

有机负荷对 ABR 系统运行特征及效能的影响

李建政,倪佳,郑国臣,邵晓辉,张岩

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院 城市水资源与水环境国家重点实验室,
150090 哈尔滨, ljz6677@163.com)

摘要:为提高厌氧折流板反应器(ABR)的处理效能,采用有效容积为 28.75 L 的 4 格室 ABR,通过进水 COD 质量浓度和水力停留时间(HRT)的调控,探讨有机负荷率(OLR)的改变对系统运行特征和效能的影响.结果表明,在 OLR 为 $4.0 \sim 5.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 范围内,通过进水 COD 质量浓度和 HRT 的调控,可使参与厌氧消化过程的各功能菌群在 ABR 系统中的分布更加有序,可有效提高系统的处理效能和运行稳定性.在进水 COD 为 $8\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、HRT 为 48 h,即 OLR 为 $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 的条件下,ABR 对 COD 的去除率可稳定在 90% 以上.

关键词:厌氧折流板反应器;运行效能;有机负荷;COD;水力停留时间

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)08-0050-05

Impact of organic loading rate on the performance and pollutant removal efficiency in an ABR

LI Jian-zheng, NI Jia, ZHENG Guo-chen, TAI Xiao-hui, ZHANG Yan

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, ljz6677@163.com)

Abstract: To improve the pollutant removal efficiency of anaerobic baffled reactor (ABR), the influence of organic loading rate (OLR) on the treatment system was investigated based on adjustment of influent COD concentration and hydraulic retention time (HRT). The available volume of the ABR was 28.75 L. The results indicated that the adjustment of influent COD and HRT with the OLR ranged from 4 to $5.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ could make all kinds of function flora that participated the anaerobic digestion process distribute more orderly in the ABR system, and the pollutant removal efficiency and the stability of the reactor were improved effectively. A COD removal rate above 90% can be achieved in the ABR when OLR is $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, the influent COD is $8\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and HRT is 48 h.

Key words: anaerobic baffled reactor (ABR); removal efficiency; organic load rate (OLR); COD concentration; hydraulic retention time (HRT)

厌氧生物处理技术被认为是高质量浓度有机废水处理最为经济有效的方法.其中,厌氧折流板反应器(ABR)以其良好的污泥截留性能、独特的水力流态和明显的生物相分离特性,表现出处理

效果好、水力停留时间(HRT)短、耐冲击负荷强等优势,受到越来越多的关注^[1].然而,关于 ABR 启动后,如何通过工程调控措施提高其效能的报道较少,在一定程度上限制了其推广应用^[2].在工程应用中,废水处理系统的控制除了温度、pH 或碱度外,有机负荷(OLR)的控制简单易行.本文在前期成功启动一个 4 格室 ABR 的基础上,通过对进水 COD 和 HRT 的调控,考察了 OLR 对 ABR 去除效能的影响并分析了其运行特征.

收稿日期: 2010-05-09.

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA05Z19);
国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07207-005-02);哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2009RFXXS004).

作者简介:李建政(1965—),男,教授,博士生导师.

1 实 验

1.1 实验装置

实验所用 ABR 为 4 格室结构^[2],由有机玻璃制成,规格为 74 cm×56 cm×11 cm,总有效容积为 28.75 L;每个格室各有一个下向流室和一个上向流室,宽度分别为 2.5 cm 和 11.5 cm. 每个格室顶部设有排气管与水封相连,发酵气产量采用湿式气体流量计计量. 反应器外表缠有电热丝,通过温控装置控制 ABR 内部温度为(35±1)℃. 源水由计量泵泵入反应器第 1 格室,以上下折流形式先后流经后续各格室,最后从第 4 格室上部流出.

1.2 实验废水

实验废水采用甜菜制糖厂的废糖蜜加水稀释

表 1 ABR 在调控前的基本运行特征

格室	pH	产气量/ (L·d ⁻¹)	气体体积分数/%			末端发酵产物/(mg·L ⁻¹)				
			H ₂	CH ₄	CO ₂	总量	乙酸	丙酸	丁酸	戊酸
1	6.3	16.3	5.9	31.5	60	2 284	941	682	400	261
2	5.9	12.5	1.6	32.1	59.5	2 524	1 045	854	420	205
3	6.0	10.3	1.2	36.1	55	2 038	1 385	430	211	12
4	6.2	6.1	0.5	44.9	39	1 808	1 072	554	175	7

1.4 ABR 的运行控制

在如 1.3 所述的 ABR 运行基础上,采用调节进水 COD 和 HRT 的方法,考察了 OLR 对 ABR 去除效能的影响. 如表 2 所示,根据 HRT 或进水 COD 的改变,ABR 的控制运行分为 4 个阶段,每

表 2 ABR 的调控运行阶段及主要控制参数

运行阶段	HRT/h	流量/(L·d ⁻¹)	t/℃	进水 pH	进水 COD 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	有机负荷/ (kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)
第 1 阶段(1~17 d)	24	28.75	35±1	8	4 000	4.0
第 2 阶段(19~31 d)	36	19.17	35±1	8	6 000	4.0
第 3 阶段(33~65 d)	36	19.17	35±1	8	8 000	5.4
第 4 阶段(67~83 d)	48	14.37	35±1	8	8 000	4.0

1.5 分析项目及测定方法

COD、pH、碱度(ALK,以 CaCO₃ 计)、MLSS、MLVSS 等均采用国家标准方法测定^[3];发酵气产量采用湿式气体流量计(LML-1,长春汽车滤清器有限责任公司)计量;发酵气成分及体积分数、废水中的挥发性脂肪酸(VFAs)和乙醇均采用气相色谱测定^[4].

2 结果与分析

2.1 COD 去除率

如图 1 所示,在 ABR 进水 COD 从基础状态的 6 000 mg·L⁻¹ 降低到第 1 阶段的 4 000 mg·L⁻¹,即 OLR 从 6 kg·m⁻³·d⁻¹降低

而成,配水时投加少量 NH₄Cl 和 KH₂PO₄,使废水 m(COD):m(N):m(P)=200~500:5:1 左右,并投加小苏打调整进水 pH 在 8 左右.

1.3 ABR 的基础运行状态

在本研究开始前,所采用的 ABR 已经启动运行了 120 d,基本完成了污泥驯化,并在 HRT 24 h、进水 COD 质量浓度为 6 000 mg·L⁻¹(OLR 6 kg·m⁻³·d⁻¹)、pH 8、(35±1)℃等条件下达到稳定运行,此时各格室的生物量 MLVSS 分别为 8.3、8.5、10.1、9.2 g·L⁻¹. 在运行的最后 20 d,ABR 所达到的 COD 平均去除率为 61%,其他主要运行特征指标如表 1 所示.

一次运行条件的改变均在上一阶段达到运行稳定后进行. 其中,温度(35℃)和进水 pH(8)与 1.3 所述的基础运行状态保持一致,而稳定期是指 ABR 及其各格室的 COD 质量浓度和去除率达到相对稳定后的运行时间.

为 4 kg·m⁻³·d⁻¹时,ABR 的 COD 去除率呈现出显著上升趋势. 当重新达到运行稳定时(12~17 d),ABR 的 COD 去除率由基础状态的 62% 上升到了 74% 左右. 经检测,在该阶段的稳定期(12~17 d),ABR 各格室的生物量分别为 8.5、8.69、10.5 和 9.27 g·L⁻¹,较基础状态时变化不大,说明进水 COD 质量浓度的降低有效提高了厌氧活性污泥的活性. 在运行的第 2 阶段初期,ABR 对 COD 的去除率显著增加,但随后又逐渐回落并维持在第 1 阶段稳定期的水平,在该阶段的稳定期(26~31 d),其 COD 平均去除率为 77%. 在 ABR 运行的第 3 阶段,将进水 COD 和 OLR 分别提高到 8 000 mg·L⁻¹和 5.4 kg·m⁻³·d⁻¹,系统再一

次达到稳定运行时(60~65 d),其 COD 平均去除率增加到 81.6%. 在第 4 运行阶段,将 HRT 延长为 48 h ($OLR\ 4\ kg\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$)后,系统对 COD 的去除效率再一次呈现出上升趋势,最终稳定在 90% 上下(78~83 d),效果比较理想. 以上结果说明,较长的 HRT、较高的有机物质量浓度有利于系统微生物群落活性的提高.

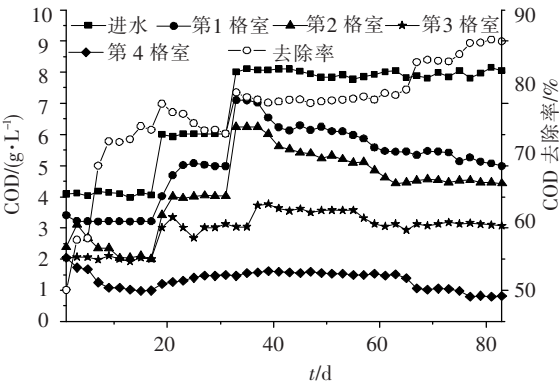


图 1 ABR 系统的 COD 质量浓度变化及总去除率

2.2 产气速率及气体组分

如表 3 所示,对于 OLR 均为 $4.0\ kg\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$ 的第 1、2、4 阶段,在 HRT 从 24 h 逐步延长到 36 h 和 48 h 时,ABR 的平均产气总量从 $33.3\ L\cdot d^{-1}$ 分步提高到 39.7 和 $52\ L\cdot d^{-1}$. 这一结果同样表明,在 OLR 不变的情况下,适当延长 HRT 有助

于各类厌氧微生物菌群代谢活性的发挥. 从各格室的产气量变化趋势分析,这种良性刺激的强度表现为从前端格室到后端格室逐级增强.

由于第 3 阶段的 OLR 显著高于第 1、2、4 阶段,ABR 在相应稳定期所表现出的产气量最高,平均为 $55.4\ L\cdot d^{-1}$. 值得关注的是,在此阶段,对 ABR 总产气量的主要贡献者是第 2 和第 3 格室,分别为 14.5 和 $14.9\ L\cdot d^{-1}$,而第 1、4 格室的产气量却较其他运行阶段略有下降. 分析认为,在 ABR 前 2 个格室中以产酸发酵菌群占据优势,污泥形态多为絮状结构,在 HRT 或上升流速一定的情况下,其悬浮絮状污泥的保有量是一定的,在 OLR 从 $4.0\ kg\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$ 提高到 $5.4\ kg\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$ 后,进水中原有的有机物就会有更多的剩余从第 1 格室进入后续格室,这无疑会增强后者的产酸发酵作用而削弱其产甲烷作用. 另外,比较表 3 中第 3 阶段各格室的甲烷体积分数可知, OLR 提高对 ABR 系统造成的影响在第 2 格室最为显著,第 3 和第 4 格室次之. 从 ABR 各格室发酵气的组成分析,在各运行阶段,第 1 至第 4 格室发酵气中的氢气体积分数逐级下降,而甲烷趋势相反,说明包括同型产乙酸菌和产甲烷菌在内的耗氢菌群得到了逐级强化. 尤其是产甲烷菌群的强化,为 ABR 系统高效去除有机污染物提供了保障.

表 3 ABR 在各运行阶段稳定期的平均产气量及其组分

平均产气 量及其组分	第 1 阶段(12~17 d)				第 2 阶段(26~31 d)				第 3 阶段(60~65 d)				第 4 阶段(78~83 d)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
产量/($L\cdot d^{-1}$)	10.8	8.5	7.3	6.7	10.2	10.9	11.6	7.0	9.6	14.5	14.9	16.4	10.9	11.1	12.4	17.6
H_2 /%	4.7	1.9	1.5	0.9	3.4	1.5	0.4	0.2	2.2	1.9	1.2	0.2	2.0	1.4	0.9	0.4
CH_4 /%	28.6	37.9	47.1	48.3	32.3	37.7	52.0	54.7	32.5	35.0	46.5	53.0	31.1	37.4	51.0	58.9
CO_2 /%	54.2	60.8	49.0	34.1	61.3	56.3	35.2	25.0	66.5	57.1	51.5	23.9	68.4	60.8	44.6	21.0

2.3 液相末端发酵产物

液相末端发酵产物(EFP)在总量和成分上的变化反映了发酵系统微生物菌群的代谢活性和群落构成的改变^[5]. 在整个调控运行期间,EFP 在 ABR 第 2 格室的总量始终显著高于第 1 格室,而其后的第 3 和第 4 格室则逐级迅速下降(表 4). 这一现象表明,在 ABR 的前 2 个格室是产酸发酵菌群占据优势,而消耗 VFAs 的菌群则从第 3 格开始成为优势微生物. 如表 4 所示,在维持 $OLR\ 4.0\ kg\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$ 不变的条件下,当 HRT 从 24 h 延长为 36 h 后,ABR 第 1 和第 2 格室的 EFP 总量升高,产酸发酵微生物活性显著增强,而第 3 和第 4 格室 EFP 总量相应降低,说明后两个格室中 VFAs 的微生物代谢活性同样得到了提升.

在 ABR 运行的第 3 阶段, OLR 升高后,第 1

格室的 EFP 总量稍有增加,在第 2、3 格室则大幅提高,而第 4 格室的 EFP 总量却从变化前的 $825\ mg\cdot L^{-1}$ 下降为 $684\ mg\cdot L^{-1}$;维持进水 COD 质量浓度 $8\ 000\ mg\cdot L^{-1}$ 不变,将 HRT 从 36 h 延长为 48 h,使 ABR 的 OLR 再一次回归到 $4.0\ kg\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$ 后,由于基质总量的减少,各格室 EFP 的总量都较第 3 阶段有显著降低. 但与 OLR 相同的第 1 和第 2 运行阶段相比,系统最终出水(第 4 格室)的 EFP 总量大幅下降,仅为 $347\ mg\cdot L^{-1}$,说明 ABR 系统对有机污染物的去除效能得到了显著加强.

通过表 4 的检测结果,发现各格室 EFP 中的各种 VFAs 和乙醇质量浓度,均随 OLR 的改变而发生了变化,这可能与系统中的微生物群落演替有关,后文将对此进行深入分析.

表 4 ABR 在各阶段稳定期的平均末端发酵产物与 pH

稳定期	格室	pH	末端发酵产物/(mg·L ⁻¹)				
			乙醇	乙酸	丙酸	丁酸	总量
第 1 阶段 (12~17 d)	1	6.2	133	870	468	260.0	1 731
	2	6.4	171	1 094	535	116.0	1 916
	3	6.9	143	821	458	51.0	1 474
	4	7.3	105	380	395	180.0	1 060
第 2 阶段 (26~31d)	1	6.4	156	1 023	607	152.0	1 938
	2	6.0	65	2 010	581	179.0	2 835
	3	6.9	16	587	658	188.0	1 450
	4	7.3	43	475	215	92.0	825
第 3 阶段 (60~65 d)	1	6.1	170	1 432	300	43.5	1 946
	2	5.8	77	2 601	551	100.0	3 329
	3	6.2	ND*	1 457	607	135.0	2 199
	4	7.1	54	327	279	24.0	684
第 4 阶段 (78~83 d)	1	6.1	123	1 109	365	88.0	1 685
	2	6.0	ND	1 945	481	120.8	2 547
	3	6.6	55	1 075	540	93.0	1 763
	4	7.3	ND	187	108	52.0	347

注:ND 未检出.

2.4 生物量

经检测,ABR 在第 1 阶段的稳定期,第 1 至第 4 格室的生物量 MLVSS 分别为 8.5、8.7、10.5 和 9.3 g·L⁻¹. 在第 2 阶段的稳定期,MLVSS 分别上升为 9.4、10.2、11.4 和 9.7 g·L⁻¹. 可见,在 OLR 相同的情况下,较长的 HRT 有利于微生物代谢活性和有机物降解率的提高,因而促进了厌氧活性污泥微生物的增殖. 在 ABR 运行的第 3 阶段依此规律继续增殖,且此时 ABR 系统的厌氧活性污泥已经颗粒化. 在 ABR 中,颗粒污泥物理结构和理化特征是影响其良好性能的关键^[6]. 当 ABR 在运行的第 4 阶段 OLR 回归为 4.0 kg·m⁻³·d⁻¹ 后,第 1 至第 4 格室在稳定期的 MLVSS 分别为 9.8、11.8、14.5 和 16.1 g·L⁻¹,除了第 1 格室的 MLVSS 回落到与第 3 阶段稳定期相当的水平外,其他各格室的 MLVSS 没有出现显著的衰减. 较高的生物持有量为 ABR 厌氧废水处理系统的有效稳定运行奠定了基础.

3 讨 论

与单相厌氧生物处理反应器相比,ABR 具有明显的生物相分离特性,即产酸发酵菌群、产氢产乙酸菌群和产甲烷菌群等,沿程分布于各格室并呈现不同的优势度,逐级将有机物分解为甲烷和二氧化碳等^[7]. 对环境适应性强、代谢速度快的产酸相微生物类群(产酸发酵菌群)位于 ABR 的前端格室,可以极大削弱有机负荷冲击对后端格室微生物类群的影响,尤其是对环境变化敏感的产甲烷菌群起到了保护作用. 进水 COD 质量浓度和 HRT 的变化都会对

ABR 造成负荷冲击,进而可能影响到各类功能菌群在各格室分布的优势度,使 ABR 表现出不同的运行特征.

在 ABR 4 个调控运行阶段的稳定期,第 1 和第 2 格室均呈现出显著的 VFAs 累积现象(表 4),其发酵气中的甲烷质量浓度最多也未超过 38%(表 3),说明产酸发酵菌群在这两个格室中占据优势. VFAs 从第 3 格室开始出现显著的衰减,尤其是乙酸质量浓度的大幅下降(表 4)和发酵气中甲烷质量浓度的显著提高(表 3),表明产甲烷菌群在后端格室逐渐占据优势. ABR 在第 1 运行阶段的稳定期,其出水(第 4 格室)中包括乙醇和 VFAs 在内的 EFP 总量达 1 060 mg·L⁻¹,说明在 HRT 24 h 条件下,ABR 前端格室对废水中有机物的产酸发酵代谢并不充分,导致后端格室仍然表现出一定程度的产酸发酵作用. 在 ABR 运行的第 2 阶段,虽然 OLR 与第 1 阶段相同,但由于 HRT 延长到 36 h,系统出水中的 EFP 降低到 825 mg·L⁻¹(表 4),而第 3 和第 4 格室发酵气中的甲烷质量浓度也分别从第 1 阶段的 47.1% 和 48.3% 提高到了 52% 和 54.7%(表 3). 这一结果一方面表明前端格室厌氧活性污泥中产酸发酵菌群的优势得到了加强,同时说明后端格室中代谢乙醇和 VFAs 的产氢产乙酸菌群和产甲烷菌群优势也得到了壮大. 第 3 阶段的 OLR 提高和第 4 阶段的 HRT 进一步延长,有效刺激了各类厌氧菌群的活性,使 ABR 系统的产酸发酵菌群和产甲烷菌群的相分离特征更加明显,系统出水中的 EFP 分别降低为 684 和 347 mg·L⁻¹,第 3 和第 4 格室发酵气中的甲烷质量浓度在第 3 和第 4 运行阶段分别达 46.5%、53% 和

51%、58.9%。

产氢产乙酸菌群的营养生态位位于产酸发酵菌群和产甲烷菌群之间,它们将产酸发酵菌群代谢产生的乙醇、丙酸和丁酸等转化为乙酸、氢气和二氧化碳,为产甲烷菌群提供了可以直接利用的营养底物。由表4可以看出,在ABR 4个运行阶段的稳定期,乙醇质量浓度始终在第1格室最高,并表现出逐格室沿程降低的趋势,而丁酸和丙酸降解则主要发生在后端2个格室,尤其突出表现在第4格室。可见,氧化乙醇的产氢产乙酸菌在生态位上与产酸发酵菌群更为接近,而氧化丁酸和丙酸的产氢产乙酸菌群则与产甲烷菌群的生态位重叠更多。研究表明^[8],乙醇、丙酸和丁酸的产氢产乙酸过程主要受控于反应系统的氢分压(p_{H_2}),其中 p_{H_2} 对乙醇产氢产乙酸代谢的抑制作用最弱,而对丙酸产氢产乙酸代谢的抑制作用最强。从表3可以看出,在4个运行阶段稳定期,第1至第4格室发酵气中的氢气体积分数均呈现逐格室下降的态势。因此,在ABR系统中,乙醇的产氢产乙酸作用可以出现在前端格室,而丁酸和丙酸的产氢产乙酸作用只能发生在 p_{H_2} 较低的后端格室中。

在产酸发酵菌群和产氢产乙酸菌群的代谢过程中,均有大量的氢气产生。系统中的低 p_{H_2} 条件需要消耗氢气的菌群代谢才能得以维持,这类菌群主要包括同型产乙酸菌群和产甲烷菌群。从ABR第1至第4格室发酵气中氢气体积分数的逐级降低以及 CO_2 体积分数同步下降这一变化规律分析,各格室都有耗氢菌群的存在,而从乙酸在第1和第2格室的积累以及在第3和第4格室的消减规律分析,同型产乙酸菌群应该主要分布于前端2个格室,而产甲烷菌群则主要分布于后端2个格室。

综上所述,ABR在运行过程中,可以在各格室出现不同的优势菌群,各格室的厌氧微生物群落呈现出沿程更迭的变化规律。这一生物相分离特征会受OLR的影响,即进水COD质量浓度和HRT的改变,将导致ABR系统微生物群落结构的变化,并最终影响到系统的运行特征和效能。

4 结 论

1)通过进水COD质量浓度和HRT的调控,可使参与厌氧消化过程的各项功能菌群在ABR系统中的分布更加有序,分布于前端格室中的产酸发酵菌

群有效保护了后端格室中的环境敏感菌群(产氢产乙酸菌和产甲烷菌等)的代谢活性,可有效提高系统的处理效能和运行稳定性。

2)氢分压对ABR系统中产氢产乙酸作用具有明显的反馈抑制作用,其中,对乙醇产氢产乙酸代谢的抑制作用最弱,而对丙酸代谢的抑制最强,这在很大程度上决定了整个系统的群落演替方向和各个功能格室的顶级群落结构。

3)通过适当延长HRT、提高进水COD质量浓度的运行方式,可提高ABR的废水处理效能。在有机负荷为 $4\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 、HRT为48 h的条件下,COD去除率可稳定在90%以上。

参考文献:

- [1] KRISHNA G, KUMAR G V T. Treatment of low strength complex wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR)[J]. *Bioresour Technol*, doi: 10. 1016/j. biortech. 2008. 03. 016.
- [2] HENZE M, HARREMOES P. Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors: a literature review[J]. *Wat Sci Tech*, 2005, 15(8/9): 100–111.
- [3] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [4] LI Jianzheng, LI Baikun, ZHU Gefu, *et al.* Hydrogen production from diluted molasses by fermentative mixed microbe flora culture in an anaerobic baffled reactor (ABR)[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2007, 28(6): 3274–3283.
- [5] REN Nanqi, ZHAO Dan, CHEN Xiaolei, *et al.* Mechanism and controlling strategy of the production and accumulation of propionic acid for anaerobic wastewater treatment[J]. *Science in China, Series B: Chemistry*, 2002, 45(3): 319–327.
- [6] WILÉN B M, JINA B, LANTA P. Impact of structural characteristics on activated sludge floc stability[J]. *Water Res*, 2003, 37: 3632–3645.
- [7] 杨建, 李东伟, 李斗, 等. 厌氧折流板反应器的相分离现象实验研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2008, 30(2): 121–145.
- [8] 胡继萃. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京: 中国工业出版社, 2003: 30–51.

(编辑 刘 彤)