

# UASB 反应器处理生活污水的试验研究

杨 琦

(中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083)

施汉昌 钱 易

(清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要** 采用 UASB 中试 ( $100\text{ m}^3/\text{d}$ ) 对生活污水处理进行了研究。试验结果表明, 采用此系统处理生活污水, 出水水质良好。COD 的去除率在 52%~83%, 出水的 COD 值  $<100\text{ mg/L}$  以下, SS 的去除率在 95% 左右, UASB 处理生活污水的最佳停留时间为 6 h。产气率在  $0.1\text{ m}^3/\text{d}$ 。不管停留时间在 10 h、5 h, 出水的氨氮、乙酸值比进水的高; 钙、镁、总氮、总磷、硫酸根和硝酸根离子出水值比进水值低。

**关键词** UASB 中试 生活污水

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1008-9241(2005)11-0075-06

## Study on municipal wastewater treatment with UASB pilot scale

Yang Qi<sup>1</sup> Shi Hanchang<sup>2</sup> Qian Yi<sup>2</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University Geosciences, Beijing 100083;

2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control,  
Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Municipal wastewater treatment with UASB pilot scale ( $100\text{ m}^3/\text{d}$ ) is studied. The results of the experiment indicate: using this system to deal with the municipal wastewater, the quality of effluent water is good. The removal rate of COD is in 52%~83%. The value of COD of effluent water is smaller than  $100\text{ mg/L}$ , the removal rate of SS is about 95%. When UASB is used to treat municipal wastewater, the best retention time is 6 hours. The rate of gas production is  $0.1\text{ m}^3/\text{d}$ . No matter the retention time is 10 hours or 5 hours, the ammonia nitrogen and the values of acetic acid in effluent water are higher than those in influent water. The values of calcium, magnesium, total nitrogen, total phosphorus, both the root of sulfuric acid and root of nitric acid in effluent water are lower than those in influent water.

**Key words** UASB; pilot scale; municipal wastewater

厌氧生物处理技术是目前世界上处理高浓度有机废水经济有效和广泛应用的生物处理技术。特别是新型高效厌氧生物处理反应器 (如 UASB) 出现, 受到世界各国专家学者广泛重视。目前, 国内外主要用它处理高浓度制糖废水、土豆加工废水、淀粉废水、啤酒废水、酒精废水、乳品废水、屠宰废水和造纸废水<sup>[1~7]</sup>。但 UASB 反应器处理生活污水在国内研究较少, 不少国家 (如荷兰、巴西、哥伦比亚和意大利等) 的一些大学研究机构, 针对生活污水浓度低、水量大、中温消化不经济等特点进行了常温试验, 并已有的一些生产性装置投入运行。在荷兰已有 UASB 反应器代替化粪池处理小区居民生活污水的装置。巴西 San Paulo 设计了  $24\,000\text{ m}^3/\text{d}$  和  $14\,500\text{ m}^3/\text{d}$  的城市废水示范处理厂<sup>[8,9]</sup>。哥伦比亚于 1990 年在 Bucaramanga 建立了大型 UASB 反应器与兼性氧

化塘串联处理生活污水的系统, 其中 UASB 反应器总容积为  $6600\text{ m}^3$ 。在印度的 Kanpur 已建立了一座总容积为  $1200\text{ m}^3$  的 UASB 系统, 日处理生活污水  $5000\text{ m}^3$ 。另外, 还有几座大型 UASB 系统 (如巴西 Manaus 的  $7200\text{ m}^3$ 、Diadema 的  $156\text{ m}^3$  等 UASB 反应器) 正在建设中。近年来, 国内一些单位已开展了这方面的研究工作。北京环境保护科学研究所开发了前已述及的厌氧水解好氧工艺。中国市政工程西南设计院较早地开始了厌氧法处理生活污水的研究, 最近又研究了厌氧好氧系统, 其中厌氧采用了加铁屑层作填料的 UASB 反应器。据研究者报道<sup>[10,11]</sup>, 该系统的厌氧段在冬季  $8\sim13^\circ\text{C}$  和 HRT 为

收稿日期: 2004-06-30; 修订日期: 2005-03-21

作者简介: 杨琦 (1966~), 男, 博士, 副教授, 主要从事水处理技术开发研究工作。E-mail: yq@cug.edu.cn

3~4 h的条件下,总 COD 去除率为 35.9%~50.2%。但总的说来,我国在这方面的研究还不多。利用 UASB 反应器处理城市废水或生活污水,经济有效地解决水污染问题,具有重要的意义。本研究目的是探讨 UASB 反应器对生活污水处理的可行性和有关设计放大技术参数。

## 1 试验部分

### 1.1 试验装置

试验装置图如图 1 所示。UASB 反应器用钢板制成,上部为沉淀区,内设三相分离器,反应器长为 3.15 m,宽为 2.10 m,高为 4.5 m,容积为 30 m<sup>3</sup>。沿反应器的高度设有 5 个取样口,其间距为 0.5 m,最下面的一根取样口离地面 0.6 m。整个装置设在实验室的中试基地,进水不采用加热设备,反应器采用高位水箱进水,进水流量用转子流量计计量,沼气的产量采用煤气表计量。

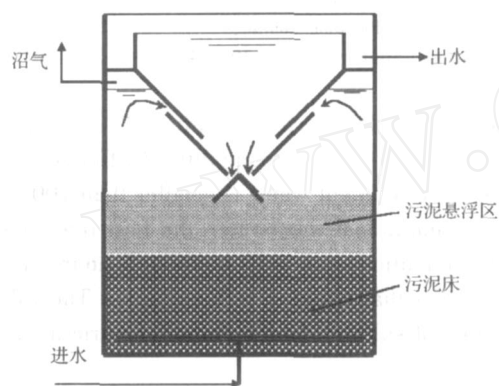


图 1 UASB 试验装置图

Fig. 1 UASB experimental equipment

### 1.2 试验用水水质和接种污泥性状

试验用水取自某生活小区的生活污水。接种污泥分为 2 部分,一部分取自某城市污水厂二沉池脱水后的活性污泥,含水率为 68%,污泥量约 1.5 t, VSS/SS 为 50%。另一部分取自某城市污水厂厌氧消化污泥,含水率为 94%,污泥量为 1 t, VSS/SS 为 84%, SVI 为 78 mL/g,最大产甲烷的速率 18 mL CH<sub>4</sub>/g VSS · h,最大比 COD 去除率为 1.37 kg COD/kg VSS · d,还有少部分为某污水厂氧化沟的好氧污泥,其含水率为 99.6%, VSS/SS 为 73.5%。采用某城市二沉池脱水后的污泥为接种污泥主要作为厌氧微生物的生长和附着的载体,因为脱水后的好氧污泥颗粒大,比表面积大,沉降性能好,有利于

UASB 厌氧反应器的快速启动。消化污泥作为 UASB 的最好、最直接的接种的厌氧污泥,因为用生活污水的消化污泥作 UASB 处理生活污水的接种污泥,生活污水的有机成分较接近,这样更有利于迅速启动 UASB 反应器。

表 1 UASB 中试试验进水水质

Table 1 Quality of effluent water of pilot scale of UASB

| 温度<br>(°C) | COD<br>(mg/L) | SCOD <sup>*</sup><br>(mg/L) | 氨氮<br>(mg/L) | SS<br>(mg/L) | pH |
|------------|---------------|-----------------------------|--------------|--------------|----|
| 11.3~18    | 61~816        | 50~600                      | 20~46        | 28~82        | 7  |

\*即经过滤纸过滤后的 COD

### 1.3 试验条件

研究启动成功的反应器在常温下的不同停留时间及其对 COD 处理效果、悬浮物的处理率、产气率、氨氮、钙离子、镁离子的值、总氮、总磷、硫酸根、硝酸根和有机挥发酸等的影响。

### 1.4 测试项目与方法

测试项目包括 COD、溶解性 COD、碱度、pH、SS、VSS、有机酸、总氮、氨氮和总磷,均采用标准方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 COD 去除效果影响

从图 2 和图 3 可以看出,在水力负荷为 16.48 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d,相应的停留时间分别为 10 h、5 h,其 COD 的去除率分别在 52%~83%和 60%~90%之间,这是由于水力停留时间长,悬浮状的 COD 被颗粒污泥截留,经过厌氧颗粒污泥的水解细菌的作用,把大分子的有机物变为小分子的有机物,再经过产氢产乙酸细菌的作用,把小分子的有机物变为一碳和二碳的化合物,产甲烷菌把一碳和二碳化合物变为甲烷和二氧化碳,水溶性的有机物也经历上述过程把一部分有机物转化为沼气,另一部分的有机物转化厌氧颗粒污泥,由于厌氧消化不彻底,使出水中的有机物含量较高,表现为出水中的 COD 值偏高,众所周知,影响有机物厌氧降解的因素很多,其中温度影响特别大,根据 Arrhenius 反应公式,厌氧生物降解的反应速度随温度升高而加快。根据经验公式,温度每升高 10℃,厌氧反应速率就能增加 2~4 倍,有机物的厌氧消化实质上是复杂的生化反应,也基本遵循化学反应这一规律。由于在停留时间为 10 h 运行时,这是一年四季中春末夏初,厌氧反应

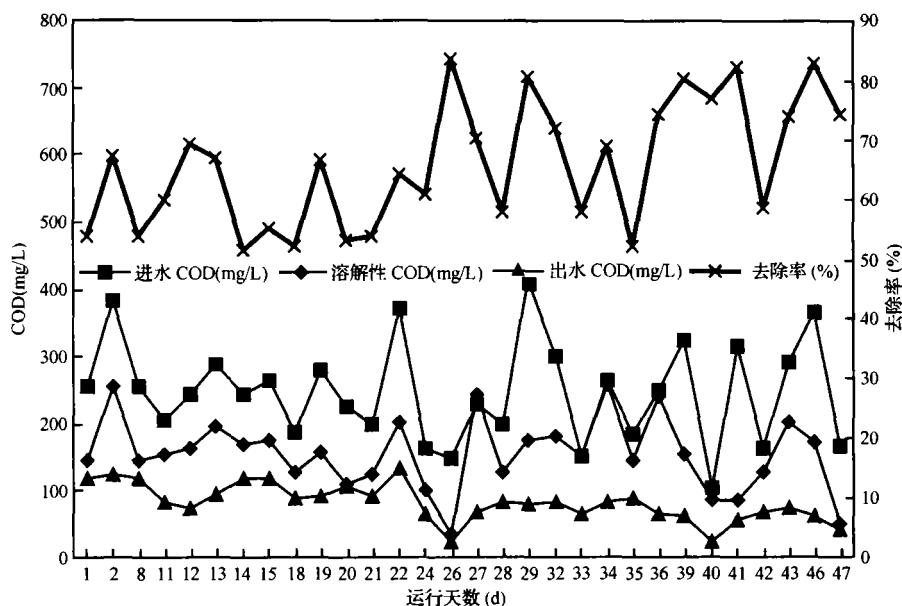


图 2 UASB在停留时间为 10 h的进出水 COD 的值及其去除率随时间的变化关系

Fig. 2 COD of influent water and effluent water and relationship between COD removal rate and time at 10 hours of UASB retention time

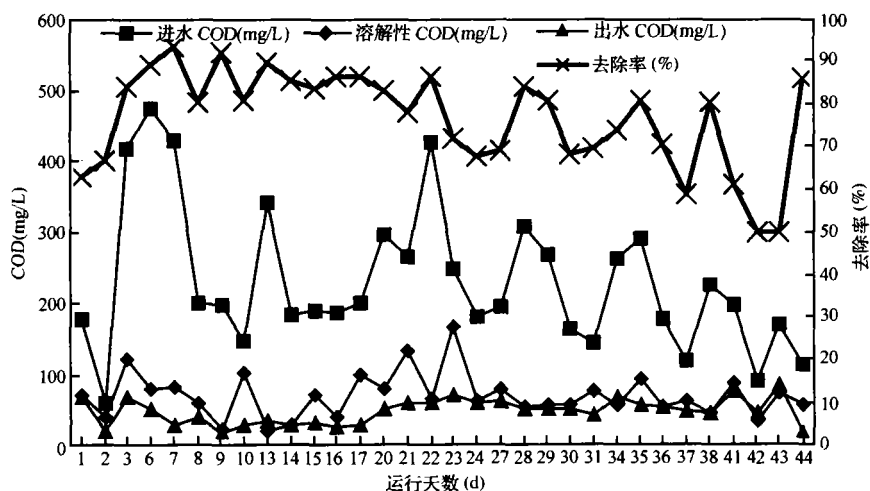


图 3 UASB在停留时间 5 h进出水 COD 的值及其去除率随时间的变化关系

Fig. 3 COD of influent water and effluent water and relationship between COD removal rate and time at 5 hours of UASB retention time

环境温度相对较低,这就影响有机物去除效果,造成了出水的 COD 的值较高。从反应器实验结果看停留时间在 5 h 和 10 h, COD 去除率没有受到影响。表明 UASB 在处理生活污水时停留时间为 5 h 左右最优。

## 2.2 UASB 对 SS 处理效果

由图 4 可知,厌氧 UASB 反应器对悬浮颗粒物去除效率较高,这是因为当废水进入厌氧生物反应器,反应器底部的颗粒污泥把污水中悬浮物挡住,这样把污水中的悬浮物去除,所以悬浮物去除率较高。

在停留时间为 5 h, SS 去除率在 93%~95%之间。

## 2.3 UASB 处理生活污水的产气率随时间变化

由图 5 可以看出,有机物的产气量较低,大约在  $0.001 \sim 0.1 \text{ m}^3 \text{ 沼气/d}$ ,这是因为一方面进水的有机物较低,并且溶解性的 COD 值较低而影响产气率。还有温度相对也较低,故产气也较低。产生的气体中的甲烷微溶于水,也是产气率低的一个原因。上述几种原因造成了产气率较低,但进水的溶解性 COD 低是造成产气率低的主要原因。沼气主

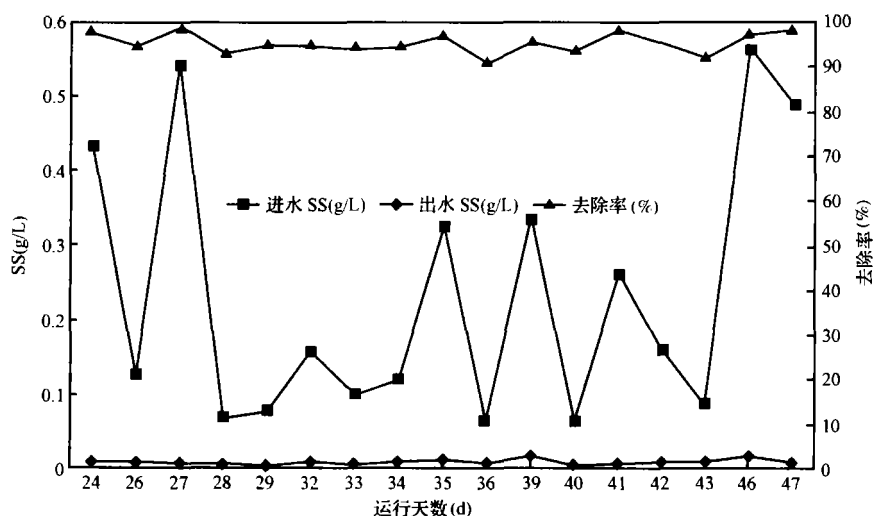


图 4 UASB 在停留时间 10 h 进出水的 SS 的值及其去除率随时间的变化关系

Fig. 4 SS in influent water and effluent water and the relationship between SS removal rate and time at 10 hours of UASB retention time

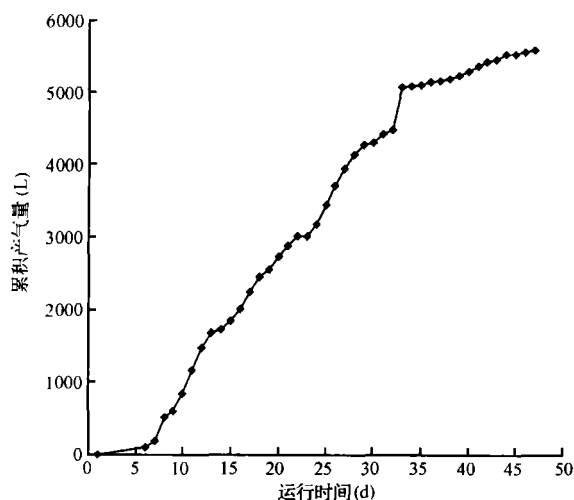


图 5 UASB 运行第 1 阶段累积产气量随时间变化图

Fig. 5 Accumulating air quantity with time at the first stage of UASB

要成分为甲烷、二氧化碳、氮气、水蒸气和硫化氢,其中甲烷的含量占总气体 55% 左右。

#### 2.4 UASB 处理生活污水在水力停留时间为 5 h 的进、出水的氨氮、钙离子和镁离子的值

UASB 处理生活污水在水力停留时间为 5 h 的进、出水的氨氮、钙离子和镁离子的值如表 2 所示。从表 2 中可以看出,出水中的氨氮比进水中的氨氮高,经过厌氧消化后,污水中的含氮有机物,例如蛋白质等经过水解细菌的氨化和发酵作用,使出水中的有机氮变为氨氮,这样使出水中氨氮比进水中的氨氮高。

从表 2 中可以看出,进水中的钙离子比出水中

钙离子高,原因较复杂,一方面受进水的碱度和 pH 的影响,另一方面由于厌氧颗粒污泥带负电,而钙离子带正电,这样使厌氧颗粒污泥通过静电吸附,从而增加厌氧颗粒污泥和钙离子之间的架桥作用,增加颗粒污泥的比重,使细菌有吸附生长的载体,使细菌在颗粒污泥内部和表面的生长提供了环境条件。国内外专家学者认为,厌氧颗粒污泥的形成与进水中的钙离子的浓度有关,出水比进水低,是否钙离子参与了厌氧颗粒污泥形成,从而导致了出水中钙离子降低。

从表 2 可以看出,进水中的镁离子比出水中的镁离子高,作者认为,镁离子的作用跟钙离子的作用相同,而镁离子对进水的碱度和 pH 更敏感,并且镁离子在碱性条件下可以形成胶体,这样也可以成为细菌生长繁殖的载体,这可能也是厌氧颗粒污泥生成的一个重要原因。

#### 2.5 UASB 处理生活污水的总氮进、出水的值及其去除率随时间的变化

UASB 处理生活污水在水力停留时间为 5 h 的总氮进、出水的值及其去除率值如表 3 所示。从表 3 可以看出,总氮去除率较低,表明厌氧反应器中的反硝化效率较低。

#### 2.6 UASB 处理生活污水总磷进、出水的值及其去除率随时间的变化

UASB 处理生活污水在水力停留时间为 5 h 的总磷进、出水的值及其去除率值如表 4 所示。由表 4 可知,总磷的去除率较低,总磷可以分为无机磷和有机磷,也可以分为颗粒状和水溶性的磷,磷的去除

表 2 UASB在停留时间为 5 h进、出水氨氮、钙和镁离子浓度随时间的变化关系

Table 2 Relationship between concentrations of ammonia and nitrogen, calcium ion and magnesium ion in influent water and effluent water and time at 5 hours of UASB retention time

| 运行天数<br>(d) | 进水氨氮值<br>(mg/L) | 出水氨氮值<br>(mg/L) | 进水钙离子值<br>(mg/L) | 出水钙离子值<br>(mg/L) | 进水镁离子值<br>(mg/L) | 出水镁离子值<br>(mg/L) |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 28          | 31.5            | 33.8            | 71.5             | 70.2             | 35.7             | 34.2             |
| 29          | 29.4            | 31.5            | 68.5             | 67.1             | 36.9             | 36.1             |
| 30          | 30.6            | 30.3            | 75.6             | 75.3             | 39.6             | 39.2             |
| 31          | 26.5            | 28.1            | 75.4             | 71.8             | 38.8             | 37.5             |
| 32          | 28.8            | 33.0            | 69.6             | 67.4             | 35.8             | 35.1             |
| 33          | 31.5            | 34.5            | 69.8             | 64.8             | 33.3             | 30.4             |
| 34          | 28.7            | 29.9            | 70.5             | 69.1             | 35.1             | 32.6             |
| 35          | 29.4            | 34.5            | 71.5             | 68.5             | 36.2             | 34.8             |
| 36          | 25.4            | 26.7            | 75.4             | 71.8             | 30.4             | 30.1             |

表 3 UASB在停留时间为 5 h的进、出水总氮值随时间的变化关系

Table 3 Relationship between the total nitrogen in influent water and effluent water and time at 5 hours of UASB retention time

| 运行天数<br>(d) | 进水总氮值<br>(mg/L) | 出水总氮值<br>(mg/L) | 总氮去除率<br>(%) | 运行天数<br>(d) | 进水总氮值<br>(mg/L) | 出水总氮值<br>(mg/L) | 总氮去除率<br>(%) |
|-------------|-----------------|-----------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|--------------|
| 27          | 55.4            | 51.3            | 7.4          | 32          | 60.1            | 56.1            | 6.7          |
| 28          | 58.6            | 54.0            | 7.8          | 33          | 58.3            | 54.2            | 7.0          |
| 29          | 48.5            | 46.1            | 4.9          | 34          | 59.4            | 54.8            | 7.7          |
| 30          | 57.3            | 54.3            | 5.2          | 35          | 51.4            | 46.9            | 8.8          |
| 31          | 60.2            | 52.3            | 13.1         | 36          | 53.6            | 49.8            | 7.1          |

表 4 UASB在停留时间为 5 h的进、出水总磷随时间的变化关系

Table 4 Relationship between the total phosphorus in influent water and effluent water and time at 5 hours of UASB retention time

| 运行天数 (d) | 进水总磷<br>(mg/L) | 出水总磷<br>(mg/L) | 总磷去除率<br>(%) |
|----------|----------------|----------------|--------------|
| 27       | 14.23          | 13.68          | 3.9          |
| 28       | 14.51          | 14.42          | 0.6          |
| 29       | 14.05          | 13.85          | 1.4          |
| 30       | 14.96          | 14.54          | 2.8          |
| 31       | 13.8           | 13.35          | 3.3          |
| 32       | 14.67          | 13.73          | 6.4          |
| 33       | 15.03          | 14.26          | 5.1          |
| 34       | 14.69          | 14.12          | 3.9          |
| 35       | 14.7           | 14.39          | 2.1          |
| 36       | 14.5           | 14.12          | 2.6          |

由于颗粒污泥截留大分子颗粒状的磷所致,而UASB本身对总磷没有去除作用。

2.7 UASB处理生活污水的硫酸根进、出水的值及其去除率随时间的变化

UASB处理生活污水在水力停留时间为 5 h的

硫酸根进、出水的值及其去除率值如表 5所示。由表 5可以看出,出水的硫酸根比进水的硫酸根低,这是由于水溶性的硫酸根经过颗粒污泥后,经过脱硫菌的作用把硫酸根反硫化为硫化氢,这样使出水中的硫酸根小于进水的硫酸根的值,从进、出水的硫酸根的值可以看出,反硫化菌的数量较少,使反硫化率较低,不会对产甲烷过程造成抑制影响。

表 5 UASB在停留时间为 5 h进、出水硫酸根值

Table 5 Values of vitriol radical in influent water and effluent water at 5 hours of UASB retention time

| 运行天数<br>(d) | 进水<br>硫酸根<br>(mg/L) | 出水<br>硫酸根<br>(mg/L) | 运行<br>天数<br>(d) | 进水<br>硫酸根<br>(mg/L) | 出水<br>硫酸根<br>(mg/L) |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| 27          | 9.5                 | 7.3                 | 32              | 12.5                | 8.1                 |
| 28          | 10.2                | 7.7                 | 33              | 11.4                | 7.8                 |
| 29          | 9.3                 | 7.1                 | 34              | 10.3                | 7.6                 |
| 30          | 8.6                 | 7.2                 | 35              | 10.6                | 7.5                 |
| 31          | 9.4                 | 6.3                 | 36              | 9.5                 | 7.2                 |

2.8 UASB处理生活污水的硝酸根进、出水的值及其去除率随时间的变化

UASB处理生活污水在水力停留时间为 5 h的硝

酸根进、出水的值及其去除率值如表 6 所示。由表 6 可以看出,进水在 6 mg/L 左右,出水未检出,表明颗粒污泥表面不仅含有产甲烷细菌、产酸菌、硫酸还原菌,还含有不同数量的反硝化细菌,使出水中的硝酸根的值小于进水中的硝酸根的值,这样在颗粒污泥中还可以发生反硝化作用,使出水中的硝酸根和亚硝酸根的值较低。

表 6 UASB 在停留时间为 5 h 的硝酸根进、出水的值  
Table 6 Values of nitric acid base in influent water and effluent water at 5 hours of UASB retention time

| 运行<br>天数<br>(d) | 进水<br>硝酸根<br>(mg/L) | 出水<br>硝酸根<br>(mg/L) | 运行<br>天数<br>(d) | 进水<br>硝酸根<br>(mg/L) | 出水<br>硝酸根<br>(mg/L) |
|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| 27              | 6.8                 | 0                   | 32              | 7.1                 | 0                   |
| 28              | 5.4                 | 0                   | 33              | 6.6                 | 0                   |
| 29              | 5.6                 | 0                   | 34              | 5.3                 | 0                   |
| 30              | 6.2                 | 0                   | 35              | 5.4                 | 0                   |
| 31              | 6.5                 | 0                   | 36              | 6.6                 | 0                   |

2.9 UASB 处理生活污水的乙酸进、出水的值及其去除率随时间的变化

UASB 处理生活污水在水力停留时间为 5 h 的乙酸进、出水的值及其去除率值如图 6 所示。由图 6 可以看出,出水中的乙酸值比进水值高,主要是由于进水中有机物经过厌氧颗粒污泥中的各种微生物

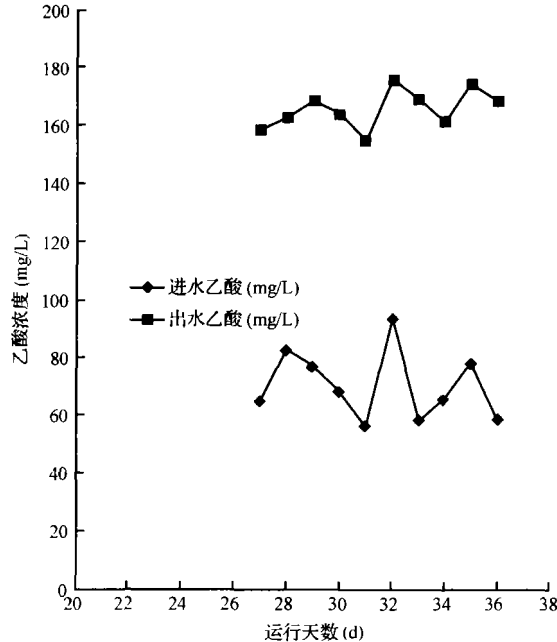


图 6 UASB 在停留时间为 5 h 的进、出水乙酸值随时间的变化

Fig. 6 Relationship between acetic acid value in influent water and effluent water and time at 5 hours of UASB retention time

的作用,使出水中的乙酸值较高,但出水中不含有其他的酸类,表明颗粒污泥中含有足够的产酸菌把三碳羧酸以上的有机酸转化为甲酸和乙酸等小分子的有机酸,从而有利于产甲烷菌的生长和繁殖。

3 结 论

对 UASB 处理低浓度生活污水的可行性进行探讨,温度高于 15℃,用 UASB 处理生活污水是可行的。得出的初步结论如下:

- (1) UASB 处理生活污水中 COD 的去除率在 52%~83%,出水的 COD 值 <100 mg/L 以下。
- (2) UASB 处理生活污水的最佳停留时间为 5 h。
- (3) UASB 处理生活污水中的悬浮物有较好的效果,SS 的去除率在 95% 左右。
- (4) 不管停留时间在 10 h、5 h,出水的氨氮、乙酸值比进水的高;钙、镁、总氮、总磷、硫酸根和硝酸根离子出水值比进水值低。

参 考 文 献

[1] Kato M. T., et al The anaerobic treatment of low strength wastewater in UASB and EGSB reactors. Wat Sci Tech., 1997, 36 (6~7): 375~382

[2] van der Last A. R. M. and Lettinga G Anaerobic treatment of domestic sewage under moderate climatic (dutch) conditions using upflow reactors at increased superficial velocities. Wat Sci Tech., 1992, 25 (7): 167~178

[3] Rebac S., et al High-rate anaerobic treatment of malting wastewater in a pilot-scale EGSB system under psychrophilic conditions. J. Chem. Tech Biotechnol., 1997, 68: 135~146

[4] Dries J., et al High rate biological treatment of sulfate-rich wastewater in an acetate-fed EGSB reactor. Biodegradation, 1998, 9: 103~111

[5] De Smul, et al High rates of microbial sulphate reduction in mesophilic ethanol-fed expanded-granular-sludge-blanket reactor. Microbiol Biotechnol., 1997, 48: 297~303

[6] Zoutberg G. R. and Frankin R. Anaerobic treatment of chemical and brewery wastewater with a new type of anaerobic reactor: The biobed EGSB reactor. Wat Sci Tech., 1996, 34 (5~6): 375~381

[7] Zoutberg G. R., et al The biobed EGSB (expanded granular sludge bed) system covers shortcomings of the upflow anaerobic sludge blanket reactor in the chemical industry. Wat Sci Tech., 1997, 35 (10): 183~188

[8] Rinzeema A. Anaerobic digestion of long-chain fatty acids in UASB and expanded granular sludge bed reactors. Process Biochemistry, 1993, 28: 527~537

[9] Hwu C. S., et al Physicochemical and biological performance of expanded granular sludge bed reactors treating long-chain fatty acids. Process Biochemistry, 1998, 33 (1): 75~81

[10] 周琪. 升流式厌氧污泥层反应器处理生活污水工艺与机理的研究, 清华大学博士论文, 1993

[11] Rebac S., et al Psychrophilic anaerobic treatment of low strength wastewaters. Water Science and Technology, 1999, 39 (5): 203~210