生物除磷 (包括反硝化除磷) 作用得到加强。如图 3 与图 4 所示, 随侧流比逐渐增加, 出水中 PO_4^{3-} 明显开始下降, 以至于当侧流比为 30% 时下降至 $< 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这与试验前理论分析的趋势完全一致, 充分验证了 BNR 系统中化学磷沉淀辅助生物除磷具有显著提高 COD/P 比, 进而促进生物除磷的强化作用。

4.2 化学磷沉淀可行性及磷回收效率

试验中所实施的厌氧上清液侧流化学磷沉淀可以借助于厌氧反应器中的泥水分离装置轻而易举地实现, 无需再额外设置沉淀池获得厌氧上清液。试验中为获得精确的侧流量, 使用了蠕动计量泵实施。在实际应用中, 厌氧上清液侧流完全可以借助 BNR 流程初始水位高差而实现自流。然而, 磷沉淀后的厌氧上清液则需要靠水泵 (试验中亦使用蠕动计量泵) 提升回主流线。

对厌氧上清液实施化学磷沉淀简单易行。理论上, 可以投加一些容易导致 PO_4^{3-} 沉淀的金属离子化合物 (如 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等化合物), 在调节 pH 至碱性条件后的较短反应时间内便可以实现。而在本试验条件下, 因配水中含有较多 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 成分 (因地下水比例较高), 因此, 只要将 pH 调节至 9.0 以上, 无需再外加金属离子化合物便可以自动生成 PO_4^{3-} 混合沉淀物 (郝晓地等, 2009)。试验表明, 在厌氧池上清液中 PO_4^{3-} 为 $16 \sim 18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的情况下, 经 30 min 沉淀反应时间便可以使上清液中的 PO_4^{3-} 降低至 $0.5 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (取决于试验时环境温度)。

试验表明, 当侧流比为 30% 时, 可获得良好的 PO_4^{3-} 出水, 同时, 以化学磷沉淀方式可回收进水 P 负荷的 64%。这样的磷回收率对延缓自然界磷的匮乏速度有着非常积极的作用。

4.3 数学模拟代替中试试验可行性

图 2 图 3 及图 4 表明, 模拟预测与试验结果不仅在趋势上有着一致性, 而且数值范围在大多数情况下也有着大于 95% 的吻合性。这就充分说明, TUD 数学模型经国内实际污水处理厂运行实践验证与校正后完全可以用于 BNR 工艺研发的放大, 省去传统方法中不可缺少的中间试验步骤。这不仅可以从节省研发费用, 还可以加速研发工艺的工程应用速度。这一新的工艺研发方式目前已在国际上开始应用, 如 SHARON、ANAMMOX 等工艺的工程应用便是从实验室小试的基础上利用数学模拟技术直接放大至工程应用 (郝晓地等, 2002a, 2002b)。

数学模拟技术不仅仅在工艺设计上有着比传统设计的精确性和运行效果的预知性, 而且在污水厂建成运行后可以用于运行问题诊断、运行优化策略的制定 (郝晓地等, 2007d)。

5 结论 (Conclusions)

1) 抽取部分厌氧上清液, 以侧流方式实施化学

磷沉淀可相对提高进水的 COD/P 比值,这与单纯靠增加外部碳源(COD)来提高 COD/P 比具有异曲同工的效果。

2) 厌氧上清液侧流化学磷沉淀通过相对提高的 COD/P 比可明显改进出水的 P 含量。在 COD/P = 37.5 的工况下,当侧流比增加至 30% 时,出水中的 TP 浓度可以从碳源抑制时的 $> 6.0 \text{ mg L}^{-1}$ 下降至 $\leq 1.0 \text{ mg L}^{-1}$ 。

3) 厌氧上清液侧流化学磷沉淀在操作上简单、易行。对以地下水为主的城市污水来说,一般只需靠调节 pH 至 9.0 以上便可以在短时间内在侧流厌氧上清液中形成沉淀 (PO_4^{3-} 去除率可达 80% ~ 90%),无需再额外投加金属化合物。

4) 当侧流比为 30% 时,出水中 TP 浓度在显著改善的同时,化学磷沉淀作用可回收进水中 P 负荷的 64%。

5) 经验证与校正后的 TUD 数学模型模拟预测有着与试验结果近乎一致的效果。因此,数学模拟技术完全有可能取代中间试验步骤而直接将小试结果放大至工程应用。

责任作者简介:郝晓地(1960—),男,教授,获荷兰代尔夫特理工大学(TU Delft)博士学位。国际水协(IWA)学术刊物《Water Research》编委。主要研究方向: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。

参考文献 (References):

Elliot A, Mahmood T. 2007. Pretreatment technologies for advancing anaerobic digestion of pulp and paper biotreatment residues [J]. *Water Res* 19(41): 4273—4286

Gaterell M R, Gay R, Wilson R, et al. 2000. An economic and environmental evaluation of the opportunities for substituting phosphorus recovered from wastewater treatment works in existing UK fertilizer markets [J]. *Environ Technol* 21: 1067—1084

Hao X D, van Loosdrecht M C M. 2006. Model-based evaluation of struvite recovery from an inline stripper in a BNR process (BCFS⁵) [J]. *Water Sci Tech* 53(3): 191—198

郝晓地,甘一萍. 2003. 排水研究新热点——从污水处理过程中回收磷 [J]. *给水排水*, 29(1): 20—24

Hao X D, Gan Y P. 2003. A new hot topic for drainage——reclaiming P from the process of wastewater treatment [J]. *Water and Wastewater Engineering* 29(1): 20—24 (in Chinese)

郝晓地,汪慧贞,Mark van Loosdrecht. 2002a. 可持续生物除磷脱氮 BCFS⁵ 工艺 [J]. *给水排水*, 28(9): 5—8

Hao X D, Wang H Z, Van Loosdrecht M. 2002a. BCFS—a sustainable process for removing nitrogen and phosphorus [J]. *Water and Wastewater Engineering* 28(9): 5—8 (in Chinese)

郝晓地,汪慧贞,钱易,等. 2002b. 欧洲城市污水处理新概念——可持续生物除磷脱氮技术(上) [J]. *给水排水*, 28(6): 6—11

Hao X D, Wang H Z, Qian Y, et al. 2002b. A new concept for wastewater treatment in cities in Europe——sustainable technology for removing phosphorus and nitrogen (first half section) [J]. *Water and Wastewater Engineering* 28(6): 6—11 (in Chinese)

郝晓地,汪慧贞,钱易,等. 2002c. 欧洲城市污水处理新概念——可持续生物除磷脱氮技术(下) [J]. *给水排水*, 28(7): 5—8

Hao X D, Wang H Z, Qian Y, et al. 2002c. A new concept for wastewater treatment in cities in Europe——sustainable technology for removing phosphorus and nitrogen (second half section) [J]. *Water and Wastewater Engineering* 28(7): 5—8 (in Chinese)

郝晓地,戴吉,胡沅胜,等. 2008a. C/P 比与磷回收对生物营养物去除系统影响的试验研究 [J]. *环境科学*, 29(11): 3098—3103

Hao X D, Dai J, Hu Y S, et al. 2008a. Experimental research of the influence of C/P on the BNR systems [J]. *Environmental Science* 29(11): 3098—3103 (in Chinese)

郝晓地,戴吉,秦建军,等. 2008b. 一种泥水分离装置 [P]. 中国,实用新型专利, ZL200720127680.9 2008-06-11

Hao X D, Dai J, Qin J J, et al. 2008. A device for separating sludge and water [P]. China new practicable patent ZL 2007 2 0127680.9 2008-06-11 (in Chinese)

郝晓地,戴吉,仇付国,等. 2009. 一种从污水生物处理过程中进行化学磷回收的方法 [P]. 中国,发明专利, 200710143257.2 2009-02-11

Hao X D, Dai J, Qiu F G, et al. 2009. A method for chemically reclaiming phosphorus from biological wastewater treatment process [P]. China invention patent 200710143257.2 Made public on 2009-02-11 (in Chinese)

郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 2007a. 采用 TUD 联合模型模拟倒置 A²/O 工艺的运行工况 [J]. *中国给水排水*, 23(5): 1—4

Hao X D, Song H W, Hu Y S, et al. 2007a. Simulate operation situation of reverse A²/O process with combined TUD model [J]. *China Water & Wastewater* 23(5): 1—4 (in Chinese)

郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 2007b. 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*, 23(13): 7—10

Hao X D, Song H W, Hu Y S, et al. 2007b. Method of wastewater characterization for COD [J]. *China Water & Wastewater* 23(13): 7—10 (in Chinese)

郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 2007c. 采用 TUD 模型动态模拟倒置 A²/O 工艺运行工况 [J]. *中国给水排水*, 23(16): 85—89

Hao X D, Song H W, Hu Y S, et al. 2007c. Dynamically modeling a reversed A²/O process with the TUD Model [J]. *China Water & Wastewater* 23(16): 85—89 (in Chinese)

郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 2007d. 数学模拟技术用于污水处理工艺的运行诊断与优化 [J]. *中国给水排水*, 23(14): 94—99

Hao X D, Song H W, Hu Y S, et al. 2007d. Application of modeling technique in trouble-shooting and operational optimization of WWTPs [J]. *China Water & Wastewater* 23(14): 94—99 (in Chinese)

Heinzmann B. 2004. Phosphorus recycling in treatment plants with biological phosphorus removal [C]. *International Conference Proceedings on Struvite: Its Role in Phosphorus Recovery and Reuse*

- 17—18 Cranfield University, U. K.
- Ishewood K F. 2000 Mineral fertilizer use and the environment [A]. International Fertilizer Industry Association United Nations Environment Programme [C]. Paris IFA/UNEP, 106
- Kuroda A, Takiguchi N, Gotanda T, *et al*. 2002 A simple method to release polyphosphate from activated sludge for phosphorus reuse and recycling [J]. *Biotechnol Bioeng* 78(2): 333—338
- Kuba T, Mumleiner E, van Loosdrecht M C M, *et al*. 1996 A metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms [J]. *Biotechnol Bioeng* 52(6): 685—695
- Mumleiner E, Kuba T, van Loosdrecht M C M, *et al*. 1997 An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal [J]. *Biotechnol Bioeng* 54(5): 434—450
- Novak J. 2007. Minimizing the sludge disposal volume by maximizing material/energy recovery [J]. *Water* 21(12): 29
- Reichert P. 1998 AQUASM 2.0-Computer Program for the Identification and Simulation of Aquatic Systems [M]. Switzerland: EAWAG, D bendorf
- Smolders G L F. 1995a A metabolic model of the biological phosphorus removal stoichiometry, kinetics and dynamic behaviour [D]. Delft the Netherlands Delft University of Technology
- Smolders G L F, van der Meij J, van Loosdrecht M C M, *et al*. 1995b Structured Metabolic model for anaerobic and aerobic stoichiometry and kinetics of the biological phosphorus removal process [J]. *Biotechnol Bioeng* 47(33): 277—287
- van Loosdrecht M C M, Brandse F A, de Vries A C. 1998 Upgrading of wastewater treatment processes for integrated nutrient removal—the BCFS⁵ process [J]. *Water Sci Technol* 37(9): 209—217
- van Rensburg P, Musvoto E V, Wentzel M C, *et al*. 2003 Modeling multiple mineral precipitation in anaerobic digester liquor [J]. *Water Res* 37(13): 3087—3097
- van Vekhuizen H M, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. 1993 Modeling biological phosphorus and nitrogen removal in a full scale activated sludge process [J]. *Water Res* 33(16): 3459—3468
- 王心芳, 魏复盛. 2002 水和废水监测分析方法 (第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 230
- Wang X F, Wei F S. 2002 Analytical and Monitoring Method for Water and Wastewater [M]. Beijing: Environmental Science Press of China 230 (in Chinese)