

升流式厌氧污泥床和连续流搅拌槽式反应器的废水处理效能及产甲烷菌群组成的对比分析

张立国¹, 李建政^{1,2}, 班巧英¹, 许一平¹

1. 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 哈尔滨 150090

2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090

摘要 分别运行升流式厌氧污泥床(UASB)反应器和连续流搅拌槽式反应器(CSTR)并使其达到稳定运行状态,在有机负荷率(OLR)均为 $6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 的条件下,对比分析了二者在稳定期的运行特性和产甲烷菌群的组成。结果表明,UASB的化学需氧量(COD)去除率为95%,显著高于CSTR的COD去除率(84%)。然而,CSTR系统中的活性污泥的比产甲烷速率($315\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)和比COD去除率($0.85\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)则显著高于UASB的 $260\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.67\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。采用聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳(PCR-DGGE)指纹分析技术对系统稳定期的活性污泥进行分析的结果表明,UASB系统的优势产甲烷菌为 *Methanosaeta concilii* 和 *Methanospirillum hungatei*, 而CSTR系统中的优势产甲烷菌为 *Methanosarcina mazei* 和 *Methanobacterium formicicum*。污泥微生物群落组成及其代谢特征的不同是造成厌氧处理系统效能差异的内在原因。UASB和CSTR在COD去除效能和污泥比活性方面各有所长,在实际应用中,须根据废水水质和预期处理程度合理选用。

关键词 升流式厌氧污泥床;连续流搅拌槽式反应器;处理效能;产甲烷菌群

中图分类号 X703

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.31.002

Comparative Analysis of the Efficiency and the Methanogens Composition in Upflow Anaerobic Sludge Blanket and Continuous Stirred-Tank Reactor

ZHANG Ligu¹, LI Jianzheng^{1,2}, BAN Qiaoying¹, XU Yiping¹

1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

Abstract The efficiency and the methanogens composition in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor and a Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR) are investigated after achieving steady states at the same Organic Loading Rate (OLR) of $6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$. The results show that the average removal rate of COD reaches 95% in the UASB, significantly higher than 84% of the CSTR. However, the specific methane production rate and the specific COD removal rate of the activated sludge are $315\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ and $0.85\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively, in the CSTR, notably higher than those of the UASB of $260\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ and $0.67\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. The analysis of the methanogens composition of the activated sludge by polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis (PCR-DGGE) indicates that *Methanosaeta concilii* and *Methanospirillum hungatei* are the dominant methanogens in the UASB, while *Methanosarcina mazei* and *Methanobacterium formicicum* are dominant in the CSTR. The diversity of the microbial community composition and the metabolic characteristics are the underlying reasons for the difference in the performance of the anaerobic treatment system. The UASB and the CSTR have their respective advantages in the COD removal or specific activities of the activated sludge. It is reasonable to

收稿日期: 2012-09-18;修回日期: 2012-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178136);城市水资源与水环境国家重点实验室基金项目(2010DX06)

作者简介: 张立国, 博士研究生, 研究方向为废水厌氧生物处理, 电子信箱: zlg_733@163.com; 李建政(通信作者), 教授, 研究方向为废水厌氧生物处理及资源化技术, 电子信箱: ljz6677@163.com

choose a perfect bioreactor (UASB or CSTR) for a practical engineering based on the quality of the wastewater and the required extent of the treatment.

Keywords upflow anaerobic sludge blanket; continuous flow stirred-tank reactor; performance; methanogens

0 引言

能源和环境双重危机使得绿色可再生能源的研究与开发成为人类迫切需要解决的难题^[1]。废水厌氧生物处理技术以其负荷高、产泥少、能耗低,且可回收沼气等诸多优点而受到人们的广泛关注^[2]。厌氧消化过程需要至少三类微生物的参与,分别为水解发酵菌、产氢产乙酸菌以及产甲烷菌^[3]。产甲烷菌群的产甲烷作用是推动厌氧消化过程顺利进行的关键步骤,然而由于产甲烷菌世代时间长,对环境因子(如:pH值,氧化还原电位,温度等)的变化敏感,故产甲烷菌群的产甲烷作用是厌氧消化过程的限速步骤之一^[4]。因此,产甲烷菌群的组成及其产甲烷活性将直接影响到厌氧生物处理系统的效能及运行稳定性^[5-7]。

升流式厌氧污泥床(UASB)作为一种高效厌氧生物反应器,其最大特点就是能够形成沉降性能良好、产甲烷活性高的颗粒污泥^[8-9]。然而,污泥的颗粒化,不可避免地降低了微生物与废水的接触面积,从而降低了微生物与有机物之间的传质效能。而连续流搅拌槽式反应器(CSTR)中厌氧活性污泥成絮状结构,在传质效能方面具有更大的优越性,目前采用CSTR作为甲烷发酵系统的研究已有报道^[10-11]。本文在相同有机负荷条件下比较分析了UASB和CSTR的运行特性,并采用聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳(PCR-DGGE)指纹分析技术,对比分析了两种反应系统中产甲烷菌群的组成,探讨了产甲烷菌群的组成与反应器运行效能之间的关系,以期为实际应用中厌氧反应器类型的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

UASB反应器由有机玻璃制成,有效容积为11L,其反应区和三相分离区的容积比为3:1,反应区高径比为10:1。CSTR反应器也是由有机玻璃制成,内设气-液-固三相分离装置,为反应区和沉淀区一体化结构,有效容积为15L,沉淀区为7.5L。两套反应器外壁缠绕电热丝,并通过温控仪将内部混合液的温度控制在 $35\pm 1^\circ\text{C}$ 。沼气由气室导出,经导气管与水封后由湿式气体流量计计量。

1.2 接种污泥及试验废水

接种污泥取自哈尔滨市某污水处理厂二沉池剩余活性污泥。实验废水以某甜菜制糖厂的制糖废水加自来水稀释而成,投配适量尿素和 KH_2PO_4 使进水中的COD:N:P为200:5:1,以小苏打将其pH值调节为7.0—7.2。

1.3 反应器运行控制

UASB反应器在污泥接种量 (MLVSS) $1.412\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、进水

COD $1000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、水力停留时间(HRT) 24h条件下启动,在达到运行稳定后,分阶段缩短HRT(20,16,12,8h),经过150d的连续运行之后,反应器在COD $1000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右、HRT 8h达到运行稳定。继续保持HRT为8h不变,将进水COD提高到 $2000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,经过15d的连续运行,UASB达到稳定状态。继续维持运行7d,以对其稳定期的特征参数进行计算和评估。

CSTR反应器在污泥接种量为 $2.106\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、进水COD $2000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右、HRT 48h条件下启动,在达到运行稳定后,分阶段缩短HRT(36,24,16h),经过80d的连续运行之后,反应器在COD $2000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、HRT 16h达到运行稳定。然后保持HRT为16h不变,将进水COD提高到 $4000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,经过20d的连续运行,CSTR达到稳定状态。继续维持运行7d,以对其稳定期的特征参数进行计算和评估。

1.4 分析项目及方法

COD、pH值、生物量和碱度(ALK)采用标准方法测定^[12],产气量通过湿式气体流量计(LML-1,长春汽车滤清器有限责任公司)测定,气体组成和挥发酸组成采用气相色谱测定(SP-6800A和SP6890,山东鲁南瑞虹化工仪器有限公司)^[13]。

1.5 PCR-DGGE 分析

在UASB和CSTR运行达到稳定时(第165d和第100d),分别从反应区采集污泥样品。采用DNA提取试剂盒提取厌氧活性污泥总DNA(MO Bio Laboratories, Inc., Carlsbad, CA, USA),其PCR及DGGE分析参照Wan等^[14]提供的方法进行。所用古细菌通用引物序列为:344F,5'-ACGGGGYGCAGCAGGCGCGA-3',带GC夹;915R,5'-GTGCTCCCCCGCCAATTCCT-3'。测序结果与国家生物技术信息中心(NCBI, <http://www.dtd.nlm.nih.gov>)的BlastX进行序列比对,并挑选目标序列用MEGA 3.1软件构建系统发育树。

2 结果与讨论

2.1 反应器运行特性

UASB在启动运行165d后在进水COD $2000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、HRT 8h条件下达到运行稳定状态,而CSTR则在运行100d后在进水COD $4000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、HRT 16h条件下达到运行稳定,二者在稳定运行期间的有机负荷率(OLR,以COD计)均为 $6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$,其稳定期的控制参数与运行特征参数如表1所示。在OLR $6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 相同的条件下,UASB的COD去除率为95%,显著高于CSTR的84%。从表1可知,在稳定运行期,UASB的生物量为 $8.5\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,显著高于CSTR的 $5.9\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。较高的生物量使废水厌氧生物处理系统具有更高的有机物去除效能^[10],这可能是导致UASB的COD去除率显著高于CSTR的主要原因。

两种连续流厌氧反应系统中的污泥持有量之所以有较大差别,与反应器的类型有直接关系^[10-11]。UASB 系统中污泥大多以颗粒形式存在,而颗粒污泥具有良好的沉降性能,可以实现 HRT 与固体停留时间(SRT)的有效分离,从而可以持有较高的生物量^[10]。而 CSTR 系统,由于机械搅拌作用使得污泥主要以絮状结构存在,在水力冲刷作用下,较小的絮体容易流失,因而表现出在生物量持有水平上的有限性^[11]。另一方面,搅拌的引入,无疑会提高系统的传质效率,从而显著提高污泥的活性及污染物去除效能^[11]。因此,CSTR 系统中的活性污泥表现出了更高的比产甲烷速率和比 COD 去除率,分别为 $315\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.85\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,显著高于 UASB 的 $260\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.67\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (表 1)。

然而,在运行稳定期(表 1),CSTR 出水中残留的乙酸和总挥发酸(VFAs)都要高于 UASB。现已了解到,在含有 2 个及 2 个以上碳原子的有机物中,乙酸是唯一可以被产甲烷菌利用的,而不同的产甲烷菌对乙酸的亲和力和转化效率存在较大差别,这可能是导致 UASB 和 CSTR 系统污泥比产甲烷活性表现出较大差异的另一个原因^[4,15-16,18]。为证实该推断,采集 UASB 和 CSTR 系统在运行稳定期的活性污泥样品,并利用 PCR-DGGE 技术对其产甲烷菌群组成进行了解析。

2.2 产甲烷菌群组成及系统发育分析

为了探究厌氧污泥中产甲烷菌群组成与反应器运行特

表 1 UASB 和 CSTR 反应器运行特征

Table 1 Summary of the conditions and performances of UASB and CSTR reactors

特征参数	反应器	
	UASB	CSTR
控制参数		
进水 COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2000	4000
进水 pH 值	7.1	7.1
水力停留时间/h	8	16
容积负荷/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)	6.0	6.0
运行特征参数		
出水 pH 值	7.5	7.4
COD 去除率/%	95	84
污泥主要形态	颗粒	絮状
污泥生物量/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	8.5	5.9
污泥负荷/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	0.7	0.9
比产甲烷速率/($\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	260	315
污泥比 COD 去除率/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	0.67	0.85
总挥发酸/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	75	240
乙酸/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	40	85
丙酸/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	35	135
丁酸/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0	20

注:表中数据均为稳定运行期的平均值。

Note: Data in the table are mean value of stable operation period.

性之间的内在联系,对 UASB 和 CSTR 稳定期的污泥样品进行了 16S rRNA 基因的 PCR-DGGE 指纹分析,结果如图 1 所

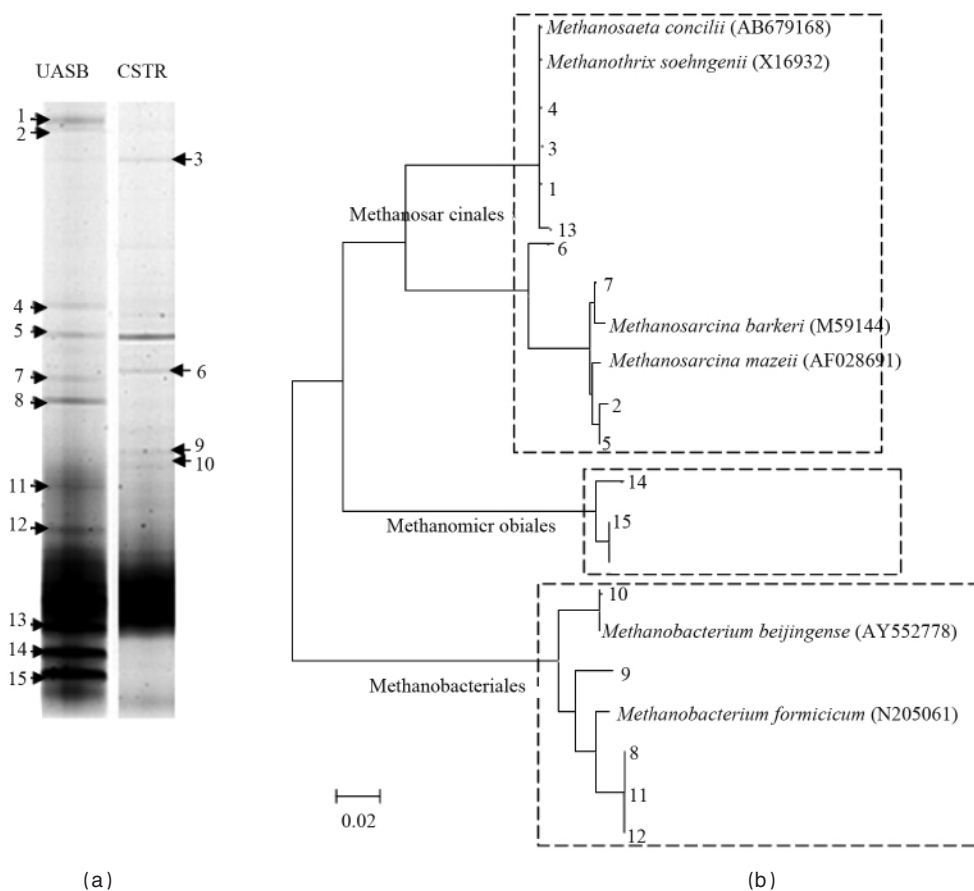


图 1 古细菌指纹图谱(a)及系统发育树(b)

Fig. 1 Fingerprint analysis (a) and phylogenetic tree (b) of methanogen

示。从 UASB 和 CSTR 两个反应器的厌氧污泥样品中共分离到 15 个古细菌特征条带(图 1(a)),其中从 UASB 污泥样品中分离到 11 个特征条带,从 CSTR 污泥样品中分离到 5 个特征条带。对这 15 个特征条带回收、测序、序列比对并构建系统发育树,结果表明(图 1(b)),15 个特征条带代表的古菌均与广古菌门(*Euryarchaeota*)中的产甲烷菌最为相似,其中标号为 1,3,4 和 13 的 4 个条带与 *Methanosaeta concilii* 的相似性为 99% 以上,乙酸是其可以利用的唯一碳源^[4]。标号为 2,5,6 和 7 的 4 个条带与 *Methanosarcina mazeii* 的相似性为 97% 以上,而该菌具有利用乙酸、甲醇、甲胺以及 H_2/CO_2 等多种碳源进行增殖的特性^[4]。条带 14 和 15 与 *Methanospirillum hungatei* 具有 98% 以上的相似性,条带 8,9,11 和 12 与 *Methanobacterium formicicum* 的相似性大于 97%,条带 10 则与 *Methanobacterium beijingense* 高度相似(>99%)。据报道^[4,15-16],产甲烷菌 *Methanospirillum hungatei*、*Methanobacterium formicicum* 和 *Methanobacterium beijingense* 只能以 H_2/CO_2 和

甲酸作为其增殖代谢的碳源。

2.3 产甲烷菌群落结构与系统运行特征的关系

DGGE 检测结果(表 2)表明,从 UASB 污泥样品中检测到 11 个条带分属于 *Methanosaeta*、*Methanosarcina*、*Methanospirillum* 和 *Methanobacterium* 4 个产甲烷菌属,而在 CSTR 污泥样品中检测出的 5 个条带则分属于 3 个产甲烷菌属,即 *Methanosaeta*、*Methanosarcina* 和 *Methanobacterium*。可见,UASB 中的产甲烷菌的多样性远大于 CSTR。由 DGGE 图谱上各个条带的信号强度可以观察到,UASB 中的产甲烷菌群的优劣势也要显著高于 CSTR(图 1(a))。分析认为,形成这一差别的原因可能与反应器的结构型式和运行模式有关。在升流式条件下(UASB),更有利于污泥的聚集和颗粒化,而污泥的颗粒化不仅可提高反应器的污泥持有量,还有利于代谢速率相对较慢、增殖世代长的微生物的富集^[7]。而在机械搅拌的条件下(CSTR),由于搅拌的剪切作用,污泥不易颗粒化,不利于增殖世代长的微生物的富集^[10]。

表 2 产甲烷菌在 UASB 和 CSTR 中的区别及其主要代谢特性

Table 2 Distribution and metabolism characteristics of methanogens in the UASB and the CSTR

菌属	分布		形态	代谢特性	参考文献
	(图 1 中条带编号)				
	UASB	CSTR			
<i>Methanosaeta</i>	1,4,13	3	丝状菌	乙酸为唯一碳源;可利用较低浓度的乙酸,代谢速率较低,增殖较慢,可为颗粒污泥的形成提供“骨架”	[4],[16]
<i>Methanosarcina</i>	2,5,7	5,6	八叠球菌	乙酸、甲酸、 H_2/CO_2 等为碳源,优先利用乙酸;要求乙酸浓度较高,代谢速率较高,增殖较快,具荚膜且凝聚成团	[4],[16]
<i>Methanospirillum</i>	14,15	—	螺旋菌	利用甲酸和 H_2/CO_2 ;氢分压阈值较低,增殖较慢	[4],[18]
<i>Methanobacterium</i>	8,11,12	9,10	杆菌	利用甲酸和 H_2/CO_2 ;氢分压阈值较高,增殖较快	[4],[15]

反应器的结构类型和运行方式对系统中污泥的形态结构和微生物群落结构有直接影响,进而决定了反应器的运行特性。在 UASB 中,可以形成结构紧密的颗粒污泥,使系统持有更高的生物量($8.5g \cdot L^{-1}$),其 COD 去除率平均达到了 95% (表 1)。而搅拌系统 CSTR 不利于颗粒污泥的形成,其生物量($5.9g \cdot L^{-1}$)远低于 UASB,其 COD 去除率也只有 84%。此外,UASB 和 CSTR 在 COD 去除效能方面表现出的差异,可能也和系统中优势产甲烷菌的组成有直接关系。

UASB 系统中利用乙酸和利用 H_2/CO_2 、甲酸的优势产甲烷菌分别为 *Methanosaeta concilii* (条带 13) 和 *Methanospirillum hungatei* (条带 14,15)(图 1)。*Methanosaeta concilii* 代谢乙酸的半饱和常数 K_s 为 $0.5-0.7mmol \cdot L^{-1}$,说明其对乙酸的亲和力强^[6],能够利用较低浓度的乙酸,从而使得 UASB 系统出水乙酸浓度维持在较低水平 ($\leq 40mg \cdot L^{-1}$)(表 1)。而 *Methanospirillum hungatei* 利用氢气的氢分压阈值较低 ($3-5Pa$)^[18],可以将系统中的氢分压降低到较低的水平,进而促进了丙酸、丁酸等 VFAs 的互营厌氧氧化,因此 UASB 出水中的丙酸、丁酸浓度也相对较低(表 1)。可见,厌氧生物处理

系统以 *Methanosaeta concilii* 和 *Methanospirillum hungatei* 为优势产甲烷菌时,更有利于 VFAs 的进一步代谢和更多甲烷的生成,从而显著提高了系统的 COD 去除率和甲烷产量。CSTR 系统中利用乙酸和利用 H_2/CO_2 、甲酸的优势产甲烷菌分别为 *Methanosarcina mazeii* (条带 5) 和 *Methanobacterium formicicum* (条带 9,10)(图 1)。*Methanosarcina mazeii* 代谢乙酸的 K_s 为 $3-5mmol \cdot L^{-1}$,其对乙酸的亲和力远低于 *Methanosaeta concilii*^[6],这意味着其代谢需要较高的乙酸浓度,从而导致 CSTR 系统出水乙酸残留量 ($\geq 85mg \cdot L^{-1}$) 显著高于 UASB (表 1)。再者,利用 H_2/CO_2 的 *Methanobacterium formicicum* 的氢分压阈值为 $10-15Pa$ ^[18],远大于 *Methanospirillum hungatei* 的氢分压阈值 ($3-5Pa$),而较高的氢分压不利于丙酸、丁酸的互营厌氧氧化,导致 CSTR 系统出水检测到的丙酸、丁酸浓度显著高于 UASB,而 COD 去除率和甲烷产量也因此受到限制(表 1)。

在 OLR 相同的条件下,UASB 系统虽然具有更高的 COD 去除率,但其污泥的比活性(包括比产甲烷速率和比 COD 去除速率)却低于 CSTR(表 1)。分析认为,形成这一差别的原因

仍然与反应器的构型和运行模式相关。尽管污泥的颗粒化可以显著提高 UASB 的污泥持有量,但也同时降低了微生物与废水的接触面积和传质效率,这必然导致污泥的比活性下降。而 CSTR 中厌氧活性污泥成絮状结构且处于紊流状态,其传质效能较 UASB 具有更大的优越性^[10],从而使污泥表现出更高的比活性。UASB 和 CSTR 在污泥比活性方面表现出的差异还可能与微生物群落组成有关。CSTR 和 UASB 系统中利用乙酸的优势菌分别为 *Methanosarcina mazeii* 和 *Methanosaeta concilii*,而 *Methanosarcina mazeii* 对乙酸的利用率要显著高于 *Methanosaeta concilii*^[16],这是 CSTR 系统污泥的比活性要显著高于 UASB 系统的另一个重要原因。

3 结论

(1) 在有机负荷率为 $6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 的条件下,UASB 系统较 CSTR 系统具有更高的 COD 去除率,但污泥的比产甲烷速率和比 COD 去除率要低于 CSTR 系统。

(2) UASB 系统的优势产甲烷菌为 *Methanosaeta concilii* 和 *Methanospirillum hungatei*,CSTR 系统中的优势产甲烷菌为 *Methanosarcina mazeii* 和 *Methanobacterium formicicum*,污泥微生物群落组成及其代谢特征的不同是造成厌氧处理系统效能差异的内在原因。

(3) 反应器的结构类型和运行模式对系统中污泥的形态结构和微生物群落结构有直接影响,进而决定了反应器的运行特性。UASB 和 CSTR 在 COD 去除效能和污泥比活性方面各有所长,在实际应用中,须根据废水水质和预期处理程度合理选用。

参考文献 (References)

- [1] Angenent L T, Karim K, Al-Dahhan M H, *et al.* Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater [J]. *Trends in Biotechnology*, 2004, 22(9): 477-485.
- [2] Nishio N, Nakashimada Y. Recent development of anaerobic digestion processes for energy recovery from wastes [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2007, 103(2): 105-112.
- [3] Briones A, Raskin L. Diversity and dynamics of microbial communities in engineered environments and their implications for process stability [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14(3): 270-276.
- [4] Liu Y, Whitman W B. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea [J]. *Annals of New York Academy of Sciences*, 2008, 1125: 171-189.
- [5] Díaz E E, Stams A J M, Amils R, *et al.* Phenotypic properties and microbial diversity of methanogenic granules from a full-scale upflow

- anaerobic sludge bed reactor treating brewery wastewater [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(7): 4942-4949.
- [6] Tabatabaei M, Zakaria M R, Rahim R A, *et al.* PCR-based DGGE and FISH analysis of methanogens in an anaerobic closed digester tank for treating palm oil mill effluent (POME) [J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2009, 12(3): 1-12.
- [7] 高瑞芳,袁旭峰,王小芳,等.高浓度酒精废水厌氧处理工程系统中古菌多样性及其代谢特征 [J]. *微生物学通报*, 2011, 38(4): 468-473. Gao Ruifang, Yuan Xufeng, Wang Xiaofang, *et al.* *Microbiology China*, 2011, 38(4): 468-473.
- [8] Liu Y, Xu H L, Show K Y, *et al.* Anaerobic granulation technology for wastewater treatment [J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2002, 18(2): 99-113.
- [9] Atashi H, Ajamein H, Ghasemian S. Effect of operational and design parameters on removal efficiency of a pilot-scale UASB reactor in a sugar factory [J]. *World Applied Sciences Journal*, 2010, 11(4): 451-456.
- [10] Li J, Li N, Zhang N, *et al.* Hydrogen production from organic wastewater by fermentative acidogenic activated sludge under condition of continuous flow [J]. *Journal of Chemical Industrial and Engineering*, 2004, 55(S1): 75-79.
- [11] Antonopoulou G, Gavala H N, Ioannis V, *et al.* Biofuels generation from sweet sorghum: Fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 9 (1): 110-119.
- [12] Greenberg A E. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. 19th ed. Washington DC: American Public Health Association, 1995.
- [13] Li J, Zheng G, He J, *et al.* Hydrogen-producing capability of anaerobic activated sludge in three types of fermentations in a continuous stirred-tank reactor [J]. *Biotechnology Advance*, 2009, 27(5): 573-577.
- [14] Wan C, Du M, Lee D, *et al.* Electrokinetic remediation and microbial community shift of β -cyclodextrin-dissolved petroleum hydrocarbon-contaminated soil [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 89 (6): 2019-2025.
- [15] Schauer N L, Ferry J G. Metabolism of formate in *Methanobacterium formicum* [J]. *Journal of Bacteriology*, 1980, 142(3): 800-807.
- [16] Ma K, Liu X L, Dong X Z. *Methanobacterium beijingense* sp. nov., a novel methanogen isolated from anaerobic digesters [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2005, 55 (1): 325-329.
- [17] 郭晓磊,胡勇有,高孔荣.厌氧颗粒污泥及其形成机理 [J]. *给水排水*, 2000, 26(1): 33-38. Guo Xiaolei, Hu Yongyou, Gao Kongrong. *Water and Wastewater Engineering*, 2000, 26(1): 33-38.
- [18] Thauer R K, Kaster A K, Seedorf H, *et al.* Methanogenic archaea: Ecologically relevant differences in energy conservation [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, 6(8): 579-591.

(责任编辑 岳臣)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。