

数学模拟技术用于污水处理工艺的运行诊断与优化

郝晓地¹, 宋虹第^{1,2}, 胡沅胜¹, 郝二成³, 周 军³, 甘一萍³, 王洪臣³

(1. 北京建筑工程学院 可持续环境生物技术研发中心, 北京 100044; 2. 内蒙古工业大学
土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 北京城市排水集团有限公司, 北京 100063)

摘要: 采用 TUD 模型与 AQUASIM 模拟软件对某大型市政污水处理厂倒置 A²/O 工艺的运行问题进行诊断, 同时提出优化运行方案并进行了模拟预测。结果表明, 进水中的碳源特别是挥发性脂肪酸(VFA)不足和厌氧水力停留时间(HRT)太短是导致脱氮除磷效果不佳的主要原因。针对这两大问题, 提出了曝气池分区重组、外加碳源、总进水超越初沉池、UCT 改造以及结合磷回收等优化运行和工艺改造方案, 并通过模拟预测了各种改造方案可能出现的较好运行效果。

关键词: 污水处理; 倒置 A²/O 工艺; 数学模拟; 诊断问题; 运行优化; 挥发性脂肪酸; 厌氧水力停留时间

中图分类号: X703.1 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2007)14-0094-06

Application of Mathematic Simulation Technology to Trouble-shooting and Operational Optimization of Wastewater Treatment Processes

HAO Xiao-di¹, SONG Hong-wei^{1,2}, HU Yuan-sheng¹, HAO Er-cheng³,
ZHOU Jun³, GAN Yi-ping³, WANG Hong-chen³

(1. R & D Center for Sustainable Environmental Biotechnology, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Beijing Municipal Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100063, China)

Abstract: The operation problems of reversed A²/O process in a large municipal wastewater treatment plant were diagnosed using TUD model and AQUASIM simulation software, and the optimization schemes were proposed and simulated. The results show that lack of carbon source, especially VFA, in the influent and shorter anaerobic HRT are key factors to limit nutrient removal. Towards overcoming these two problems, some optimization measures were proposed and simulated, such as reconfiguration of aeration tanks, addition of external carbon source, bypassing the primary settler, reconstruction of UCT system and combination with phosphorus recovery. It was predicted by simulation that good operation results may occur by taking each proposed optimization measure.

Key words: wastewater treatment; reversed A²/O process; mathematic simulation; trouble-shooting; operation optimization; VFA; anaerobic HRT

基金项目: 北京市可持续水与废物循环利用技术“学术创新团队”项目(BJE10016200611); 北京市自然科学基金资助项目(8052011); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z320)

数学模拟技术并非为了模拟而模拟,更不是单纯为了展示拟合实测数据的技巧。拟合实测数据只是为使人们相信模拟的准确性和有效性。实际上,有效的模拟可以用于工艺方案比较与工艺设计、问题诊断与运行优化、试验定向与工程放大。数学模拟技术的这些作用目前在国际上越来越广泛地用于工艺研发、工艺设计和工艺运行^[1~4]。

对污水处理厂运行工况进行数学模拟的最终目的是为了诊断问题并优化运行。在对污水处理厂运行工况取得满意模拟效果的前提下,运用模拟技术诊断运行中存在的问题比传统经验方法或试验方式省时、省力,而且可以从理论上逐一弄清影响运行的关键因子。目前,在荷兰已有 100 多座污水处理厂实现了数学模拟诊断运行问题,并在此基础上对运行进行了优化^[1,2]。

早先的一些工作已实现了对北京某大型市政污水处理厂倒置 A²/O 工艺的数学模拟(静态与动态)^[5],而且总结出一套适合我国污水处理厂采用的水质特性化方法^[6]。在此基础上,针对该污水处理厂倒置 A²/O 工艺运行中存在的问题,采用数学模拟方法首先诊断问题症结,然后提出运行优化措施并通过数学模拟予以验证。

1 对运行状况的初步模拟评价

该污水处理厂倒置 A²/O 工艺对 BOD₅ 的去除率为 91.2%,SS 去除率为 90.2%,TN 去除率为 40%,TP 去除率为 40%。该工艺属于低负荷运行,对有机物的去除效果较好,但对 TN、TP 的去除率还未达到 50%。

利用在静态模拟时校正的工艺模型(TUD)在均值水量、水质情况下对此工艺做出初步分析评价:在倒置 A²/O 工艺系统中并没有发生反硝化除磷现象;在倒置 A²/O 工艺系统中,10~15℃是聚磷菌(PAOs)不被其他菌属抑制而富积生长的适宜温度;曝气池第三廊道中 DO 的最佳控制浓度应为 0.5 mg/L;强化生物除磷 PAOs 出现的最小污泥龄应为 8 d,而最佳的污泥龄不应小于 12 d;适宜的回流比(R)应控制在 60%左右;好氧区占曝气池的体积比(f_o)宜为 3/5~2/3; $S_s/(S_s+X_s)$ 为 0.5~0.7 时,出水 TP 浓度较低;易生物降解有机物(S_s)中的挥发性脂肪酸(VFA: S_A)越多对除磷越有利,需使 $S_A \geq 25$ mg/L。

2 工艺运行问题诊断

2.1 进水中 VFA 不足

通过初步模拟评价可知,污水中易生物降解 COD 浓度(S_s)尤其是其中 VFA 浓度(S_A)会显著影响生物除磷系统性能。在动态模拟分析中,再次证实了系统中 S_A 不足确实是制约除磷效果的主要因子。通过动态模拟[见图 1(a)]发现,由缺氧区进入厌氧区的 S_A 极低,不足 2 mg/L(与实测值 0~3 mg/L 相符),它与第二点进水(0.3 Q_{in})中的 VFA ($S_A = 13$ mg/L)混合后,进入厌氧区时的平均实际 S_A 也仅为 5.3 mg/L。

为进一步验证进水 VFA 浓度(S_A)对除磷效果的影响,模拟试验还采用了另一座污水厂的倒置 A²/O 工艺水质数据进行模拟预测[见图 1(b)、图 2],并与实际运行数据对比。图 1(b)显示,该污水厂由缺氧区进入厌氧区进水中 VFA 浓度(S_A)高达 50 mg/L 以上,再加上第二点进水中的 VFA,远远超过初步模拟评价中的最低值(25 mg/L)。显然,对照污水处理厂进水有机物含量不会成为生物除磷的限制性因子,这一推论可从图 2 中得到证实。图 2 显示,出水 TP 甚至可以达到 0.5 mg/L,与此同时出水 $NH_4^+-N \leq 5$ mg/L,也能达到一级 A 排放标准。

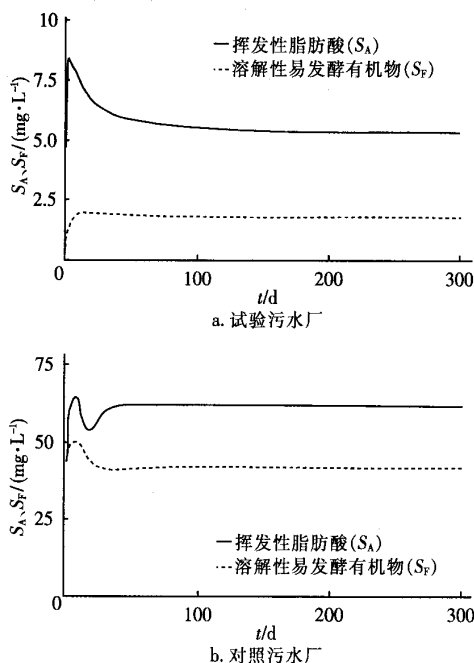


图 1 试验污水厂和对照污水厂缺氧区出水残余 VFA
Fig. 1 Residual VFA in effluent of anoxic section of test WWTP and control WWTP

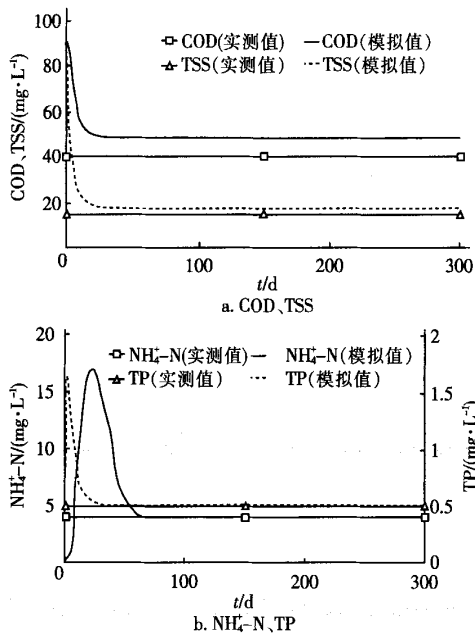


图 2 对照污水处理厂的模拟结果
Fig. 2 Simulation results in control WWTP

对照污水处理厂实际污水(总进水,无初沉池)的 COD 与 VFA 水质分析显示,进水 COD 为 400 ~ 600 mg/L,其中 VFA 占 10% ~ 20%,比试验污水处理厂进水 VFA(占 6.5%)要高得多。因此,碳源不足特别是 VFA 的缺乏是试验污水处理厂影响脱氮除磷效果的“瓶颈”。

2.2 厌氧水力停留时间(HRT)太短

促进 PAOs 过度吸磷的本质动力与厌氧区水力停留时间(HRT)和厌氧环境的厌氧程度(硝酸氮浓度的大小)有关^[3],在一定范围内厌氧环境的 HRT 越长,厌氧程度越充分,PAOs 的吸磷动力越强。VFA 来源有两个:进水本身含有,或者由兼性异养菌(HMOs)对溶解性易发酵有机物(S_F)进行水解而产生,但水解取决于厌氧 HRT 的长短。从总体上说,水解反应和发酵反应都是通过专性厌氧细菌进行的,同时由于专性厌氧细菌的生化效率很低,上述过程需要较长的 HRT。

Andrews 和 Pearson 曾利用溶解性有机污水和无机合成污水对厌氧发酵过程的 VFA 产生动力学规律进行了研究^[7]。结果表明,当 HRT = 2.5 d 时反应器内的 VFA 浓度最高。然而,实际除磷工艺的设计厌氧 HRT 往往低于 2.5 d,在本例试验污水处理厂厌氧区 HRT 仅为 45 min,显然如此低的厌氧

HRT 远不足以使水解和发酵充分进行。在自身进水 VFA 含量不足的情况下,PAOs 并不能间接获取更多的 VFA 用以生物除磷。综上所述,厌氧 HRT 也是影响脱氮除磷的主要因素之一。但究其根本,症结还在 VFA 缺乏上。

3 倒置 A²/O 工艺的运行优化模拟分析

3.1 曝气池分区重组方案

针对上述分析得到的厌氧 HRT 太短这一问题,结合初步分析评价中得到的最佳好氧区比例,将系统中原有缺氧、厌氧、好氧区体积比(V₁:V₂:V₃ = 1:1:7)调整为 V₁:V₂:V₃ = 1:2:6,目的是通过增大厌氧区体积来延长厌氧区 HRT,从而为间接获取更多 VFA 创造工艺条件。

结合初步分析评价中建议的运行参数(SRT = 8 d、DO = 0.5 mg/L、R = 60%),动态模拟曝气池分区重组后的运行工况,结果见图 3。图 3(a)显示,出水 NH₄⁺ - N 为 10 mg/L 左右,TP 为 1 mg/L 左右。此外,剩余污泥量也可明显减少[如图 3(b)所示]。

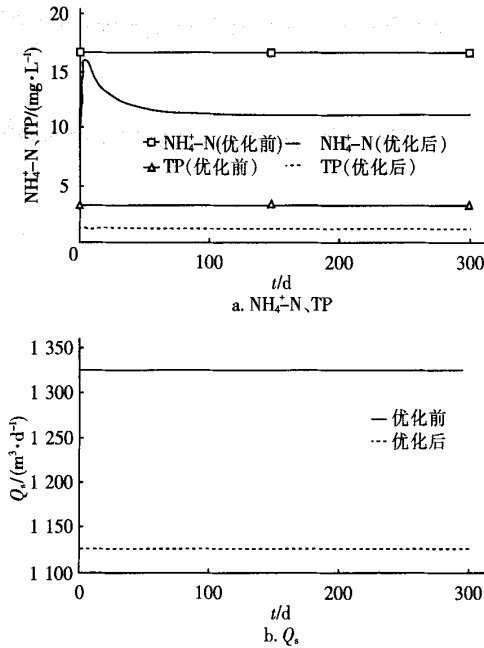


图 3 曝气池分区重组后模拟结果
Fig. 3 Simulation results after reconfiguration of aeration tanks

3.2 外加碳源方案

上述方案是间接增加系统中的 VFA,而最直接有效的解决办法莫过于向进水中投加碳源,如甲醇或短链脂肪酸(乙酸等)。根据初步分析评价中对

$S_s/(S_s + X_s)$ 分析得到的最佳控制范围 (0.5 ~ 0.7), 使现有系统进水 VFA 浓度 (S_A) 升至 25 mg/L 有利于脱氮除磷, 换算为投加甲醇量为 500 kg/d。此时, VFA 约占进水 COD 的 15%, 而 $S_s/(S_s + X_s)$ 为 0.63。模拟结果见图 4。可见, 投加碳源后的系统运行效果大为改善, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可降至 5 mg/L, TP 可达 1 mg/L 左右; 剩余污泥量也可减少约 300 m^3/d 。

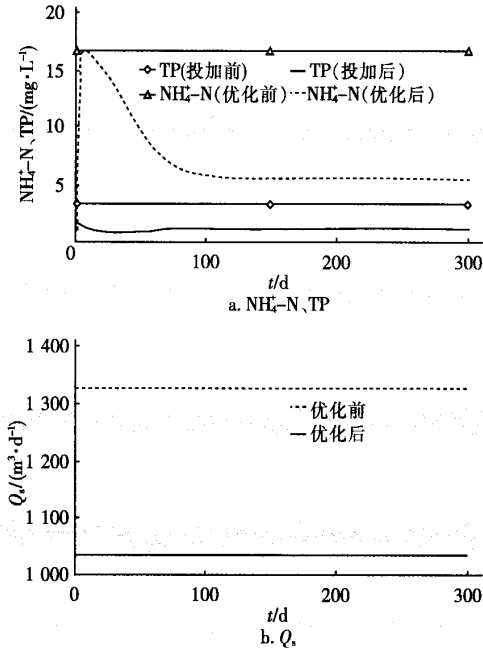


图 4 投加碳源后的模拟结果 (SRT = 8 d, $R = 60\%$)
Fig. 4 Simulation results with external carbon source (SRT = 8 d, $R = 60\%$)

3.3 总进水超越初沉池改造方案

另一种增加碳源或 VFA 的“自给自足”方案是使污水处理厂的总进水超越初沉池, 直接分点进入曝气池。这样, 可以提高系统中的 S_s 或 S_A 。总进水水质见表 1。经实际测定, 总进水中 VFA 为 25 ~ 35 mg/L 左右, 约占总进水 COD 的 10%。从理论上讲, 可以在一定程度上利用原水直接解决 VFA 不足的问题。

表 1 总进水水质
Tab. 1 Influent data $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

水质指标	COD	TN	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	TP	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	TSS
数值	353	49.1	33.3	0.49	5.94	3.83	324

采用建议的运行参数, 模拟试验结果见图 5, 采用超越改造方案后的出水水质明显好转, TN、 NH_4^+

-N 与 TP 都能达标, 而且出水 COD 及 TSS 也不会由于总进水负荷的增大而超标, 仍在系统所能承受的处理范围之内。

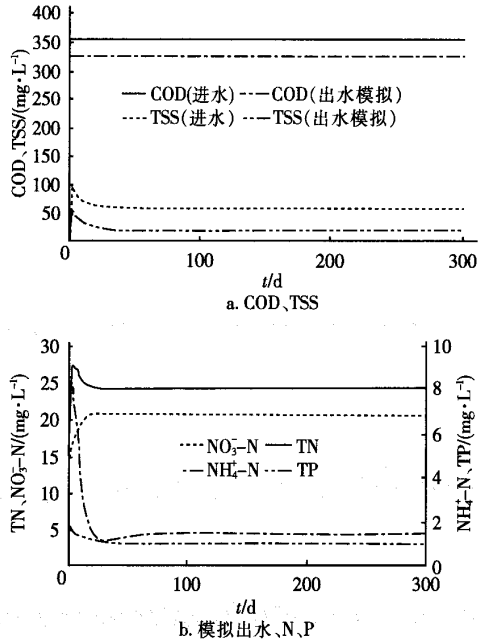
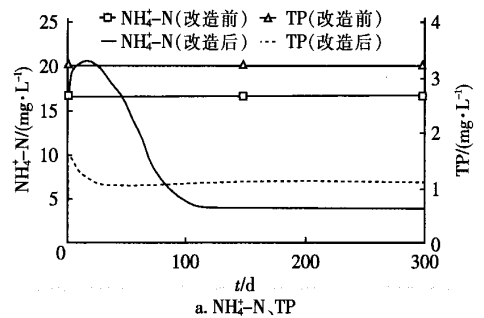


图 5 总进水超越初沉池后模拟结果
Fig. 5 Simulation results after bypassing primary settler

3.4 UCT 工艺改造方案

根据初步模拟评价, 倒置 A^2/O 工艺设计中忽略了反硝化除磷作用, 使原本可以合二为一的除磷与脱氮过程分裂, 以致完全对立起来。实际上, 在常规的 UCT 或 A^2/O 工艺中, 普遍存在着反硝化除磷作用。

如果不改变曝气池容积情况下将倒置 A^2/O 工艺改造为 UCT 工艺, 从理论上讲可利用 UCT 中的反硝化除磷作用节省碳源。模拟试验表明, 在取消 UCT 工艺中从好氧区至缺氧区的内回流后, 处理效果仍能得到较大改善 (见图 6)。



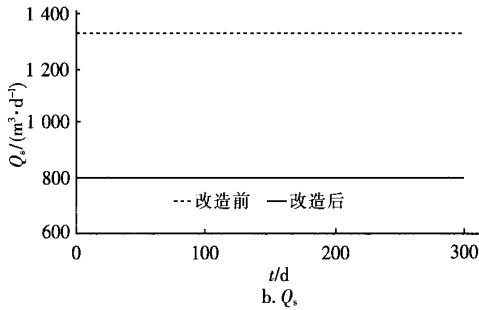


图 6 改造为 UCT 工艺后模拟结果($t_2=0$, $SRT=7\text{ d}$, $R=50\%$, $r_1=150\%$)

Fig. 6 Simulation results with a reformed UCT system

3.5 结合磷回收工艺改造

用化学除磷辅助生物除磷通常也是改进除磷效果的有效手段。传统做法是向进水或曝气池中投加 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等化学药剂,将进水中部分磷通过沉淀去除。然而,这种做法也存在着明显的弊端:①在进水中投加化学药剂将使初沉污泥的可生化性降低,影响其厌氧消化效果;②如果在曝气池中投加化学药剂势必导致一些 SRT 较长的细菌(如硝化菌和 PAOs)在曝气池中沉淀,从而影响这些细菌的数量;③对二沉池出水实施化学除磷(即所谓的深度处理),所需化学药剂投量大而除磷效果未必明显。因此,传统化学除磷辅助手段已逐渐被淘汰,代之以化学磷回收与生物除磷相结合的方式进行。

理论和实践均已表明,将化学除磷与生物除磷合二为一,能将两者的优点有机结合在一起,发挥各自的优势,达到优化出水水质的目的。由于全球磷资源的日益匮乏,化学除磷当今以磷回收的形式进行已渐成有目共睹的国际趋势。

倒置 A^2/O 工艺结合磷回收改造工艺方案如图 7 所示。

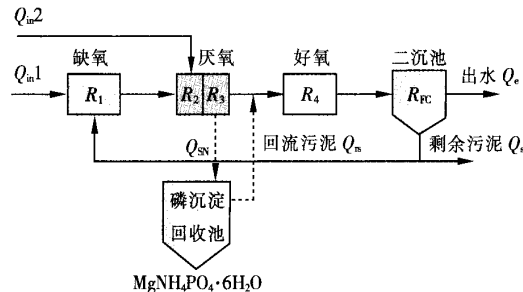


图 7 倒置 A^2/O 工艺结合磷回收改造工艺方案

Fig. 7 Reconstruction scheme of reversed A^2/O process in combination with phosphorus recovery

如图 7 所示,以现有倒置 A^2/O 脱氮除磷工艺为主要流程,在厌氧区 R_3 末端设置一挡板进行泥水分离,让分流上清液 Q_{SN} 进入化学沉淀池中,调节 pH 值或投加化学药剂(Mg^{2+} 盐)使磷化合物以沉淀形式(如鸟粪石 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 形式)析出。磷沉淀后的上清液再回到主流工艺,参与后续生物除磷作用。

根据郝晓地等人^[8]对 A^2/O 工艺结合磷回收的模拟试验研究结果,在生活污水(以地下水为主要水源的饮用水中就含有大量钙、镁离子)本身含有大量钙、镁离子情况下,只需投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 或 NaOH 将 pH 值调节到 9 以上即可实现磷回收;在侧流比(进入化学沉淀池的厌氧上清液 Q_{SN} 与进水 Q_{in} 的比值)为 20% 时,磷的总回收率为 34% (沉淀池内磷的沉淀效率为 95%),同时可节约生物除磷过程中 25% ~ 30% 的碳源,即相对增大了后续生物除磷的 COD/P 值。这与郝晓地等利用数学模拟技术得到的模拟试验结果基本一致^[9],在保证出水水质达标($\text{TP} \leq 1\text{ mg/L}$)的情况下,进水最小 COD/P(可生物降解 COD)值可由 20 降低到 10,此时的磷回收率为 36%。显然,这对于提高碳源不足的污水处理厂的生物除磷效果具有非常积极的作用。

利用模拟可以确定现有倒置 A^2/O 脱氮除磷工艺系统结合磷回收的最佳侧流比为 0.16,即从厌氧区上清液中分流出 16% 进入磷沉淀池时出水水质最佳(见图 8),此时磷的回收率为 25%。当侧流比大于此值时将增大磷回收的成本,而且除磷效果也将受到消极影响。

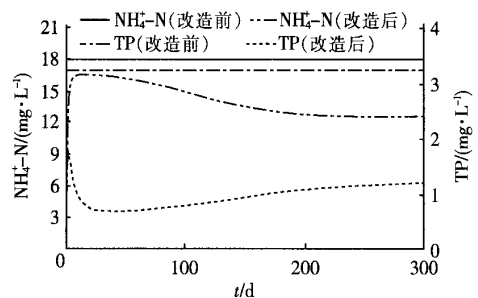


图 8 结合磷回收工艺模拟预测结果

Fig. 8 Simulation results in combination with phosphorus recovery

4 结语

通过模拟诊断,发现试验污水处理厂倒置 A^2/O 工艺运行中最主要的问题在于进水中可利用碳源

(VFA)不足,其次是厌氧区停留时间(HRT)太短。针对这两大问题,提出了相应的优化运行和改造方案,如曝气池分区重组、外加碳源、总进水超越初沉池、实施UCT改造以及结合磷回收的工艺改造方案等,并通过模拟预测了各种改造方案可能出现的较好运行效果。

参考文献:

- [1] 郝晓地,甘一萍,周军,等. 数学模拟技术在污水处理工艺设计、优化、研发中的应用(上)[J]. 给水排水, 2004,30(5):33-36.
- [2] Meijer S C F. Theoretical and practical aspects of modeling activated sludge processes [M]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2004.
- [3] 郝晓地. 可持续污水—废物处理技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
- [4] HAO Xiaodi. Model-based optimization of sustainable biological nutrient removal processes [M]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2001.

erlands: Delft University of Technology, 2001.

- [5] 郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 采用TUD模型及缺省参数模拟倒置A²/O工艺运行工况[J]. 中国给水排水, 2007,23(5):1-4.
- [6] 郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 数学模型应用中的关键步骤——污水水质(COD)特征化方法[J]. 中国给水排水, 2007,23(13):7-10.
- [7] Andrews J F, Pearson E A. Kinetics and characteristics of volatile acid production in anaerobic fermentation process [J]. J Air Water Pollut, 1965,9(7-8):439-461.
- [8] 郝晓地,戴吉,周军,等. 磷回收促进生物除磷作用试验验证[J]. 中国给水排水, 2006,22(17):22-25.
- [9] 郝晓地,戴吉, Mark van Loosdrecht. 采用数学模拟评价生物营养物去除工艺的除磷效果[J]. 中国给水排水, 2006,22(5):30-34.

电话:(010)68322128

E-mail: haoxiaodi@bucea. edu. cn

收稿日期:2007-03-21

环境技术方面的专业能力

德国帕萨旺—洛蒂格公司是继承传统经验和开发新技术的代表,其业务范围包括供水、垃圾处理、污水和污泥处理等方面。主要业务:在全球范围内提供城市污水处理的工程建设、技术开发和支持、设备成套集成与供货和技术服务,如承建市政和工业废水处理厂的“交钥匙”工程,承建污泥消化、沼气处理与利用的工程建设、技术开发和支持、设备成套集成与供货和技术服务,提供先进的曝气设备、污泥机械浓缩和脱水的技术、工程建设、设备成套集成和技术服务,以及污水的深度处理设备(如用于工业或基础设施方面的污水再生回用设施)。

德国帕萨旺—洛蒂格公司目前主营业务:

- ◇污泥消化系统
- ◇污水处理厂
- ◇污泥浓缩和脱水一体化设备
- ◇转筒式污泥浓缩机、带式压滤机
- ◇膜式盘状微孔曝气头
- ◇垃圾处理(厌氧发酵处理)
- ◇饮用水处理
- ◇工业用水处理
- ◇污泥热干化厂的设计,工程建设和全套设备的集成

帕萨旺—洛蒂格环保技术(杭州)有限公司目前主营业务:

- 污泥浓缩和脱水一体化设备
- 转筒式污泥浓缩机、带式压滤机
- 膜式盘状微孔曝气头
- 生物曝气系统

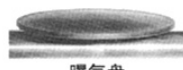
诚邀各地代理

帕萨旺—洛蒂格环保技术(杭州)有限公司
地址:杭州市滨江区环兴路8号
邮政编码:310053
电话:0571-86698098
传真:0571-86698066

德国帕萨旺—洛蒂格公司北京代表处
北京市朝阳门北大街8号富华大厦D6A室
邮政编码:100027
电话:010-65544020/22
传真:010-65544838



蛋形消化池



曝气盘



脱水机



德国威斯巴登污水处理厂



人与自然的技术

**PASSAVANT
ROEDIGER**
Envirotech(Hangzhou)Co.,Ltd.