

# 产甲烷反硝化工艺处理畜禽粪液可行性试验研究

彭绪亚, 李治阳, 洪俊华, 何清明, 刘玉浩

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**接种颗粒污泥于厌氧反应器,以含有葡萄糖和亚硝氮的模拟废水为进水,进行同一反应器产甲烷反硝化的研究。结果表明,在50 d的启动运行中,当反应器中COD和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 负荷分别从 $1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 逐渐增加至 $10.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 后,COD去除率大于80%, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除率大于98%;反应器稳定运行后对畜禽粪液进行处理,当COD和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 负荷分别从 $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 逐渐提高至 $7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 后,COD去除率从50%逐渐提高至80%,亚硝态氮去除率大于98%。因此,同一反应器产甲烷反硝化去除畜禽粪液有机质和氮是可行的。

**关键词:**畜禽粪液;反硝化;脱氮;产甲烷

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2012)04-0131-05

## Feasibility Analysis on the Treatment of Animal Manure with Denitrification and Methanogenesis Process

PENG Xuya, LI Zhiyang, HONG Junhua, HE Qingming, LIU Yuhao

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** The anaerobic granular sludge was inoculated in an anaerobic reactor, and the simulated wastewater containing glucose and nitrite was used to analyse the process of methanogenesis and denitrification. The results showed that while the loading rate of COD was increased from  $1.5$  to  $10.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  and that of  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  from  $0.15$  to  $1.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  during the 50 d operation of the reactor, the removal efficiencies of COD and  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  reached more than 80% and 98%, respectively. The reactor was used to treat the animal manure. The removal efficiency of COD was increased from 50% to 80% and that of  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  reached more than 98%, while the loading rate of COD increased from 2 to  $7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ , and  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  from 0.2 to  $0.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ . Therefore, the results indicated that it was possible to remove both nitrogen and organic matter of the animal manure through denitrification and methanogenesis process in the same reactor.

**Key words:** animal manure; denitrification; nitrogen removal; methanogenesis

重庆三峡库区众多的畜禽养殖场建在次级支流沿岸,畜禽排放物大多未经处理直接排入水体,畜禽粪液已成为三峡水库的主要污染源之一,严重威胁三峡库区水环境安全,且随着经济的增长,养殖业必将进一步发展,其畜禽粪液必将会对环境造成更严

重的影响,因此,开发高效经济的畜禽粪液处理技术具有必要性和迫切性。

目前,在同一反应器进行产甲烷反硝化方面国内外学者进行了有意义的研究。Lin<sup>[1]</sup>提出应用同时产甲烷反硝化去除有机质和氮源,并提出了厌氧

收稿日期:2010-12-29

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-002-04);重庆市科技重大专项(CSTC2008AB7135)

作者简介:彭绪亚(1963-),男,博导,教授,主要从事环境污染控制理论与技术研究,(E-mail)xypeng33@126.com。

同时反硝化产甲烷颗粒污泥的代谢模型。Hendriksen<sup>[2]</sup>以含有挥发性脂肪酸和硝酸盐的模拟废水为进水,在 UASB 反应器成功实现了同时反硝化产甲烷反应;An<sup>[3]</sup>,Zhang<sup>[4]</sup>,Im<sup>[5]</sup>,Peng<sup>[6]</sup>,Corral<sup>[7]</sup>在废水处理过程中应用了同时产甲烷反硝化技术处理不同的有机废水。陈莉莉<sup>[8]</sup>在 UASB 反应器中成功实现了同时产甲烷反硝化,其 COD 和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  负荷分别达  $15.55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $1.55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  时,二者去除率分别达 95% 和接近 100%。孙宏伟<sup>[9]</sup>应用 UASB-A/O 系统同步深度去除高浓度有机物和氨氮的渗滤液,在原液 COD 平均为  $6537 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为  $2021 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下,系统 COD 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率分别为 95.4% 和 99.2%;袁志丹<sup>[10]</sup>应用同时产甲烷反硝化反应器(UASB)和好氧硝化反应器串联处理实际淀粉废水,将好氧反应器的硝化液出水按 1:1~3:1 的回流比回流到 UASB 反应器,实现同时产甲烷反硝化;孙寓娇<sup>[11]</sup>,迟文涛<sup>[12-13]</sup>,祖波<sup>[14]</sup>,韩晓宇<sup>[15]</sup>也对同时产甲烷反硝化进行了一定的研究,但是利用上流式反应器产甲烷反硝化不适合处理高悬浮物的畜禽粪液,故提出于完全混合式反应器产甲烷反硝化去除畜禽粪液中的有机质和氮。

针对高浓度有机质和高氨氮的畜禽粪液提出了一种新的除碳脱氮工艺,即于同一反应器内进行产甲烷反硝化,反硝化产生的碱度不仅可以避免厌氧产甲烷反应器出现酸化问题,而且利用亚硝态氮作为电子受体进行反硝化,可缩短反硝化反应历程,为后续研究奠定理论基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验装置与方法

反应器装置如图 1 所示,其反应区容积为 3 L。为保证微生物与废水充分混合,反应器内设间歇式搅拌器,转速为 30~40 r/min,反应器外部设恒温装置,温度控制为  $32 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,根据反应器负荷加样,每日从出水口取样分析测试各项指标,通过测试 COD、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、pH 值等指标判断反应器内的运行状况。

### 1.2 接种污泥与试验过程

污泥取自重庆大学已驯化好的 UASB 厌氧颗粒污泥和少量 UASB 培养出的厌氧氨氧化颗粒污泥混合接种,其 VSS/SS 为 0.58,污泥含水率 92%,pH 为 7.30。

第 1 阶段,通过提高进水浓度逐渐提高反应器负

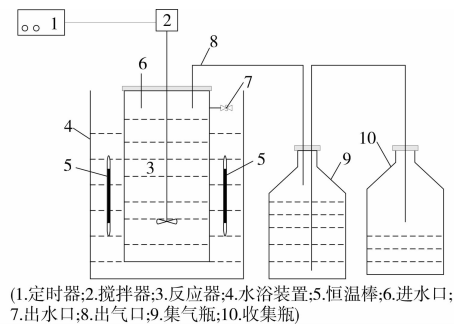


图 1 试验装置图

荷,进水为模拟废水,利用葡萄糖,亚硝酸钠配置不同浓度的 COD 和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  废水,并加入适量的  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  提供合成细胞需要的磷源,进行产甲烷反硝化的研究,每升废水各添加 1 mL 微量元素溶液 I(微 I)、微量元素溶液 II(微 II),微 I 组成为  $\text{EDTA } 25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;微 II 组成为  $\text{CaCl}_2 \text{ } 18.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{FeSO}_4 \text{ } 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MgSO}_4 \text{ } 15.13 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O } 2.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O } 0.69 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O } 0.52 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 0.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O } 0.43 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O } 0.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3 \text{ } 0.014 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Se } 0.01 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

第 2 阶段,通过外加亚硝态氮于畜禽粪液,研究产甲烷反硝化工艺处理畜禽粪液实际废水的可行性。畜禽粪液成分:COD 10 000~20 000 mg/L,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  约 54 mg/L,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  10 mg/L 以下,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  约 1 000 mg/L。

### 1.3 分析项目与测试方法

废水水质指标测试方法为<sup>[16]</sup>:  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ : 纳氏试剂比色法;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ : 紫外分光光度法;  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ : N-(1-萘基)乙二胺比色法; COD: HACH 替代试剂比色法; MLSS 和 MLVSS: 标准重量法; DO: 溶氧仪法; pH 值: 玻璃电极法; 气体体积: 排水法; 沼气成分: 红外测定法; 生物相: KYKY-1000 型扫描电镜。

## 2 结果与讨论

### 2.1 去除模拟废水有机质和氮

2.1.1 产甲烷反硝化在反应器中的实现 于反应器接种污泥后,应用模拟废水进行产甲烷反硝化的研究。王丽丽等<sup>[17]</sup>以葡萄糖为碳源进行反硝化过程中,认为 C/N 为 6~7 时,反硝化碳源充足。由于需要在同一反应器实现反硝化和产甲烷反应,因此应用 C/N 比大于 7 的模拟废水满足反硝化菌对有机质的需求;陈莉莉等<sup>[8]</sup>利用 C/N 为 10 的模拟废水取得较好的产甲烷反硝化效果,故该试验以 C/N 为 10 的模拟废水进行同一反应器产甲烷反硝化的试验研

究。启动过程中逐渐提高反应器内负荷,每5 d增加的COD和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 负荷分别为 $1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ,运行50 d,反应器中COD和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 负荷分别达 $10.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ,其COD和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除效果较为理想。反应器COD和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 负荷及其去除率随运行时间的变化规律分别如图2和图3所示。

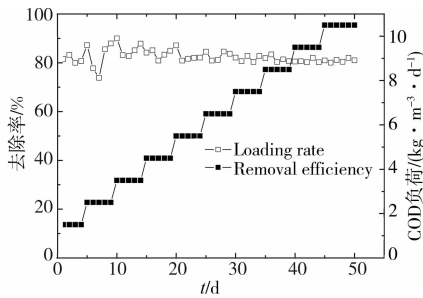


图2 COD负荷及其去除率

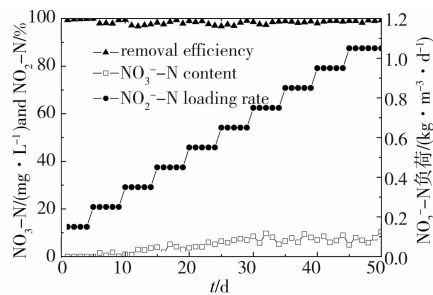


图3  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 变化规律及产生的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

由图2知,在反应器中有机负荷COD从 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 稳步上升到 $10.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ,COD去除率基本大于80%,因此混合式反应器适合处理高浓度有机废水,大量有机质被转化为生物能源。污泥经过5 d的驯化,反应器开始有沼气产生,随着负荷的增加,产沼率从初期的 $0.17 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 逐渐增加至 $1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上,沼气中甲烷含量由24%逐渐增加至60%左右。

由图3知,亚硝态氮负荷从 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 稳步提高到 $1.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ,随着亚硝态氮负荷的提高,亚硝态氮得到稳定去除,亚硝态氮的去除率维持在98%以上;反应期间监测了反应器中硝态氮的含量,其浓度主要在 $0 \sim 10.0 \text{ mg/L}$ 之间,由此推测,反应器中存在少量的亚硝酸氧化菌,该菌将废水中的亚硝酸盐氧化为硝酸盐。

**2.1.2 氨氮在反应器中的变化规律** 由于有机质中的氮素经过厌氧消化后主要被转化为氨氮,消化液中有较高浓度的氨氮存在,因此研究产甲烷反硝化反应器中氨氮浓度变化规律具有重要的现实意义,

实验在接种污泥时引入了少量厌氧氨氧化污泥,分析厌氧氨氧化菌在反应器中发挥的作用及氨氮在产甲烷反硝化反应器中的变化规律。

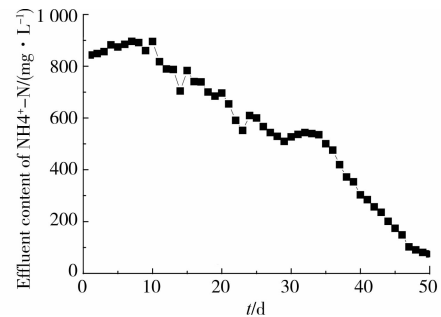


图4 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度

由图4可见,反应初期氨氮未被去除并略有增加,推测其主要原因是反应初期,反应器中亚硝态氮浓度不高,其在反应器中优先被反硝化菌利用,同时,厌氧氨氧化菌并未适应高浓度的有机质环境,其活性受到抑制,故初期厌氧氨氧化反应不明显,从而抑制了氨氮的去除;随着反应的进行,厌氧氨氧化菌的活性逐渐增加,反应器中氨氮浓度从初期的 $843.23 \text{ mg/L}$ 逐渐减小到后期的 $75.31 \text{ mg/L}$ ,反应器污泥表现出良好的厌氧氨氧化活性,由此可以推断反应器中同时存在产甲烷菌、反硝化菌和部分厌氧氨氧化菌。

**2.1.3 产甲烷反硝化污泥生物相** 反应器接种污泥为厌氧消化污泥,呈黑色,运行后期反应器污泥颜色变为浅褐色,并形成了一定大小的颗粒污泥。对后期污泥进行系列预处理<sup>[18]</sup>:2.5%戊二醛(按1:1)固定2~8 h,1500 r/min下离心;0.1M磷酸缓冲液(pH 7.2)清洗3次;依次用30%、50%、70%、80%、90%、100%(各2次)乙醇脱水;再用50%、70%、90%、95%、100%(各2次)洗涤2次;于 $40 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中恒温干燥;喷金制样;利用扫描电镜观察污泥内部结构,如图5所示。

由图发现反应器中主要存在螺旋菌、丝状菌、杆菌和球菌。由图(a)、(b)发现螺旋菌和球菌相互耦合;由(c)图可见丝状菌和杆菌紧密聚集;同时,反应器中有大量的球状菌存在,见图(d)。由于甲烷菌主要为丝状菌、螺旋菌、八叠球菌,反硝化菌主要为杆菌和球菌,厌氧氨氧化菌主要为球状菌,由扫描电镜照片可以说明反应器内的菌群种类丰富,且主要为产甲烷菌、反硝化菌和部分厌氧氨氧化菌。

## 2.2 去除畜禽粪液有机质和亚硝态氮

对同一反应器产甲烷反硝化处理畜禽粪液有机质和氮的可行性进行试验研究,通过调节进水量逐渐

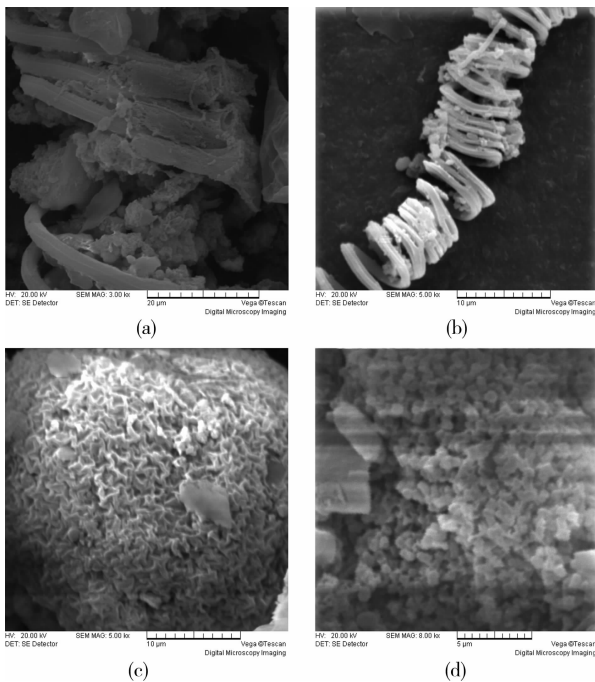


图 5 反应器内污泥的扫描电镜照片

提高反应器负荷, COD 负荷由  $2 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  逐渐提高至  $7 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , COD 去除率从 50% 逐渐提高至 80%, 见图 6;  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  负荷由  $0.2 \text{ kgNO}_2^- - \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  逐渐提高至  $0.7 \text{ kgNO}_2^- - \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , 亚硝态氮去除率达 98%, 出水硝氮浓度主要在  $5 \text{ mg/L}$  以下, 见图 7; 当 COD 负荷为  $2 \text{ kgNO}_2^- - \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  时, 产气负荷为  $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , 当 COD 负荷提高至  $7 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  时, 产气负荷为  $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1} \sim 1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  左右, 因此同一反应器产甲烷反硝化处理畜禽粪液具有可行性。由于厌氧反应器中有机氮向无机氮转换导致出水氨氮值比进水氨氮值高, 畜禽粪液总氮几乎无太大的变化。

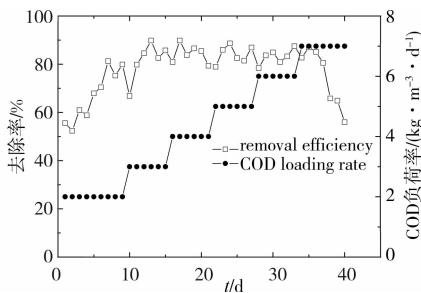
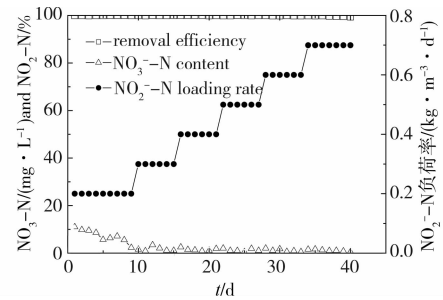


图 6 COD 负荷及其去除率

### 3 结论

针对高浓度有机质和高氨氮的畜禽粪液提出了一种新的除碳脱氮工艺, 即于同一反应器内进行产甲烷反硝化。通过对产甲烷反硝化工艺的启动运行

图 7  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  负荷及其去除率

和产甲烷反硝化工艺处理畜禽粪液实际废水可行性的研究得到如下结论。

1) 经过 50 d 的运行完成厌氧反应器产甲烷反硝化工艺的启动, 反应器中 COD 和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  负荷分别从  $1.5 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $0.15 \text{ kgNO}_2^- - \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  增加至  $10.5 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $1.05 \text{ kgNO}_2^- - \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , COD 去除率大于 80%,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除率大于 98%。

2) 应用产甲烷反硝化工艺处理畜禽粪液时, COD 负荷由  $2 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  逐渐提高至  $7 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , COD 去除率从 50% 逐渐提高至 80%;  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  负荷由  $0.2 \text{ kgNO}_2^- - \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  逐渐提高至  $0.7 \text{ kgNO}_2^- - \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , 亚硝态氮去除率大于 98%。

3) 应用扫描电镜观察反应器内污泥微观性状, 发现反应器中主要存在螺旋菌、丝状菌、杆菌和球菌, 同时结合反应器中氨氮浓度的变化, 推测反应器中同时存在甲烷菌、反硝化菌和部分厌氧氨氧化菌。

#### 参考文献:

- [1] Lin Y F, Chen K C. Denitrification and methanogenesis in a co-immobilized mixed culture system [J]. Water Research, 1995, 29 (1): 35-43.
- [2] Hendriksen H V, Ahring B K. Integrated removal of nitrate and carbon in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor: operating performance [J]. Water Research, 1996, 30 (6): 1451-1458.
- [3] An Y Y, Yang F L, Chua H C. The integration of methanogenesis with shortcut nitrification and denitrification in a combined UASB with MBR [J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 3714-3720.
- [4] Zhang D J. The integration of methanogenesis with denitrification and anaerobic ammonium oxidation in an expanded granular sludge bed reactor [J]. Journal of Environment Sciences, 2003, 15(3): 423-432.
- [5] Im J H, Woo H J, Choi M W. Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate

- using an anaerobic-aerobic system [J]. *Water Research*, 2001, 35(10): 2403-2410.
- [6] Peng Y Z, Zhang S J, Wei Z. Organic removal by denitrification and methanogenesis and nitrogen removal by nitrification from landfill leachate [J]. *Water Research*, 2008, 48:883-892.
- [7] Corral A M, Nchez M S. Simultaneous methanogenesis and denitrification of pretreated effluents from a fish canning industry [J]. *Water Research*, 2001, 35 (2): 411-418.
- [8] 陈莉莉, 左剑恶, 楼俞, 等. 同时产甲烷反硝化在UASB反应器中的实现[J]. *中国沼气*, 2006, 24 (2): 3-7.  
CHEN Lili, ZUO Jiane, LOU Yu, et al. Study on simultaneous methanogenesis and denitrification in a UASB Reactor [J]. *China Biogas*, 2006, 24(2):3-7.
- [9] 孙洪伟, 王淑莹, 时晓宁, 等. 单一缺氧/厌氧UASB同步反硝化产甲烷与A/O组合工艺处理实际晚期渗滤液[J]. *化工学报*, 2009, 60(11):2891-2896.  
SUN Hongwei, WANG Shuying, SHI Xiaoning, et al. Single anoxic/ anaerobic UASB simultaneous denitrification and methanogenesis combined with A/ O for treatment of real landfill leachate [J]. *Ciesc Journal*, 2009, 60(11): 2891-2896.
- [10] 袁志丹, 左剑恶, 甘海南, 等. 同时产甲烷反硝化与硝化串联工艺处理淀粉废水[J]. *环境科学学报*, 2008, 28 (7):1272-1278.  
YUAN Zhidan, ZUO Jiane, GAN Hainan. Treatment of starch processing wastewater using a combined simultaneous methanogenesis and denitrification (SMD) - nitrification process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(7):1272-1278.
- [11] 孙寓姣, 左剑恶, 陈莉莉. 同时产甲烷反硝化颗粒污泥中微生物群落结构[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(1): 44-48.  
SUN Yujiao, ZUO Jiane, CHEN Lili. Microbial community structure in simultaneous methanogenesis and denitrification granular sludge [J]. *China Environmental Science*, 2007, 27 (1): 44-48.
- [12] 迟文涛, 江瀚, 王凯军. 厌氧悬浮颗粒污泥床同时反硝化产甲烷研究[J]. *中国沼气*, 2007, 25 (3): 10-13.  
CHI Wentao, JIANG Han, WANG Kaijun. Simultaneous denitrification and methanogenesis in an anaerobic suspended granular sludge reactor [J]. *China Biogas*, 2007, 25 (3): 10-13.
- [13] 迟文涛, 赵雪娜, 江瀚, 等. 厌氧同时反硝化产甲烷工艺研究进展[J]. *中国沼气*, 2006, 24(4) :6-8.  
CHI Wentao, ZHAO Xuena, JIANG Han, et al. Development of anaerobic simultaneous denitrification/ methanogenesis process [J]. *China Biogas*, 2006, 24(4): 6-8.
- [14] 祖波, 张代钧, 白玉华. EGSB反应器中耦合厌氧氨氧化与甲烷化反硝化的研究[J]. *环境科学研究*, 2007, 20 (2) : 51-57.  
ZU Bo, ZHANG Daijun, BAI Yuhua. Study of integration of methanogenesis with simultaneous anaerobic ammonium oxidation and denitrification in EGSB Reactor [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20 (2) : 51-57.
- [15] 韩晓宇, 彭永臻, 张树军. 厌氧同时反硝化产甲烷工艺的应用及进展[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(6): 15-19.  
HAN Xiaoyu, PENG Yongzhen, ZHANG Shujun. Application and progress of anaerobic simultaneous denitrification and methanogenesis process [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(6): 15-19.
- [16] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- [17] 王丽丽, 赵林, 谭欣. 不同碳源及其碳氮比对反硝化过程的影响[J]. *环境保护科学*, 2004, 30 (121):15-18.  
WANG Lili, ZHAO Lin, TAN Xin. Influence of different carbon source and ratio of carbon and nitrogen for water denitrification [J]. *Environmental Protection Science*, 2004, 30 (121):15-18.
- [18] 安莹玉. UASB-MBR工艺短程硝化—同时甲烷化反硝化研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.

(编辑 胡玲)