

低溶解氧控制状态下污泥减量系统除磷脱氮特性

胡学斌¹, 柴宏祥¹, 韩万玉^{1,2}, 吉芳英¹, 龙腾锐¹

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 杭州 310014)

摘要:通过控制曝气量的方式研究了溶解氧对污泥减量系统除磷脱氮过程的影响。发现在低剂量2,4,5-三氯苯酚(TCP)作用下,活性污泥的内源 SOUR 值增加,SBR系统的低 DO 状态持续时间增长,周期平均 DO 降低,形成了有利于同时硝化反硝化 SND 脱氮的低 DO 环境。综合考虑 TCP 浓度对污泥减量、除磷脱氮和污泥性能的影响,TCP 浓度建议为 2 mg/L,SBR 周期平均 DO 值控制为 2 mg/L。与对照系统相比,2 mg/LTCP 污泥减量系统的曝气量增加了 23%,剩余污泥排放量减少 34.6%,出水水质与对照系统相当,实现了达标排放。表明低 DO 控制状态下、辅以排富磷污水除磷方式,TCP 系统可以同时获得优异的除磷脱氮和污泥减量效果。

关键词:污泥减量;溶解氧;化学解偶联;除磷脱氮;污水处理;SOUR

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)05-0112-05

Performance of A Sludge Reduction System on Removal of Nitrogen and Phosphorous Controlled by Low Dissolved Oxygen

HU Xue-bin¹, CHAI Hong-xiang¹, HAN Wan-yu^{1,2}, JI Fang-ying¹, LONG Teng-rui¹

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, P. R. China)

Abstract: The influences of dissolved oxygen (DO) on the removal process of nitrogen and phosphorous in a sludge reduction system had been studied by controlling aeration amounts. It was found that under the conditions of low doses of 2,4,5-trichlorophenol (TCP), endogenous sour values of activated sludge increased with the extension of low DO state duration in SBR system and the decrease of cyclic average DO, which led to a low DO environment favored the formation of simultaneous nitrification and denitrification (SND). TCP concentration was recommended as 2mg / L and cyclic average DO value in SBR system was kept at 2mg / L based on the impacts of TCP concentration on sludge reduction, removal of nitrogen and phosphorous and sludge performance. Compared with the control system, aeration amounts increased by 23% and the discharge of excess sludge decreased by 34.6%. The water quality in effluents was equivalent in the aeration sludge reduction system with 2mg/LTCP, which met the discharge standards. Therefore, it was indicated that the removal of nitrogen and phosphorous and sludge reduction can obtain excellent performance in TCP system under low DO state with removing Phosphorous-rich sewage.

Key words: sludge reduction; dissolved oxygen; chemical uncoupling; removal of nitrogen and phosphorous; sewage treatment; SOUR

收稿日期:2009-06-15

基金项目:国家水体污染与治理重大科技专项(2008ZX07315);重庆市重大科技专项(CSTC,2008AB7133)

作者简介:胡学斌(1964-),男,副教授,博士生,主要从事水污染控制理论和技术研究,(E-mail)xbhu@cqu.edu.cn.

近年来,剩余污泥减量化技术的研究已成为全球范围内的研发热点^[1-2],在剩余污泥难以处理处置的情况下,研究并开发剩余污泥产生量少的污水处理技术就显得尤为重要。

现有研究表明,向污水处理系统投加某些化学物质可以抑制细胞的氧化磷酸化过程,使分解代谢产生的能量大部分转变成热量,而不转换为合成代谢所必须的ATP,从而抑制合成代谢,减少剩余污泥的产生量^[3-7]。显然,污泥减量系统需要更多的氧去氧化未能转化成污泥的有机物,Skulachev也发现在污泥减量系统中氧的需求量已从8 mgDO/mgVSS/d升高到20 mgDO/mgVSS/d^[8],现有研究也常将污泥减量系统的DO控制在较高水平,有时大于5 mg/L^[9-10]。同时发现,在污泥减量系统中营养物质的去除效果有一定程度的下降^[11-12]。在综合分析化学解耦联污泥减量系统研究成果的基础上^[13-16],笔者认为,高DO运行方式不仅增加了污水处理系统的能耗,同时也加速了生物物质的氧化,而后者是导致污水处理效果变差的主要原因。为此,该研究以2,4,5-三氯苯酚(TCP)作为化学解耦联剂,通过控制曝气量的方式研究了溶解氧对污泥减量系统除磷脱氮过程的影响,期望在较低DO浓度状态下获得优异污泥减量和污水处理效果。

1 试验方法

1.1 实验方法

1.1.1 化学解耦联剂(TCP)最适用量优选实验

采用单因素批次实验考察TCP用量对生物除磷脱氮系统的影响。实验时用LZB-6型转子流量计控制曝气量,研究TCP浓度对DO变化过程、生物脱氮过程、生物除磷过程的影响。实验污泥来自实验室稳定运行的SBR反应器(SRT为25 d),按照充水比为0.5的方式配水,污泥浓度控制在3 g/L左右。然后将上述混合液均匀地分装在批次实验的10 L反应器中。

1.1.2 TCP对除磷脱氮和污泥减量效果的影响实验 在上述单因素实验结果基础上,采用连续运行方式进一步研究2 mg/L TCP对SBR工艺除磷脱氮效果和污泥减量效果的影响。本阶段设有2个SBR反应器,一个为对照系统,另一个为TCP减量系统,有效容积均为10 L。运行方式:厌氧2 h、好氧曝气8 h、沉淀排水闲置2 h。试验中,曝气、搅拌及沉淀排水等过程通过微电脑定时控制器进行自动切换,用LZB-6型转子流量计控制曝气量为0.09 m³/h。研究期间SBR反应器的充水比为0.5,通过排泥控制2个反应器的污泥浓度MLSS为3 g/L。

为了缓解污泥减量系统剩余污泥排放量少、排泥除磷能力下降的矛盾,该研究根据SBR系统实际排泥除磷能力再辅以排厌氧富磷污水除磷的方法^[17-18]来保证除磷效果。

1.2 实验污水

以校园生活污水作为试验研究用水,根据实验的需要添加奶粉、淀粉、葡萄糖、豆粉、磷酸二氢钠、氯化铵等使污水具有中等浓度城市污水水质特征。实验期间水质见表1:

表1 试验污水水质 mg/L

水质指标	COD	NH ₃ -N	TN	TP	pH*	碱度*
浓度范围	343~874	21.6~61.2	31~68.7	2.66~9.85	7~8	150~350
平均值	648	36.6	44.66	5.58	/	/

*:pH无量纲,碱度以CaCO₃计。

1.3 主要试剂及测试方法

主要试剂:2,4,5-三氯苯酚(A. R., Cl₃C₆H₂OH,分子量197.45)。

主要仪器和测试方法:DO采用美国HACH HQ10型溶解氧测定仪进行测定,COD采用HACH-COD测定仪测定,NH₃-N采用纳氏试剂分光光度法、TN采用日立U3010紫外可见光度计测定,活性污泥耗氧呼吸速率SOUR采用电化学探头法测定^[19]。

2 试验结果与讨论

2.1 单因素影响实验结果

2.1.1 TCP浓度对DO变化过程的影响 按照1.1.1实验方法调配反应液,均匀地分装在12个10L的反应器中。其中,6个反应器为一组,共2组,分别为对照系统和TCP系统。TCP系统投加了化学解耦联剂TCP,浓度为2 mg/L。然后用气体流量计精确控制每组6个反应器的曝气量分别为0.06、0.07、0.08、0.09、0.10、0.11(m³/h)。对照系统和TCP系统的DO逐时变化过程分别见图1和图2。

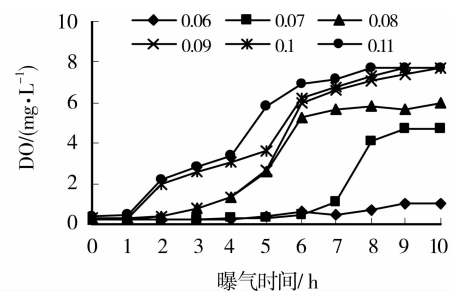


图1 对照系统DO逐时变化过程

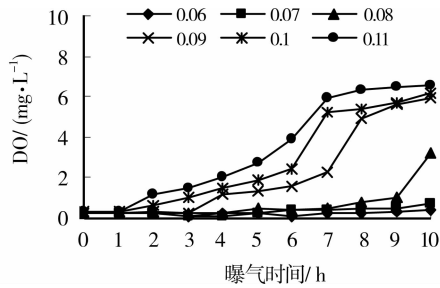


图 2 TCP 系统 DO 逐时变化过程

对比图 1 和图 2 发现:1)曝气时间越长,反应系统的 DO 越高;曝气时间相同时,曝气量越大,DO 越高。2)无论曝气量高低,2 个系统在曝气初期都具有较低的 DO。相对而言,TCP 系统的低 DO 状态持续的时间更长一些。例如在曝气量为 $0.09 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,TCP 减量系统 DO 维持在 1.0 mg/L 以下的时间为 4.5 h ,而对照系统仅维持了 3.4 h ,这一现象预示着 TCP 系统可能具有获得良好 SND 脱氮效果的潜能。3)在曝气量相同的条件下,TCP 系统具有更低的 DO,包括平衡 DO 浓度。采用数值积分的方法,分别计算不同曝气量状态下 2 组反应器的周期平均 DO,结果见图 3。

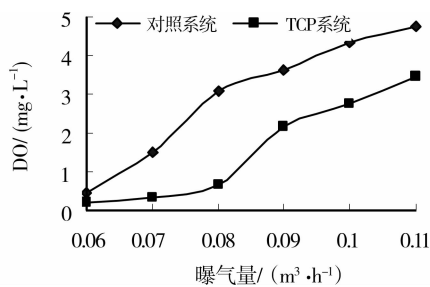


图 3 曝气量与周期平均 DO 的关系

从图 3 可以清楚地看出:在曝气量相同的条件下,TCP 系统的周期平均 DO 明显低于对照系统,说明 TCP 的加入造成了氧的过分消耗。结合 DO 逐时变化过程曲线,按照周期平均 DO 为 2 mg/L 进行控制,TCP 系统较为理想的曝气量为 $0.09 \text{ m}^3/\text{h}$,比对照系统理想曝气量 $0.073 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加了 23% 。

2.1.2 TCP 投加量对硝化及 SND 脱氮过程的影响 按照 1.1.1 实验方法调配反应液,均匀地分装在 4 个 10 L 的反应器中。然后在 4 个反应器中分别加入一定量的化学解偶联剂 TCP,使得 TCP 浓度分别为 $0, 2, 5$ 和 8 mg/L 。然后在曝气量为 $0.09 \text{ m}^3/\text{h}$ 的情况下曝气 8 h ,逐时测定曝气阶段反应系统的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 浓度,结果见图 4、图 5。

试验结果表明,在实验条件包括曝气量均相同的情况下,氨和总氮的转化速度均随 TCP 浓度增加而降低。但是,当 TCP 浓度控制在 2 mg/L 时,氨氮

和总氮的转化过程与对照组差异不大,经过 8 h 曝气后,反应液中 $\text{NH}_3\text{-N} < 8 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} < 20 \text{ mg/L}$,可以实现达标排放。

值得注意的是,这里所讨论的总氮下降均出现在曝气阶段。其中,对照系统下降率为 60.4% 、 2 mg/L TCP 系统下降率为 53.2% 。进一步分析图 5 发现,曝气阶段的前 5 h 和 6 h 分别是这两个系统总氮浓度下降最快的时期,对照图 1 和图 2 可知,此时它们均处于低 DO。这种情况说明,在控制曝气量的条件下,系统发生的是同时硝化反硝化的 SND 脱氮过程。

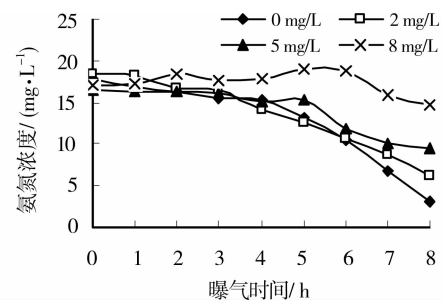


图 4 TCP 浓度对氨氮变化过程的影响

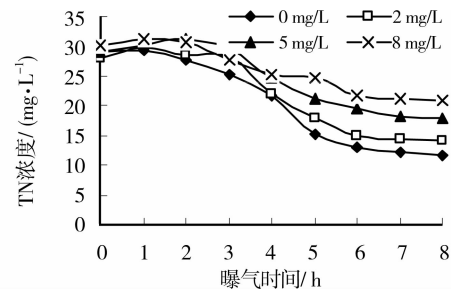


图 5 TCP 浓度对总氮变化过程的影响

2.1.3 TCP 投加量对释磷吸磷过程的影响 在 5 个 10 L 的反应器中,控制 TCP 浓度分别为 $0, 2, 4, 6$ 和 30 mg/L ,按照厌氧 2 h 、好氧曝气 8 h 方式运行,厌氧释磷和好氧过量吸磷情况见图 6。

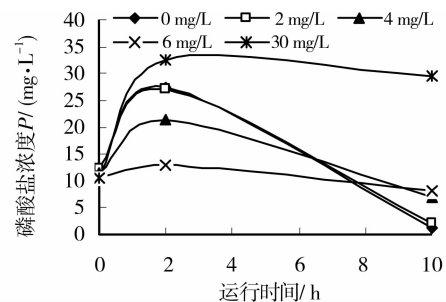


图 6 TCP 浓度对释磷吸磷过程的影响

从图 6 可以看出,当 TCP 浓度控制 6 mg/L 以下时,污水处理系统依然呈现厌氧释磷、好氧过量吸磷现象,但厌氧释磷和好氧过量吸磷程度随 TCP 浓

度的增加而下降;当 TCP 浓度为 30 mg/L 时,该系统厌氧释磷量明显增加,但好氧阶段已基本不存在磷的吸收,可认为此时的生物除磷系统已崩溃。值得注意的是,当 TCP 浓度低至 2 mg/L 时,生物除磷系统的释磷吸磷过程、以及释磷吸磷程度均与对照系统没有明显的差异,说明聚磷菌对 TCP 具有一定的耐受能力。

2.2 污泥减量和污水处理效果分析

2.2.1 污泥沉降性能及活性 连续运行阶段,污泥体积指数 SVI 和污泥耗氧呼吸速率 SOUR 的变化过程见图 7 和图 8。

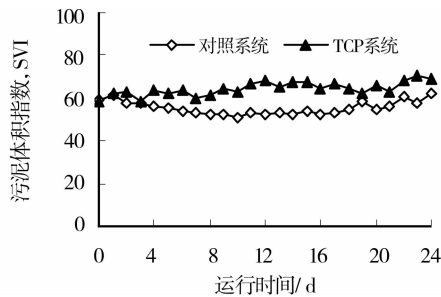


图 7 对照系统和 TCP 系统 SVI 变化过程

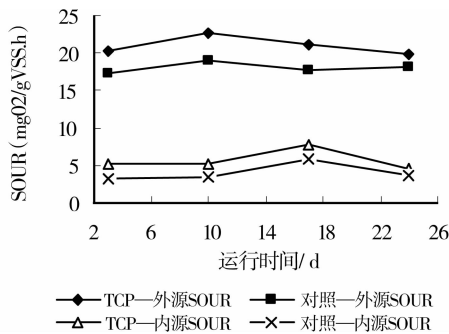


图 8 对照系统和 TCP 系统 SOUR 的变化过程

从图 7 可以看出,与对照系统相比较,TCP 系统的 SVI 值略有增加,但总体仍处于较低状态,污泥沉降性能良好。图 8 则反映在 2 mg/L TCP 作用下活性污泥 SOUR 值增加的情况,其中内源 SOUR 值增加幅度高达 28.8%,这一现象和 Mayhew 用 2,4-二硝基苯酚和鱼藤酮做实验的结果一致^[3]。结合图 3 周期溶解氧变化曲线,可以认为添加化学解偶联剂 TCP 之后,电子传递和氧化磷酸化的解偶联作用,使得电子传递过程不产生或产生的 ATP 较少,TCP 系统需要消耗更多的氧来氧化有机物(包括外源 COD 和内源生物物质)以获取能量,宏观上表现为 TCP 系统具有高的 SOUR 值,微观上表现为 TCP 系统为保持污泥活性所需的能量泄漏更多。

2.2.2 污泥减量效果 实验期间,通过测定每个周期的污泥浓度、根据污泥实际增长量、在保证 MLSS 为 3 g/L 的情况下确定每天需要排放的剩余污泥量,见图 9。

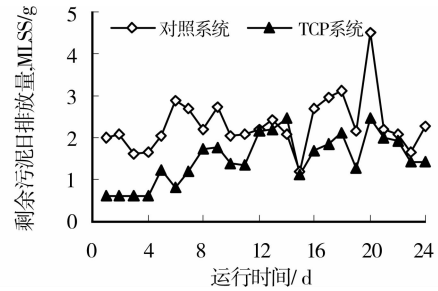


图 9 对照系统和 TCP 系统剩余污泥日排放量

从图 9 可以看出,TCP 系统运行初期的剩余污泥排放量相对较低;随着运行时间的增长,该系统剩余污泥排放量逐渐增加并趋于稳定,但始终低于对照系统。整个实验周期 TCP 系统的表观污泥产率为 0.233 gMLSS / gCOD,与对照系统的 0.356 gMLSS / gCOD 相比,降低了 34.6%,即使在稳定运行阶段污泥产率也降低了 22.5%,污泥减量效果明显。根据剩余污泥排放量计算,对照系统的 SRT 为 13 d、TCP 系统为 20 d。

2.2.3 污水处理效果 TCP 系统和对照系统进出水水质及污水处理效果见表 2。

表 2 TCP 系统和对照系统运行效果比较

考察指标	变化范围/ mg · L ⁻¹	平均值/ mg · L ⁻¹	去除率/ %	
COD	进水	343 ~ 874	648	/
	对照系统出水	13 ~ 39	28	95.7
	TCP 系统出水	16 ~ 45	32	95.1
NH ₃ -N	进水	21.6 ~ 61.2	36.6	/
	对照系统出水	0.54 ~ 7.72	3.47	90.5
	TCP 系统出水	0.54 ~ 7.72	3.62	90.1
TN	进水	31 ~ 68.7	44.7	/
	对照系统出水	5.96 ~ 16.8	12.2	72.7
	TCP 系统出水	5.52 ~ 19.0	12.1	72.9
TP	进水	2.66 ~ 9.85	5.58	/
	对照系统出水	0.02 ~ 0.75	0.16	97.1
	TCP 系统出水	0.02 ~ 0.85	0.32	94.3

从表 2 可以看出,2 个系统对 COD、氨氮、总氮、总磷的去除能力相当,没有明显的差别,运行期间出水水质完全满足 GB18918—2002 一级 B 标准要求,说明在污水处理系统中投加 2 mg/L TCP 尚不会对污水处理效果产生明显影响。值得关注的是 TCP 系统同期获得了 34.6% 的污泥减量效果。也就是说,TCP 系统通过能量解偶联获得污泥减量的同时,依然保持了系统的除磷脱氮能力,这 and 低 DO 运行控制模式和辅以排富磷污水除磷的运行模式有关。

3 结 论

1) 低溶解氧控制方式可以在污泥减量系统少量增加曝气量的情况下, 获得明显的污泥减量效果。与对照系统相比, 2 mg/L TCP 污泥减量系统曝气量增加 23%, 剩余污泥排放量将减少 34.6%。

2) 在 SBR 系统中投加低浓度 TCP 后, 活性污泥内源 SOUR 值增加, 曝气阶段低溶解氧状态持续的时间延长, 周期平均 DO 值更低, 在 TCP 污泥减量系统中形成了有利于同时硝化反硝化脱氮的环境。

3) 综合考虑 TCP 浓度对 SBR 系统污泥减量效果、除磷脱氮和污泥性能的影响, TCP 最适浓度建议为 2 mg/L, 周期平均 DO 值控制为 2 mg/L。此时, TCP 污泥减量系统 SND 脱氮率为 53.2%, 可以保证出水氨氮和总氮稳定达标; 辅以外排厌氧富磷污水除磷, 可以使 TCP 污泥减量系统在污泥减量率为 34.6% 的情况下实现磷的去除。

参考文献:

- [1] 郝晓地、王啟林、曹亚莉. 剩余污泥减量技术评价及未来潜在技术展望[J]. 中国给水排水, 2008, 24(1): 1-5.
- [2] 何赞, 王海燕. 污泥减量化水处理技术的研究进展[J]. 中国给水排水, 2009, 25(8): 1-7.
- [3] OKEY R W, STENSEL D H. Uncouplers and activated sludge-the impact on synthesis and respiration [J]. Toxicol Environ Chem, 1993, 40: 235-254.
- [4] LOW E W, CHASE H A. The use of chemical uncouplers for reducing biomass production during biodegradation[J]. Water Sci. Technol, 1998, 37(4/5): 399-402.
- [5] MAYHEW M, STEPHENSON T. Biomass yield reduction: is biochemical manipulation possible without affecting activated sludge process efficiency[J]. Water Sci Tec, 1998, 38(8/9): 137-144.
- [6] LOW E W, CHASE H A. Reducing production of excess biomass during wastewater treatment[J]. Water Res, 1999, 33: 1119-1132.
- [7] YANG X F, XIE M L, LIU Y. Metabolic uncouplers reduce excess sludge production in an activated sludge process[J]. Process Biochemistry, 2003, 38(9): 1373-1377.
- [8] SKULACHEV V P. Uncoupling: new approaches to an old problem of bioenergetics [J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1998, 1362(2): 100-124.
- [9] STRAND S E, HAREM GN, STENSEL H D. Activated sludge yield reduction using chemical uncouplers[J]. Water Environ Res, 1999, 71: 454-458.
- [10] CHEN G H, MO H K, LIU Y. Utilization of a metabolic uncoupler 3, 3', 4', 5'-tetrachlorosalicylanilide (TCS) to reduce sludge growth in activated sludge culture[J]. Wat. Res., 2002, 36(8): 2077-2083.
- [11] LOW E W, CHASE H A, MILNER M G. Uncoupling of metabolism to reduce biomass production in the activated sludge process [J]. Wat. Res., 2000, 34(12): 3024-3212.
- [12] ABBASSI. Minimization of excess sludge production by increase of oxygen concentration in activated sludge flocs: experiment and the theoretical approach [J]. Water. Res., 2000, 34(1): 139-146.
- [13] CHEN G H, SABA S, DJAFER M, et al. New approaches to minimize excess sludge in activated sludge systems[J]. Water Sci Technol, 2001, 44(10): 203-208.
- [14] 叶芬霞, 陈英旭, 冯孝善. 化学解耦联剂对活性污泥工艺中剩余污泥的减量作用[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 394-399.
- YE FEN-XIA, CHEN YING-XU, FENG XIAO-SHAN. Reduction of excess sludge production by chemical uncoupler in activated sludge process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(3): 394-399.
- [15] 李颖, 叶芬霞. 化学解耦联剂对活性污泥产率的控制作用[J]. 环境科学研究, 2006, 19(3): 88-90.
- LI YING, YE FEN-XIA. Study on control of excess sludge production in activated sludge process by chemical uncoupler [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(3): 88-90.
- [16] 蒋小龙, 叶芬霞. 化学解耦联剂对污泥产率的比较研究 [J]. 环境科学研究, 2006, 19(4): 115-118.
- JIANG XIAO-LONG, YE FEN-XIA. Comparative study of chemical uncoupler on sludge yields [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(4): 115-118.
- [17] 吉芳英, 罗固源. 活性污泥外循环 SBR 系统除磷能力试验分析[J]. 中国给水排水, 2002, 18(5): 1-5.
- JI FANG-YING, LUO GU-YUAN. Biological phosphorus removal capability in SBR system using external recycle of activated sludge[J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(5): 1-5.
- [18] 吉芳英, 罗固源. 排除厌氧富磷污水生物化学除磷脱氮 ERP-SBR 系统研究[J]. 水处理技术, 2005, 31(1): 57-61.
- JI FANG-YING, LUO GU-YUAN. ERP-SBR biochemical process for nitrogen and phosphorus removal by draining out anaerobic rich phosphate supernatant [J]. Technology of Water Treatment, 2005, 31(1): 57-61.
- [19] 卢少勇, 宋英豪, 申立贤, 王凯军. 呼吸速率测定研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(8): 24-27.
- LU SHAO-YONG, SONG YING-HAO, SHEN LI-XIAN, Wang Kaijun. The research development of the respiration rate measurement [J]. Techniques and equipment for Environmental Pollution Control, 2002, 3(8): 24-27.

(编辑 王秀玲)