

两种厌氧反应器培养颗粒污泥的对比试验

杨世关^{1,2}, 赵青玲¹, 张杰³, 张百良¹

(1. 河南农业大学农业部可再生能源重点开放实验室, 郑州 450002; 2. 南京大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093; 3. 华北水利水电学院环境工程系, 郑州 450002)

摘要: 以养猪场废水作为试验用水, 对在 IC 和 UASB 反应器内培养厌氧颗粒污泥的过程进行了对比试验, 并对培养出的颗粒污泥的特性进行了对比分析。结果表明: 经过 54d 培养, 通过不同孔径的筛网进行测试, 发现 IC 反应器内形成的颗粒污泥的直径多数在 1~4 mm 之间, 其中 2~3 mm 的污泥质量占污泥总质量的比例最大, 为 28.5%, 并且有大于 5 mm 的颗粒污泥产生; 而 UASB 内形成的颗粒污泥直径多数在 1~3 mm 之间, 其中 1~2 mm 的污泥质量占污泥总质量的比例最大, 为 38.7%, 且没有发现大于 5 mm 的颗粒污泥。

关键词: IC (内循环) 反应器; UASB 反应器; 颗粒污泥培养; 养猪场废水

中图分类号: X713

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)1-0183-05

杨世关, 赵青玲, 张杰, 等. 两种厌氧反应器培养颗粒污泥的对比试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 183-187.

Yang Shiguan, Zhao Qingling, Zhang Jie, et al. Comparative experiment of anaerobic granular sludge cultivation in two kinds of anaerobic reactors[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 183-187. (in Chinese with English abstract)

0 引言

内循环厌氧反应器(IC)是在 UASB(升流式厌氧污泥床)反应器的基础上发展起来的一种新型高效厌氧反应器, 被认为是目前效率最高的厌氧反应器^[1]。IC 和 UASB 的共同特点是都能使厌氧污泥颗粒化, 但由于结构上的差异, 这两类反应器的颗粒污泥培养过程, 以及形成的颗粒污泥的特性都有所不同。由于颗粒污泥在 IC 厌氧反应器中占有重要地位, 但是目前中国又没有掌握在 IC 反应器水力条件下培养颗粒污泥的关键技术, 所以中国 IC 厌氧反应器多数采用荷兰进口颗粒污泥接种^[2]。因此, 本文通过接种猪场废水一级沉淀池的絮状污泥, 对这两种反应器在水力条件下培养颗粒污泥的过程, 以及培养出的颗粒污泥的特性进行了对比试验和分析, 为探索 IC 反应器在水力条件下培养颗粒污泥提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

IC 反应器及 UASB 反应器处理猪粪废水的试验系统流程如图 1 所示。该系统主要由 IC 反应器、UASB 反应器、污水泵、辅助热源、气体流量计等组成。其中, IC

反应器和 UASB 反应器均采用有机玻璃加工制作, IC 反应器总高度为 2.17 m, 直径为 0.25 m, 有效容积 0.088 m³, 反应器内循环系统的气体提升管高 1.08 m, 直径 0.025 m, 回流管外置, 直径 0.03 m。IC 反应器在结构上由污泥床反应区、精细处理区、布水器、三相分离器、气体提升管、污泥回流管和气液分离器等组成。UASB 反应器总高度为 1.4 m, 直径 0.21 m, 反应区有效高度为 1.3 m, 有效容积为 0.4 m³。

IC 反应器如同两个 UASB 反应器上下叠加而成。上部设有一个气水分离器。分离器通过沼气收集管、沼气提升管、回流管与下面的反应器主体相连接。其工作原理如下: 废水由水泵泵入反应器底部的布水系统, 在底部废水与从回流管回流的混合液进行充分混合后进入反应器下部的膨胀污泥床区, 在该反应区大部分可降解 COD 被转化为沼气, 沼气由一级三相分离器收集。在沼气气泡产生的膨胀功推动下, 产生气提作用, 沼气携带水和污泥经沼气提升管上升至反应器顶部气液分离器内, 在分离器内气体分压较低, 使得沼气与污水和污泥实现分离, 分离出的沼气被引出反应器, 而分离出的污泥和污水的混合液则沿着回流管下降到反应器底部的混合区, 并与进水充分混合后再次进入污泥膨胀床区, 这样废水就在反应器内形成了一个内部循环。经过处理后的废水除一部分重新参与内部循环外, 其余部分则经一级三相分离器上升到反应器的精细处理区, 在该反应区没有被下部反应区分解的 COD 被进一步降解并产生沼气, 混合液则经二级三相分离器分离后进入上部的沉淀区, 经过澄清的上清液最终经溢流堰排出反应

收稿日期: 2005-11-15 修订日期: 2006-11-22

基金项目: 河南省教育厅科技攻关项目(2004922042)

作者简介: 杨世关(1971-), 男, 副教授, 主要从事废水处理及其资源化利用方面的研究。郑州市文化路 95 号 农业部可再生能源重点开放实验室, 450002。Email: shiguanyang@126.com

器,沉淀下来的污泥重新返回到反应器,而产生的沼气则被二级三相分离器收集后释放到气液分离器与膨胀床区产生的沼气一起被引出。与 UASB 相比,IC 具有更

高的运行可靠性,具有很高的容积负荷率,出水水质更为稳定^[1,9]。

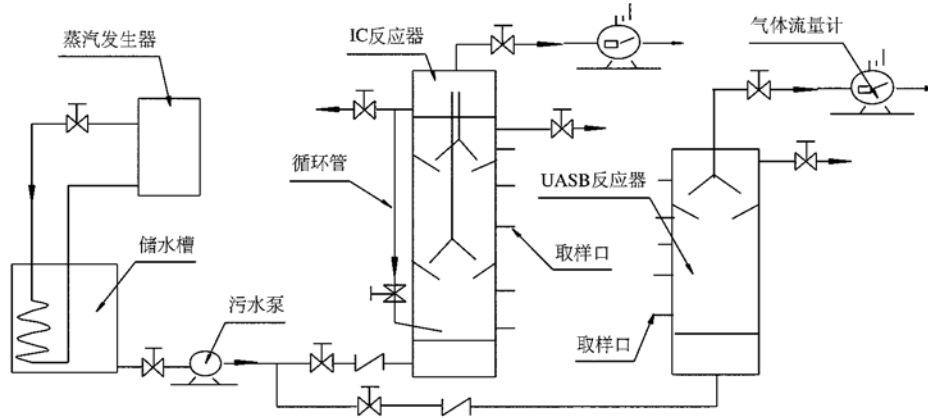


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of the experiment system

1.2 试验用废水

试验用水为养猪场废水,水质如表 1 所示。试验中根据需要通过稀释的方法调节其 COD 浓度。

表 1 猪场废水水质

Table 1 Quality of hoggerly wastewater

项目	测定值	项目	测定值
COD/mg · L ⁻¹	1043.6~ 7582.94	TN/mg · L ⁻¹	112~ 1134
TP/mg · L ⁻¹	66~ 929.76	pH 值	7.01~ 7.7
SS/mg · L ⁻¹	774.6~ 3164.7	NH ₃ -N/mg · L ⁻¹	152.6~ 240.8

1.3 接种污泥

试验用接种污泥取自郑州种猪场废水一级沉淀池,为深灰褐色絮状污泥。经测定污泥体积指数为 132.7 mL/gTSS,污泥的 TSS 为 38.64 g/L, VSS 为 19 g/L,比甲烷活性 1.06。两种反应器内的污泥接种量均为反应器容积的 15%。

1.4 分析项目及方法

COD: 采用重铬酸钾法。

SVI: 取浓度约为 2 gTSS/L 的污泥悬浮液,均匀混合后置于 1000 mL 量杯中,经过 30 min 沉降后读取污泥体积 V ,然后弃去上清液,烘干后称其质量 m ,然后通过 V/m 求得。

污泥颗粒分布: 取一定量的污泥,使其顺序通过孔径分别为 5、4、3、2、1 mm 筛网,将各筛网所截留的污泥收集、烘干并称重,即可计算不同粒径范围颗粒污泥的质量占污泥总质量的百分比,由此,可以得出按质量计算的颗粒污泥的粒径分布。

2 试验结果与分析

2.1 试验过程

试验过程中,反应器的运行温度控制在 32~ 35℃;为了满足微生物的生长要求,将 pH 值调整到适宜甲烷菌生长所需的范围 6.5~ 7.8;反应器内悬浮物 SS 的含量控制在 774.6~ 3146.7 mg/L 之间。开始阶段,首先在两个反应器内对接种污泥进行了 34 d 的驯化。驯化初期,先以人工配水对污泥进行驯化,人工配水是以葡萄糖为基质按微生物生长的需要配制而成,然后逐渐用猪场废水代替人工配水。当猪场废水完全代替人工废水后,且出水 COD 达到 1000 mg/L 以下时,污泥驯化完成。驯化过程中两个反应器进水和出水浓度变化如表 2。

然后依次在 3 个进水浓度,即 2000, 4000 和 6000 mgCOD/L 水平条件下,进行了为期 54 d 的污泥培养试验。运行过程中根据污泥的承受能力,逐渐增加反应器进水流量和进水有机负荷。IC 反应器在正式运行后的第 16 d 时,内循环现象开始出现,此后,绝大部分时间里内循环现象都能保持。这期间对循环水量进行测定,发现随反应器产气率和进水有机负荷率的变化,内循环水量在 0.8~ 3.3 L/h 之间变动。

试验过程中两个反应器与颗粒污泥形成有关的主要运行参数,包括有机负荷率、进水水力负荷、COD 去除率以及产气率等的变化见图 2。需要说明一点的是由于 IC 反应器上下两个反应区流速不同,图 2 中的流速是采用进水流量除以反应器截面积计算得来的。

表 2 IC 和 UASB 反应器驯化过程中进水和出水 COD 的变化

Table 2 COD changes of inflow and outflow wastewater during the cultivation of sludge in IC and UASB reactor

时间/d	1	3	6	9	12	15	18	21	25	28	31	34
人工配水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2034.5	1968.7	2006.9	2103.7	2118.1	2004.7	1997.3	1562.1	1498.3	0	0	0
废水进水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	0	0	0	0	0	0	524.7	562.1	2036.4	2109.5	2064.7
IC 出水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2034.5	1852.4	1689.5	1475.3	1156.4	987.3	976.1	1342.5	994.3	1333.5	1077.8	989.5
UASB 出水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2034.5	1911.3	1697.4	1523.6	1084.6	992.0	994.8	1426.9	986.7	1296.3	1008.4	996.7
IC 的 COD 去除率/%	0	0.06	0.16	0.30	0.45	0.51	0.51	0.36	0.52	0.35	0.49	0.52
UASB 的 COD 去除率/%	0	0.03	0.15	0.28	0.49	0.51	0.50	0.32	0.52	0.36	0.52	0.52

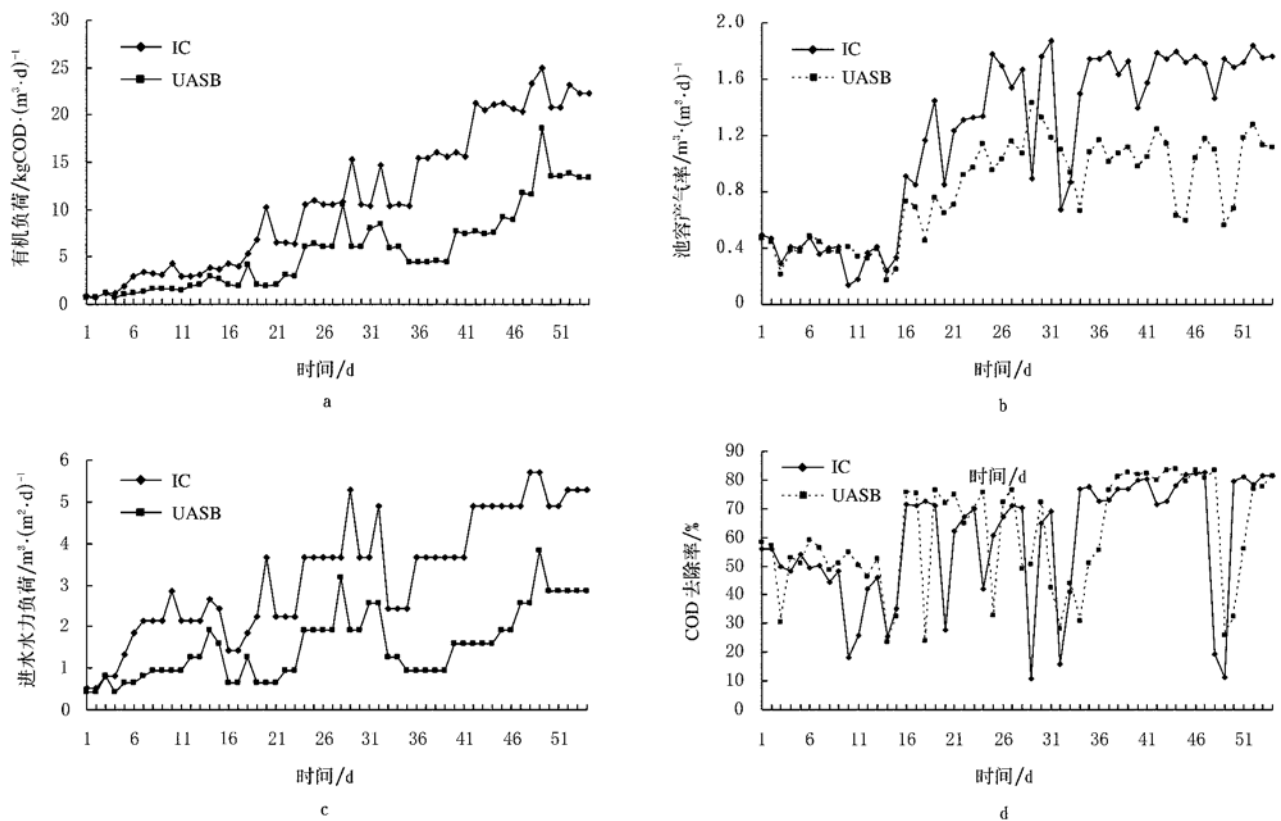


图 2 IC 及 UASB 反应器主要运行参数变化

Fig. 2 Changes of main running parameters for IC and UASB reactor

试验过程中, 三种进水浓度水平下污泥的变化见表 3。

由图 2 可以看出, 在开始启动阶段, 两个反应器的进水水力负荷(图 2c)和有机负荷(图 2a)都保持在较低水平, 以便给反应器一个相对稳定的适应期, 而且两个反应器的这两个运行参数基本相同。随着运行时间的延长, 两个反应器的进水水力负荷和有机负荷逐渐提高, 在第 5~15 d 这段时间内, IC 反应器的水力负荷和有机负荷比 UASB 的平均高出了约 $1.13 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $1.52 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 但是, 这段时间两反应器的平均池容产气率(图 2b)基本相同。在第 16~32 d 这段时间内, IC 反应器的水力负荷、有机负荷和产气率平均比 UASB 高出约 $1.59 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $5.02 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot$

$\text{d})$ 和 $0.355 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。而在第 32~54 d 这段时间内, IC 反应器的水力负荷、有机负荷和产气率平均比 UASB 高出约 $2.43 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $9.45 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 和 $0.99 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。因此, 随着运行时间的不断延长, IC 比 UASB 表现出了承受更高水力负荷和有机负荷的能力, 而且随着这两个运行参数的变化, IC 与 UASB 的产气率之间的差别也在不断增大。

将表 3 所列污泥的变化与图 2 所示的反应器的运行参数的变化结合起来分析可以发现: 在两个反应器运行的第一阶段, IC 反应器内少量颗粒污泥的产生主要应归功于高水力负荷的作用; 而之后影响两反应器内颗粒污泥形成的主要因素应是由水力负荷与产气率联合形成的选择压, 因为有研究发现选择压对污泥颗粒化起

着很大的作用,而且高选择压更有利于大直径颗粒污泥的形成^[12,16]。由于绝大部分运行时间内 IC 反应器的水力负荷与产气率均高于 UASB,所以高选择压应是导致

IC 反应器内产生直径大于 5 mm 颗粒污泥的主要原因之一。

表 3 IC 和 UASB 反应器运行过程及污泥变化

Table 3 Running conditions of IC and UASB and changes of the sludges

反应器	进水浓度 /mgCOD·L ⁻¹	进水流量 /L·d ⁻¹	运行时间 /d	试验周期结束时厌氧污泥变化
IC	2000	24~105	15	污泥颜色呈黑褐色,大部分呈絮状,有少量粒径小于 0.5 mm 的颗粒污泥产生
	4000	70~180	17	污泥颜色变为灰褐色,颗粒污泥大量出现,多数直径在 2 mm 左右
	6000	120~240	22	污泥颜色变为灰色,颗粒污泥布满整个污泥床反应区,发现有直径大于 5 mm 的颗粒污泥
UASB	2000	13~40	15	污泥颜色呈黑褐色,以絮状形态存在,没有发现颗粒污泥产生
	4000	20~80	17	污泥颜色变为灰褐色,颗粒污泥大量出现,多数直径在 1 mm 以下,有少量直径大于 2 mm
	6000	40~90	22	污泥颜色变为灰色,颗粒污泥布满整个污泥床反应区,多数直径在 1~3 mm 之间

2.2 颗粒污泥的粒径分布

反应器运行 54 d 后,分别从两种反应器的取样口取样观察发现:两种反应器内的污泥粒径均是自下而上减小。对两种反应器内底部的颗粒污泥粒径的分布情况进行测定,结果见图 3。

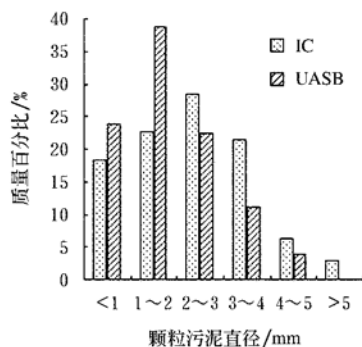


图 3 两种反应器内污泥粒径分布

Fig. 3 Diameter distribution of granular sludge in IC and UASB reactors

由图 3 可以看出,比较两种反应器,IC 反应器中颗粒粒径较大,粒径在 3 mm 以上的颗粒污泥占 28.5%,而 UASB 反应器中粒径在 3 mm 以上的颗粒污泥仅占 15%;另外,IC 反应器中有粒径超过 5 mm 的颗粒污泥,而在 UASB 中没有发现。

造成这种差异的原因主要是两种反应器内不同的运行条件:水力负荷方面,绝大多数时间里,IC 反应器比 UASB 反应器高出 0.5~3.3 m³/(m²·d);有机负荷方面,多数时间 IC 反应器比 UASB 反应器高出 2~12 kgCOD/(m³·d);以上数据还没有将 IC 反应器内循环的贡献计算在内。IC 反应器的高水力负荷和有机负荷,一方面有利于营养物质从水中向颗粒污泥内部传递,使内部的微生物有充足的营养供应;另一方面,也有利于微生物代谢产物的释放,从而使大粒径的颗粒污泥得以生成和存在^[4]。此外,由于 IC 反应器的两个运行条

件迥然不同的反应区的存在,使得其所形成的颗粒污泥的粒径分布范围比 UASB 反应器更大。

3 结 论

1) 与 UASB 相比,IC 反应器的水力条件更有利于厌氧污泥的颗粒化。

2) 由于 IC 反应器的水力条件比 UASB 的相对复杂,所以在 IC 反应器内形成的颗粒污泥的粒径分布的不均匀性要高于 UASB 内的颗粒污泥;同样由于较好的水力条件提供了好的传质条件,IC 反应器内形成的大粒径颗粒污泥的比例要高于后者,且有粒径大于 5 mm 的颗粒污泥生成,而在 UASB 内则没有发现。

[参 考 文 献]

- [1] 胡纪萃. 试论内循环厌氧反应器[J]. 中国沼气, 1999, 17(2): 3-6.
- [2] 吴 静, 陆正禹, 胡纪萃, 等. 新型高效内循环(IC)厌氧反应器[J]. 中国给水排水, 2001, 17(1): 26-29.
- [3] 赵一章, 邓 宇, 尹小波, 等. 产甲烷细菌及其研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1997.
- [4] Cristiano Nicolella, Mark C M van Loosdrecht, Sef J Heijnen. Particle-based biofilm reactor technology [J]. TIBTECH, 2000, 18: 312-320.
- [5] Shivayogimath C B, Ramanujam T K. Treatment of distillery spentwash by hybrid UASB reactor[J]. Bioprocess Engineering, 1999, 21: 255-259.
- [6] 李宗义, 王海磊, 陈彦伟, 等. 成熟厌氧颗粒污泥的结构及特征[J]. 微生物学通报, 2003, 30(3): 56-59.
- [7] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
- [8] Pereboom J H F. Size distribution model to methanogenic granules from full scale UASB reactor [J]. Wat Sci Technol, 1994, 30(12): 211-221.
- [9] Pereboom J H F, Vereijken T L F M. Methanogenic granule development in full scale internal circulation reac-

- tors[J]. *Wat Sci Technol*, 1994, 30(8): 9– 21.
- [10] 杨秀山, 田 沈, 郑 颖, 等. 固定化甲烷八叠球菌 (*Methanosarcina*) 研究——厌氧颗粒污泥的形成[J]. *中国环境科学*, 1998, 18(4): 356– 359.
- [11] 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.
- [12] L W Hulshoff Pol, S I de Castro Lopes, G Lettinga, et al. Anaerobic sludge granulation[J]. *Water Research*, 2004, 38: 1376– 1389.
- [13] Lettinga G, Field J, Van Lier J, et al. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future[J]. *Water Science Technology*, 1997, 35(10): 5– 12.
- [14] 贺延龄. 废水厌氧处理技术的新进展— IC 反应器在造纸工业上的应用[J]. *纸和造纸*, 2001, 6: 45– 48.
- [15] 丁丽丽, 任洪强, 华兆哲, 等. 内循环式厌氧反应器启动过程中颗粒污泥的特性[J]. *环境科学*, 2001, 22(3): 30– 35.
- [16] 郑 平, 冯孝善. 废物生物处理理论和技术[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 1997.

Comparative experiment of anaerobic granular sludge cultivation in two kinds of anaerobic reactors

Yang Shiguan^{1,2}, Zhao Qingling¹, Zhang Jie³, Zhang Bailiang¹

(1. *Key Laboratory of Renewable Energy of Ministry of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;* 2. *State Key Laboratory of Pollution Control & Resources Reuse, Nanjing University, Nanjing 210093, China;* 3. *Environmental Engineering Department of North China of Water Conservancy and Hydroelectric Power College, Zhengzhou 450002, China*)

Abstract: Comparative experiments of anaerobic granular sludge cultivation in Internal Circulation (IC) and Upflow Anaerobic Sludge Bed (UASB) reactors were conducted on treating wastewater from pig farm. It is found that after 54 days cultivation large quantity of granular sludge formed in both reactors, but the diameter of granular sludge in IC reactor is generally larger than that in UASB, most granular sludge diameters vary from 1 to 4 mm in IC comparing 1 to 3 mm in UASB, 2~ 3 mm granular sludge in IC and 1~ 2 mm ones in UASB account for the most proportion, separately reaches 28.5% and 38.7%, at the same time granular sludge with diameter larger than 5 mm were formed only in IC.

Key words: IC reactor; UASB reactor; anaerobic granular sludge cultivation; wastewater from pig farm