



一种改进的 MSBR 工艺脱氮除磷性能的仿真模拟与试验研究

严晨敏¹, 张代钧^{1,2,*}, 唐 然³, 卢培利¹, 龙腾锐³

1. 重庆大学环境科学系, 重庆 400044

2. 重庆大学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 400044

3. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400044

摘要: 针对 6 池 MSBR 工艺除磷效果不佳和污泥上浮问题, 通过新增厌氧池、调整浓缩池位置对其进行改造, 提出了一个改进的 7 池 MSBR 工艺. 应用活性污泥 2 号模型(ASM 2)分别对两种工艺进行了仿真模拟, 结果表明, 改进工艺具有较好的脱氮除磷性能. 在此基础上对 7 池 MSBR 工艺开展了实验室试验, 试验结果显示, 新工艺对耗氧有机物(以 COD 值计)、 NH_4^+ -N、TP 的去除率分别为 94.2%、81.4% 和 88.7%, 脱氮除磷效率均高于有关文献报道的 6 池工艺. 新工艺妥善处理了脱氮除磷等各单元之间的关系, 因而强化了除磷脱氮能力. 试验结果与模型模拟结果基本吻合, 表明活性污泥模型对新工艺的开发具有一定的指导意义.

关键词: MSBR; 活性污泥模型; 除磷脱氮; 模拟

文章编号: 0253-2468(2005)03-0391-05 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

Mathematical simulation and lab-scale experimentation to an upgrading MSBR process for nitrogen and phosphorus removals

YAN Chenmin¹, ZHANG Daijun^{1,2,*}, TANG Ran³, LU Peili¹, LONG Tengrui³

1. Department of Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2. Key Lab. For the Exploitation of South-western Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, China

3. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: Being concerned on the shortages of the present 6-tank MSBR, such as the lower efficiency of phosphorus removal and sludge suspending, an upgrading 7-tank MSBR was set up through adding an anaerobic tank and adjusting the location of the concentration tank. The mathematical model and computer program based on ASM 2 were applied to simulated the 6-tank and 7-tank MSBR processes, and simulation results of two processes showed that 7-tank MSBR had higher removal efficiency for NH_4^+ -N and TP than 6-tank MSBR. Then, the lab experiments for 7-tank MSBR were carried out, and removal rate of, COD, nitrogen and phosphorus were achieved at 94.2%, 81.4% and 88.7%, respectively. The upgrading process could resolve the relations appropriately among different-function tanks. And as a result, the function for the nitrogen and phosphorus removals was enhanced. The results were primarily accorded to the model, which indicated the function of activated sludge model in the development of new processes.

Keywords: MSBR; ASM 2; biological nitrogen and phosphorus removals; simulation

MSBR 工艺(Modified Sequencing Batch Reactor)又称改良式序列间歇反应器,是由 C. Q. Yang 等人根据 SBR 技术特点,结合传统活性污泥法开发的一种连续进出水污水处理新工艺^[1]. MSBR 工艺可视为 A²/O 工艺和 SBR 系统的联合,具有脱氮除磷功能. SBR 系统在 MSBR 工艺中起着间歇交替运行、沉淀的作用. MSBR 工艺被认为是目前最新、集约化程度

最高的污水处理工艺,具有流程简单,控制灵活,单元操作简单以及节约用地等优点^[2]. 活性污泥 2 号模型(Activated Sludge Model No. 2, ASM2)由国际水协(International Water Association, IWA)于 1995 年推出,模型包括碳、氮的去除和生物、化学除磷等过程,能够较为全面的模拟活性污泥过程^[3]. ASM2 在形式和功能上都较以前的模型有了较大突破,有效指导

了活性污泥新工艺的开发、污水处理厂的设计、改造和运行管理^[4]。文献^[5]提出的6池MSBR系统(图1-a)能够高效地去除城市污水中的有机污染物和营养盐,并且可以通过污水分流加强个别功能。但在实际工作中发现现有的设计和运行存在一些问题:一是6池MSBR系统的浓缩池位于缺氧池之后,由于反硝化产生的 N_2 会黏附在污泥上,引起污泥上浮,导致污泥的浓缩性能下降,丧失了设置浓缩池的意义,整个工艺的脱氮除磷性能也受到影

响;二是出水 NH_4^+-N 浓度一般能达标,但TP不易达标。为此,我们作出2个改进(图1-b):(1)将中间沉淀区调整到缺氧池之前,先将回流混合液沉淀分离,浓缩后的污泥再回流到缺氧池进行反硝化,上清液回流到主曝气池;(2)增设一个厌氧池,促使聚磷菌充分释磷,从而保证聚磷菌在好氧条件下的过量吸磷能力。本文首先利用ASM2对6池和7池MSBR工艺进行了模拟,在此基础上开展了7池MSBR的实验室试验研究。

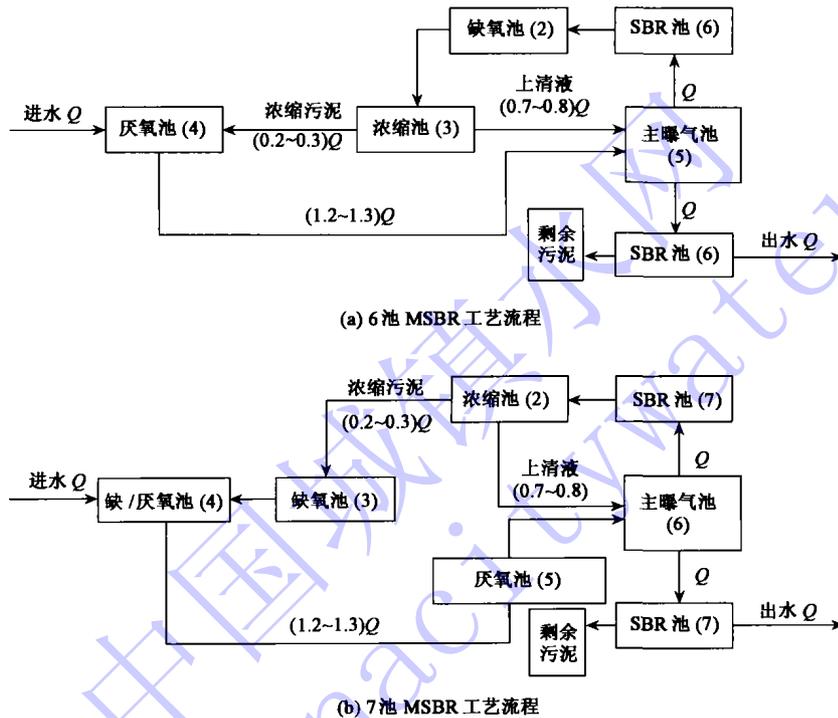


图1 6池和7池MSBR系统图

Fig. 1 The system map of 6-tank and 7-tank process of MSBR

1 6池和7池MSBR系统的模拟

本文应用ASM 2对6池和7池MSBR系统分别建模,然后在相同的工况条件下进行模拟。模拟程序开发及参数校核等工作方法详见参考文献[6~8]。模拟得到的污染物去除率见表1。

表1 两种工艺对污染物去除效率的模拟结果

Table 1 The Simulation result of the removal efficiency of two processes

方案	COD _{Cr}	TP	NH ₄ ⁺ -N	TKN
a(6-tank)	89.6%	75.4%	82.5%	63.4%
b(7-tank)	93.7%	88.6%	81.7%	67.2%

方案b的TP和耗氧有机物去除率(以COD_{Cr}值计)均明显高于方案a,可以认为是由于b系统中增

设了厌氧池使聚磷菌生物释磷更加充分的原因。 NH_4^+-N 的去除率变化不大。表面上看浓缩池的位置改变并未对处理结果产生积极影响,但浓缩池位置的改变是解决反硝化产生的 N_2 粘附在污泥上引起的污泥上浮问题,而ASM 2却无法模拟这一物理现象,因此不能就此得出浓缩池位置对处理结果没有影响的结论,这一点需在实验室试验中验证。

2 7池MSBR试验

2.1 材料与工况

合成废水($W(C):W(N):W(P)=100:5:1$,碳源为葡萄糖,氮源为 NH_4HCO_3 ,磷源为 KH_2PO_4)经污水泵从污水槽打入高位槽,再从高位槽经流量计计量后进入缺/厌氧池与来自缺氧池的反硝化回流污泥

混合,然后依次流入厌氧池和主曝气池.主曝气池的出水分为2部分:当SBR I池充当沉淀池时,部分出水流入SBR I池沉淀,另一部分流入SBR II池进行曝气、搅拌和预沉,出水流入浓缩池.反之类似.矩形反应器容积为 0.065 m^3 ,内部分隔成7个处理单元.

取某污水处理厂脱水污泥进行培养和驯化,配水按20%比例逐渐提高.用温度控制仪控制水温,其可控温度范围为 $16\sim 32\text{ }^\circ\text{C}$;人工控制反应的pH值.试验工况为:pH = $7\sim 8$,SRT = 15 d,缺/厌氧池HRT = 60 min,厌氧池HRT = 30 min,主曝气池HRT = 90 min,序批池HRT = 120 min(其中搅拌40 min,曝气50 min,预沉30 min),浓缩池HRT = 60 min,缺氧池

HRT = 100 min.试验在该条件下稳态运行1个月.

2.2 分析方法

COD_{Cr}:重铬酸盐法(GB11914-89);BOD₅:GB7488-87方法;NH₄⁺-N:纳氏试剂比色法(GB7479-87);NO₂⁻-N:N-1萘基-乙二胺比色法;NO₃⁻-N:麝香草酚分光光度法;DO:SJG203型溶解氧分析仪.

2.3 试验结果

7池MSBR工艺试验中耗氧有机物(以COD_C值计)、NH₄⁺-N和总磷的进出水浓度和去除效率以及文献^[5]列出的6池工艺的试验结果见表2,各污染物浓度变化曲线见图2~图5.

表2 7池和6池MSBR试验结果对比

Table 2 The comparison of the experimental results between 7-tank and 6-tank MSBR

	COD			NH ₄ ⁺ -N			TP		
	进水/(mg·L ⁻¹)	出水/(mg·L ⁻¹)	去除率	进水/(mg·L ⁻¹)	出水/(mg·L ⁻¹)	去除率	进水/(mg·L ⁻¹)	出水/(mg·L ⁻¹)	去除率
7池工艺	402.3	23.1	94.3%	32.2	6.2	81.0%	6.2	0.7	88.7%
6池工艺 ^[5]						73.2%			80.9%

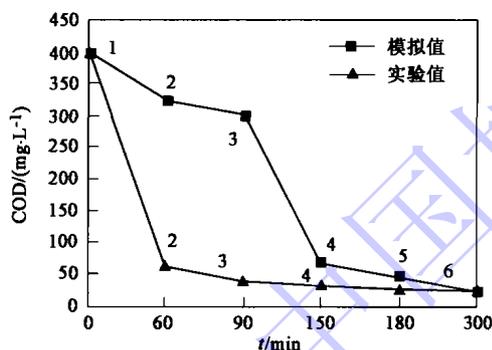


图2 COD_{Cr}随时间的变化(1.进水;2.缺/厌氧60 min;3.厌氧30 min;4.好氧60 min;5.好氧90 min;6.出水)

Fig.2 The variation of COD concentration against time(1. influent, 2. anoxic/anaerobic 60 min, 3. anaerobic 30 min, 4. aerobic 60 min, 5. aerobic 90 min, 6. effluent)

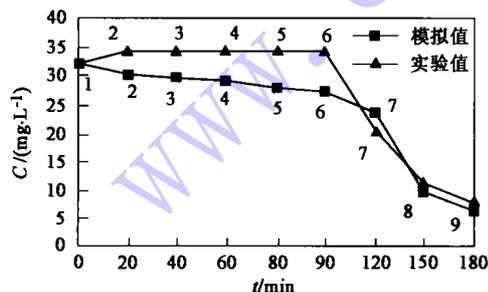


图3 NH₄⁺-N浓度随时间的变化(1.进水;2.缺/厌氧20 min;3.缺/厌氧40 min;4.缺/厌氧60 min;5.厌氧20 min;6.厌氧30 min;7.好氧30 min;8.好氧60 min;9.好氧90 min)

Fig.3 The variation of NH₄⁺-N concentration against time(1. influent, 2. anoxic/anaerobic 20 min, 3. anoxic/anaerobic 40 min, 4. anoxic/anaerobic 60 min, 5. anaerobic 20 min, 6. anaerobic 30 min, 7. aerobic 30 min, 8. aerobic 60 min, 9. aerobic 90 min)

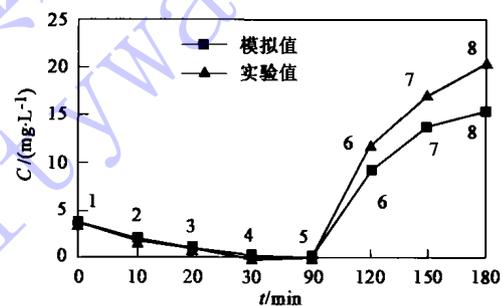


图4 NO₃⁻-N浓度随时间的变化(1.进水;2.缺/厌氧10 min;3.缺/厌氧20 min;4.缺/厌氧30 min;5.厌氧30 min;6.好氧30 min;7.好氧60 min;8.好氧90 min)

Fig.4 The variation of NO₃⁻-N concentration against time(1. influent, 2. anoxic/anaerobic 10 min, 3. anoxic/anaerobic 20 min, 4. anoxic/anaerobic 30 min, 5. anaerobic 30 min, 6. aerobic 30 min, 7. aerobic 60 min, 8. aerobic 90 min)

3 讨论

3.1 耗氧有机物(以COD_C值计)去除效果

从试验测得的耗氧有机物(以COD_C值计)降解曲线(图2)可以看出,缺/厌氧池对去除耗氧有机物(以COD_C值计)的贡献最大,有84.5%的有机物在此阶段被去除,在接下来的厌氧池、主曝池和序批池中,有机物浓度持续稳定下降.出水耗氧有机物浓度(以COD_C值计)为 $23.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为94.3%.

对比模拟结果和试验结果(图2)发现,两条降解过程曲线存在较大差别.具体表现在缺/厌氧池部分的有机物去除率的巨大差异,模拟结果为

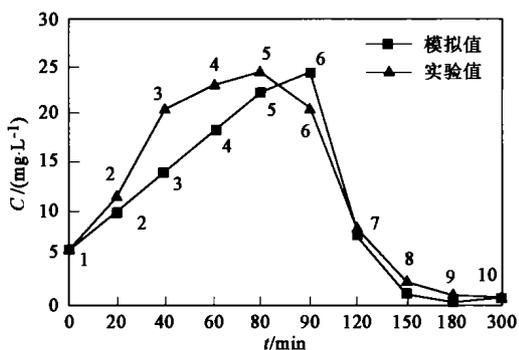


图5 磷组分浓度随时间的变化(1.进水;2.缺/厌氧30 min;3.缺/厌氧40 min;4.缺/厌氧60 min;5.厌氧20 min;6.厌氧30 min;7.好氧30 min;8.好氧60 min;9.好氧90 min;10.出水)

Fig.5 The variation of phosphorus concentration against time(1. influent, 2. anoxic/anaerobic 30min, 3. anoxic/anaerobic 40min, 4. anoxic/anaerobic 60min, 5. anaerobic 20min, 6. anaerobic 30min, 7. aerobic 30min, 8. aerobic 60min, 9. aerobic 90min, 10. effluent)

19.8%, 试验结果为 84.5%。造成这种差异的原因是试验中测得的有机物的快速去除是由于活性污泥的吸附作用导致其从水相转移到污泥相,并非真正被微生物降解,而模型模拟的是有机物的生物降解过程,不能描述这种快速吸附作用。在厌氧池部分,模拟计算的耗氧有机物去除量(以 COD_{Cr} 值计)为 $18.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占有机物总量的比例与试验值基本吻合。模型计算出的序批池出水耗氧有机物浓度(以 COD_{Cr} 值计)为 $25.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 93.7%, 与试验结果基本一致。试验与模拟结果均表明,改进的 MSBR 工艺去除耗氧有机物(以 COD_{Cr} 值计)的能力强,去除率高,出水水质稳定。

3.2 脱氮效果

7 池 MSBR 工艺的曝气池中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度迅速下降,发生了明显的硝化反应(图 3)。与其它工艺相比,该工艺硝化时间短($< 3 \sim 4 \text{ h}$),硝化效果好(硝化率达 77%)。这是由于工艺流程的安排让硝化菌有良好的生活环境,成为主曝池中的优势菌群。MSBR 回流量小,原水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进入主曝池未被大量稀释;同时序批池的良好沉淀效果使得主曝池的污泥量大,生物量多,这两个因素保证了硝化菌以较高的速率进行硝化反应。

反硝化后的污泥流入缺/厌氧池与进水混和后,污泥中残存的少量 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在厌氧环境下耗用进水中的有机碳发生反硝化,使得 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度下降。缺/厌氧 20 min 时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 降为 0。曝气阶段, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 硝

化使得曝气池中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度大幅度上升,至曝气阶段结束,污水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度达到 $20.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (见图 4)。

在厌氧池和厌氧/缺氧池阶段,模拟和实测的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化曲线明显不同(图 3): 试验值保持不变,而模拟值呈现一个缓慢下降的过程,说明在模拟计算时这两个阶段有 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被消耗。实质上,异养菌的缺氧生长等过程消耗 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 同时,异养菌(菌体)的水解(或内源呼吸)等过程会增加 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的量,试验中各种因素的综合作用导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度基本不变。在模拟过程中,由于缺乏充分的试验设备测得污泥中的各种菌种的准确生物量和生长衰减系数等,所以模型中部分微生物组分浓度与参数采用了国际水协推荐的经验数值,这不可避免地造成了模型模拟与试验值的偏差。图 4 中好氧阶段 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 模拟值与试验值的较大差异同样是由于这个原因。

3.3 除磷效果

7 池 MSBR 工艺中,缺/厌氧池释磷现象明显,40 min 时释磷速率最大。磷的快速吸收发生在曝气 30 min 后,随后吸磷速率减慢。最终出水磷浓度为 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明改进的工艺具有较好的除磷效果。这是因为该工艺优先设置了厌氧池,厌氧池成为聚磷菌的‘生物选择器’,保证了聚磷菌成为优势菌种,同时能够控制丝状菌的生长。

对比模型模拟值与试验值,数据基本吻合。不同之处在于:一是试验在厌氧后期出现了吸磷现象,而模拟计算磷的释放一直持续到厌氧的结束,二是模拟计算中磷的释放速率变化不大。前者可能是由于来自缺/厌氧池的进水中含有少量硝态氮(图 4)导致在厌氧池中发生了反硝化除磷^[9,10]。而 ASM2 模型假定聚磷菌 PAOs 不具备反硝化能力,这一假定影响了模型对厌氧段的模拟^[3]。后者一方面与计算中采用的 IWA 推荐经验参数有关,另一方面在试验中随着环境的不断变化,聚磷菌的各项指标包括反应速率也在不断改变。

4 结论

1) 针对 6 池 MSBR 除磷效率不佳等问题,提出了通过新增厌氧池、调整浓缩池位置把 6 池改造为 7 池 MSBR 工艺的设想。利用 ASM No.2 对设想的工艺进行计算机模拟,结果表明能够改善 6 池工艺的脱氮除磷性能。在此基础上开展了实验室试验。试验结果表明,7 池工艺对有机碳的去除率为 94.2%, 对



磷的去除率为 88.7%，对氨氮的去除率为 81.4%，脱氮除磷效率较 6 池工艺均有明显提高。

2) 本研究表明活性污泥模型对新工艺开发具有一定的指导意义，但模型中部分参数的不能准确确定导致模型仿真计算结果与试验结果存在一定的误差。ASM NO.2 模型在污泥吸附去除有机物、聚磷菌反硝化等反应过程模拟上的不足，使模型的应用受到一定的限制。

通讯作者简介:张代钧(1963—),男,教授,博士生导师.重庆大学环境科学系主任.E-mail: dzhang@cqu.edu.cn.

参考文献(References):

[1] Ng Wun-jern. Sequencing batch reactor treatment of wastewaters [J]. Environmental Sanitation Reviews, 1989,28(9):59—62

[2] Luo W S. New Technology for Wastewater Treatment-MSBR [J]. China water & wastewater, 1999, 15(6): 22—24(in Chinese)

[3] IWA Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment (Translated into Chinese by Yalei ZHANG and Yongmei LI). Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3 [M]. London: IWA Publishing, 2000, Shanghai: Press of Tongji University, 2002(in Chinese)

[4] Wu J Q, Wang H Z. Brief on ASM2 [J]. water & wastewater engineering, 24(6): 13—18(in Chinese)

[5] Li C J, Gu G W, Yang H Z. Experimental Study on Improving Nitrogen Removal Efficiencies with Modified Sequencing Batch Reactor [J]. China Water & wastewater, 2001, 17(1): 9—14(in Chinese)

[6] Lu P L, Zhang D J, Yan C M, et al. Calibration of Parameters in Application of IWA Activated Sludge Models [J]. Environmental Science and Technology, 2002,25(5):13—14(in Chinese)

[7] Zhang D J, Ly P L, Chen D Q, et al. Modeling COD and N removal

upgrading in the activated sludge process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002,22(4): 448—453(in Chinese)

[8] Zhang D J, Lu P L, Yan C M, et al. Application of ASM No. 2 to the study of upgrading WWTP for biological nitrogen and phosphorus removals [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003,23(3): 332—337(in Chinese)

[9] Zou H, Ruan W Q, Chen J. The Role of Nitrate in the Removal of Nitrogen and Phosphate [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2002,21(1): 10—14(in Chinese)

[10] Zou H, Ruan W Q, Chen J. Study of Using Nitrate as Electron Acceptor in Biological Phosphorus Removal [J]. Research of Environmental Sciences, 2002,15(3): 38—41(in Chinese)

附中文参考文献:

[2] 罗万申. 新型污水处理工艺 - MSBR [J]. 中国给水排水, 1999, 15(6): 22—24

[3] 国际水协废水生物处理设计与运行数学模型课题组(张亚雷, 李泳梅译). 活性污泥数学模型(London: IWA Publishing, 2000) [M]., 上海: 同济大学出版社, 2002

[4] 吴俊奇, 汪慧贞. 活性污泥法 2 号模型(ASM2)简介[J]. 给水排水, 1998, 24(6): 13—18

[5] 李春鞠, 顾国维, 杨海真. 改善 MSBR 系统脱氮效果的试验研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17(1): 9—14

[6] 卢培利, 张代钧, 严晨敏, 等. 活性污泥法动力学模型应用中的参数校核[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(5): 13—14

[7] 张代钧, 卢培利, 陈丹琴, 等. 传统活性泥法 COD 去除及脱氮改造的模拟[J]. 环境科学学报, 2002,22(4):448—453

[8] 张代钧, 卢培利, 严晨敏, 等. 活性污泥 2 号模型用于城市污水处理厂脱氮除磷改造的研究 [J]. 环境科学学报, 2003, 23(3): 332—337

[9] 邹 华, 阮文权, 陈 坚. 硝酸盐在除磷脱氮中的作用 [J]. 食品与生物技术, 2002,21(1):10—14

[10] 邹 华, 阮文权, 陈 坚. 硝酸盐作为生物除磷电子受体的研究 [J]. 环境科学研究, 2002,15(3):38—41

WWW.CHIACITYWATER.ORG