

# 产酸脱硫反应器中 COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比制约的群落生态演替规律

王爱杰<sup>1</sup>, 任南琪<sup>1</sup>, 黄志<sup>2</sup>, 甄卫东<sup>1</sup> (1. 哈尔滨工业大学环境生物技术研究中心, 哈尔滨 150090; 2. 黑龙江省规划勘测设计研究院, 哈尔滨 150040)

**摘要:**通过产酸脱硫反应器的动态试验和配套的静态试验, 考察致变因子 COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比制约的乙酸型顶极群落的结构、优势种群的组成和生态演替的规律; 阐明乙酸型代谢和乙酸型顶极群落是产酸脱硫生态系统的典型特征; 揭示乙酸型顶极群落内平衡与反馈调节的生理代谢机制, 并以因变因子 \* pH 值、氧化还原电位和碱度来表征生态演替过程中优势种群的三维实现生态位。

**关键词:**产酸脱硫反应器; 致变因子; COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比; 因变因子; 顶极群落; 生态演替; 实现生态位

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2002)02-05-0034

## The Ecological Succession of Climax Community Restricted by COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> Ratio in Acidogenic Desulfate Bioreactor

Wang Aijie<sup>1</sup>, Ren Nanqi<sup>1</sup>, Huang Zhi<sup>2</sup>, Zhen Weidong<sup>1</sup> (1. Research Center of Environmental Biotechnology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Heilongjiang Research Institute of Programming, Harbin 150040, China)

**Abstract:** The ecological succession of climax community restricted by COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ratio, the causing ecological factors, was investigated in acidogenic desulfate bioreactor with continuous-flow and batch-flow experiment. It was demonstrated that aceticacid type metabolization and aceticacid type climax community were the typical characteristic of acidogenic desulfate ecosystem, and the internal balance and feedback adjusting mechanism of the climax community was analyzed. In addition, threedimension realized ecological niche figure of preponderant population during the course of ecological succession was presented based on the following ecological factors of pH value, oxidation reduction potential and alkalinity.

**Keywords:** desulfate bioreactor; ecological succession; ecological factors; COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ratio; realized ecological niches; climax community

目前,在利用两相厌氧系统的产酸反应器处理含高浓度的硫酸盐废水过程中,对硫酸盐还原菌(SRB)的生态学研究受到诸多学者的关注<sup>[1~6]</sup>。但从群体生态学角度考察活性污泥中顶极群落的形成机制及其生态演替规律还鲜见研究。本研究利用产酸脱硫反应器<sup>[7]</sup>的动态试验和配套的静态试验考察悬浮态生长的活性污泥中,由致变因子 COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比制约的乙酸型顶极群落的生态演替规律\*,揭示乙酸型顶极群落内平衡与反馈调节的生理代谢机制,并以因变因子 pH 值、氧化还原电位(Oxidation Reduction Potential, ORP)和碱度(Alkalinity, ALK)来表征生态演替过程中优势种群的三维实现生态位。

### 1 试验材料与方法

本研究采用动态试验和静态试验 2 种形

式。动态试验的目的是,考察产酸脱硫反应器中硫酸盐去除率和产气量稳定期,由致变因子 COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比的改变所引发的优势种群的变迁、乙酸型顶极群落的结构和群落的定向性生态演替等。静态试验目的是配合动态试验,深入探讨某一特定因子的作用机理。采用数个 500ml 培养瓶,恒温水浴控制温度在 34 ± 1 °C,试验前用无氧氮气吹脱,保证无氧条件。每隔 1h 摇晃培养瓶一次,以释放产生的气体。正常运行条件模拟动态模型。

### 1.1 反应器的快速启动与 SRB 种群的选择性富集

\* 康风先. 硫酸盐还原甲烷化两相厌氧法过程和机理的研究. 无锡轻工学院博士论文, 1994.  
基金项目: 国家自然科学基金项目(59978012)  
作者简介: 王爱杰(1972~), 女, 博士后, 副研究员, 主要从事环境生物技术、废水生物处理等方面的研究。  
收稿日期: 2001-03-29; 修订日期: 2001-05-14

产酸脱硫反应器启动时  $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 3.0$  ( $\text{SO}_4^{2-} = 600\text{mg/L}$ ), 采用人工配水, 以糖蜜废水作为有机碳源 (COD), 硫酸钠做电子受体 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). 接种生物量 MLVSS 为  $8.2\text{g/L}$ , SRB 计数为  $2.1 \times 10^{10}$  个/ml, 硫酸盐负荷率 ( $N_s$ ) 为  $1.0\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ . 随  $\text{SO}_4^{2-}$  去除率的提高, 以  $0.5\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  的递增梯度提高  $N_s$ . 第 40 天时,  $N_s$  提高到  $3.0\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  去除率超过 70%, MLVSS 提高至  $15.1\text{g/L}$ , SRB 计数为  $4.3 \times 10^{14}$  个/ml, 标志着快速启动成功, 提高  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度为  $1000\text{mg/L}$ , 进入生态演替的转化试验阶段.

产酸脱硫反应器为 CSTR 型装置, 污泥的自固定化方式为絮状悬浮态, 很多权威报道已证明絮状污泥中 SRB 的选择性富集能力远远超过颗粒污泥和生物膜<sup>[8,9]</sup>. 在反应器快速启动的过程中, 呈分散态生长的 SRB 能迅速占居生态位, 搅拌是促使悬浮细胞向污泥絮体转化的首要条件, 温度、ORP、pH 值、ALK 等生态因子提供了絮体形成的必要因素. 因此, 经过定向性的生态演替, 可实现 SRB 种群的选择性富集.

## 1.2 SRB 的计数、分离与鉴定

SRB 计数采用中国石油天然气行业标准 (SY/T 0532/93), 油田注入水细菌分析方法——绝迹稀释法 (部颁标准)<sup>[10]</sup>. SRB 分离与纯化的培养基采用 Postgate 培养基的改进配制方

法<sup>[11]</sup>, 细菌计数、分离纯化、鉴定的操作均采用改进的 Hungate 技术\*. 主要分析项目与方法见王爱杰的论文.\*\*

## 2 结果与讨论

### 2.1 乙酸型顶极群落的结构模式

产酸脱硫反应器本质上是一个特殊功能的产酸反应器, 它利用 AB、SRB 和 HPA 的生物链式协同代谢关系, 实现有机物的产酸发酵和硫酸盐的还原作用. 因此, 其最重要的 2 项指标是酸化代谢类型和酸化率\*\*\*. 代谢类型指依据酸性末端产物中挥发性脂肪酸 (VFA) 的分布判断微生物的生理代谢途径, 酸化率则是末端产物中挥发性脂肪酸的浓度 (以 COD 计) 占进水 COD 浓度的百分比.

表 1 比较了相同运行条件下, 产酸脱硫反应器与普通产酸反应器代谢类型的区别. 按 Cohen 等人<sup>[12]</sup>的划分, 后者是典型的丁酸型发酵, 乙酸占 VFA 分布比例的 21% 左右. 但产酸脱硫反应器的特征却迥然不同, 酸化率大幅度提高, 而且在不同  $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$  比条件下, 酸性末端产物中乙酸始终占据主导地位, 约占 50% ~ 82%. 作者定义产酸脱硫反应器内这种末端 VFA 中乙酸占绝对比例的酸化过程为乙酸型代谢, 并将产酸脱硫生态系统达到稳态时, 乙酸型代谢的优势种群所指示的顶极群落定义为乙

表 1 产酸脱硫反应器与普通产酸反应器的酸性末端产物分布比较<sup>1)</sup>

Table 1 The compare of end-productions between acidogenic desulfate reactor and common acidogenic reactor

反应器	液相末端产物中挥发性脂肪酸 (VFA) 的分布 / $\text{mmol L}^{-1}$					酸化率 / %	乙酸的分布比例 / %
	乙酸	丙酸	丁酸	乳酸	乙醇		
启动期	16.42	6.84	7.11	2.88	0.58	55.2 ~ 70.5	50.3 ~ 53.9
产酸脱硫反应器 (乙酸型代谢)							
COD/ $\text{SO}_4^{2-} = 3.0$	20.55	2.44	7.51	1.41	0.76	65.2 ~ 83.4	56.8 ~ 77.6
COD/ $\text{SO}_4^{2-} = 4.2$	23.93	1.47	4.92	1.84		62.4 ~ 90.6	58.5 ~ 82.0
COD/ $\text{SO}_4^{2-} = 2.0$	18.78	4.15	8.78	4.27	2.06	45.7 ~ 62.8	54.8 ~ 62.2
典型的产酸反应器 (丁酸型发酵)	9.32	3.85	21.74	3.55	3.44	20.4 ~ 41.5	18.2 ~ 25.5

1) 2 反应器的运行条件均为  $\text{pH} = 6.0 \sim 6.2$ , COD 容积负荷率为  $15\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , HRT = 6.0h.

挥发酸的 SRB (FSRB), 包括利用丙酸的 p-SRB、

挥发酸的 SRB (FSRB), 包括利用丙酸的 p-SRB、

根据产酸脱硫反应器稳定期的群落生态特征和优势种群鉴定结果, 可建立起如图 1 所示的乙酸型顶极群落的结构模式. 污泥外层主要为 AB、利用氢的 SRB (HSRB) 和利用乙酸的 SRB (ASRB), 内层主要为 HPA 和利用  $\text{C}_3$  以上

\* 陈晓蕾. 有机废水产酸发酵顶极群落研究——生态因子 pH、Eh 的影响. 哈尔滨建筑大学硕士学位论文, 1998.

\*\* 王爱杰. 产酸脱硫反应器中 SRB 的生态学研究——顶极群落形成与生态因子调控. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2000.

\*\*\* 刘安波. 硫酸盐还原作用对升流式厌氧污染床工艺性能影响的研究. 清华大学环境工程系博士学位论文, 1993.

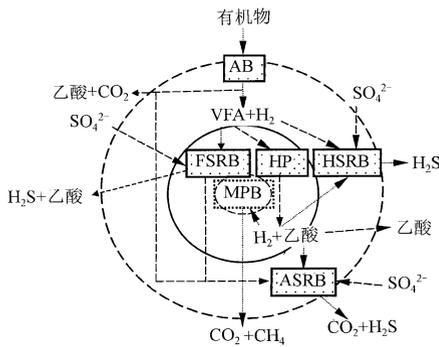


图 1 乙酸型顶级群落的结构模式与种群间关系  
Fig. 1 The structure of acetic acid type climax community and the relationship among populations

利用乳酸的 F-SRB 和利用丁酸的 t-SRB)。这种群落结构实际上由 AB、HPA 和 SRB 等种群形成一条完整的生物链,就生态层次而言,AB 为生物链的初级,是群落代谢能力首要环节。AB 与 FSRB、HSRB、ASRB 间存在复杂的偏利共生关系,并通过空间生态位分离维持着代谢有序

性。HPA 和 FSRB 处于生物链的次级,两者通过竞争相同的底物(VFA)而产生营养生态位分离,即 HPA 和 FSRB 分别利用不同的 VFA 或在利用 VFA 的顺序上有先后。HSRB 作为生物链的最高级起着重要的作用,它维持着生态系统较低的氢分压,并能促进 HPA 的产氢产乙酸代谢进程。在污泥絮体的内层应该有 MPB 的分布,但它的存在对群落结构与功能的贡献极小,甚至可以忽略。

### 2.2 乙酸型顶级群落的生态演替

产酸脱硫反应器内影响群落变化及代谢产物组成的致变因子中, COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比是一级(直接)可控的。因此,本研究以 COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比为转化条件,考察了它的改变引起的因变因子(pH 值、氧化还原电位、碱度、末端产物等)的变动,继而由因变因子的叠加效应引发优势种群的变迁,形成定向性的群落生态演替。转化试验的操作见表 2。

表 2 产酸脱硫反应器中顶级群落生态演替的转化试验

Table 2 The transform experiments for ecological succession of climax community

转化试验	操 作 条 件				
	COD/ SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	COD/ mg L <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / mg L <sup>-1</sup>	N <sub>S</sub> (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) / kg · (m <sup>3</sup> · d) <sup>-1</sup>	HRT / h
快速启动	5.0	3000	600	1.0 3.0	14.4 4.8
降低 COD/ SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5.0 3.0	3000	600 1000	3.0 4.0	4.8 6.0
提高 COD/ SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3.0 4.2	3000 4200	1000	4.0	6.0
降低 COD/ SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4.2 2.0	4200	1000 2100	4.0 10.0	6.0 4.8

表 3 给出了转化试验的结果,可见, COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比从 5.0 降低为 3.0 的转化试验中,群落的生态特征发生了一系列改变:pH 值提高到 6.1, ORP 降低到 -380mV, 乙酸的分布比例高达 66%, ALK 提高到 1500mg/L, 经过定向性变迁,优势种群的数量分布(见图 2)和组成趋于稳定,形成了低碳硫比(COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)稳定型群落。在此生态演替过程中,pH 值的提高成为关键点。HRT 的延长使 pH 值提高为 6.1, 而与其呈负相关性的 ORP 则降低,在选择适应的过程中指示性种群发生定向改变,如链球菌属大量出现,代谢葡萄糖产生乳酸为 F-SRB 提供底物,促使乙酸的比例大幅度提高,碱度也随之成倍增加。气单胞菌属、气杆菌属的出现使系统产气量提高,大量的梭状芽孢杆菌属为以丁酸做电

子供体的脱硫肠状菌属提供适宜的底物而使其迅速成为优势种群,而利用乙酸盐的脱硫丝菌属则退居次位。此时,SRB 的数量达 7.5 × 10<sup>15</sup> 个/ml, AB 比 SRB 高 1 个数量级,HPA 比 SRB 低 3 个数量级。

COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比从 3.0 提高到 4.2 的转化试验中,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度、HRT 和 N<sub>S</sub> 不变,仅提高 COD 浓度为 4200mg/L,即可利用的碳源数目增加。这必然促进 AB 种群数量增加和代谢能力加强,而 AB 种群与 FSRB 种群的偏利共生关系又促使 FSRB 获得更多的电子供体而代谢活性提高(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 去除率提高至 90%),因而群落的生物链式代谢更有序,底物降解更完整,尤其是利用乙酸的脱硫丝菌属的优势地位被代谢丙酸的脱硫球菌属取代,使末端产物中乙酸比例

进一步提高为 76%。此时,群落的合成代谢占据主导地位,因变因子向着有利于群落稳定性增加的方向改变,SRB、AB 和 HPA 的数量均提

高了一个数量级(图 2)。这些新“质”的特征预示着群落演替到一个更稳定的阶段,笔者称之为高碳硫比稳定型群落。

表 3 COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比引发的顶极群落演替规律及其生态特征

Table 3 The ecological succession and its character caused by COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ratio

顶极群落类型	优势种群	群落的生态特征				SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 去除率 / %
		pH 值	ORP / mV	AL K / mg L <sup>-1</sup>	乙酸的平均分布比例 / %	
初始群落	微杆菌属、消化球菌属、拟杆菌属、发酵单胞菌属、脱硫弧菌属、脱硫杆菌属、脱硫丝菌属	5.1	- 280	625	42	70
低碳硫比稳定型群落	链球菌属、拟杆菌属、气单胞菌属、梭杆菌属、梭状芽孢杆菌属、葡萄球菌属、脱硫肠状菌属、脱硫弧菌属、脱硫杆菌属、脱硫球菌属、脱硫丝菌属	6.1	- 380	1500	66	88
高碳硫比稳定型群落	拟杆菌属、气杆菌属、纤毛杆菌属、梭杆菌属、气单胞菌属、梭状芽孢杆菌属、链球菌属、脱硫球菌属、脱硫肠状菌属、脱硫杆菌属	6.2	- 430	1700	76	90
低碳硫比亚稳定型群落	拟杆菌属、微杆菌属、气单胞菌属、梭杆菌属、发酵单胞菌属、脱硫杆菌属、脱硫球菌属、脱硫丝菌属	5.7	- 320	2000	51	80

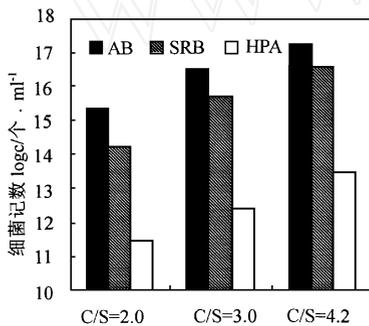


图 2 COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (C/S) 比对种群数量分布的影响

Fig. 2 The effect of C/S ratio on the amount of populations

COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比从 4.2 降低为 2.0 的转化试验中,硫酸盐浓度的大幅度提高使 SRB 的生长受到单向刺激而代谢活性提高,但代谢产物 H<sub>2</sub>S 量的增加很快成为 SRB 种群数量增长的负反馈因子,从而弱化了群落的整体代谢水平,优势种群的数量均降低了 2 个数量级(图 2)。再者, N<sub>s</sub> 的提高使生境的 pH 值呈阶次下降,一部分 NADH + H<sup>+</sup> 难以通过 AB 的合成代谢过程被利用,为弥补“还原力”的不足,AB 通过种群的调节作用使产乙酸氧化过程与丙酸发酵过程相耦联,再生 NADH + H<sup>+</sup>。因此,末端产物中丙酸的比例提高,伴随着优势种群中利用丙酸和丁酸的脱硫弧菌属被淘汰。另外,为缓解生存压力,脱硫丝菌属通过快速利用乙酸来减少酸

性末端的数量,因此末端产物中乙酸的比例显著减少,脱硫丝菌属又成为优势种属。此时,尽管群落的乙酸型代谢地位未动摇(乙酸的分布比例为 51%),但生态因子的组合偏离了 3 个种群(AB、SRB 和 HPA)合成代谢的最佳条件,群落处于亚稳定状态,调节能力差,容易因生态因子的改变而破坏其内平衡。笔者称之为低碳硫比亚稳定型群落。

用文献[13]来概括乙酸型顶极群落由低碳硫比稳定型向高碳硫比稳定型和低碳硫比亚稳定型演替的过程,可以认为是群落进化过程中功能性的改变。按笔者对乙酸型顶级群落的界定,在调节 COD/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比的生态演替过程中,顶级群落的类型始终是乙酸型。其稳定性的原因可以理解为: AB、SRB 与 HPA 之间复杂的种群关系增强了群落的稳定性和自适应能力,对单因子生态条件的改变缓冲能力强,并通过生理代谢调节反作用与生境获得优势种群生长繁殖的生态条件; 乙酸型顶极群落的内平衡与反馈调节能力较强,尽管生态因子的变迁使优势种群变动较大,但它们的生物学特性相似,不能彻底改变整个系统的代谢类型; 乙酸型代谢的末端产物乙酸对群落具有制约调控作用,即乙酸型顶极群落是产酸脱硫微生物生态系统的典型特征; 顶极群落中某些优势种群(如拟杆菌属、脱硫杆菌属)的生态位与反应器

内生态条件相似,污泥驯化初期已是优势种群,其优势地位不易动摇。

### 2.3 群落演替过程中优势种群的实现生态位

图3是以ORP、pH值和ALK组成的乙酸

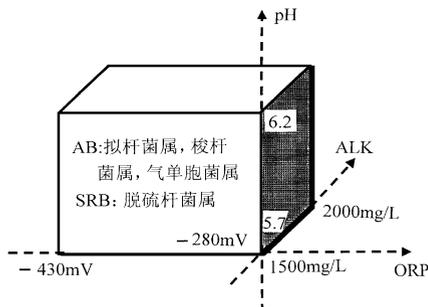


图3 生态演替过程中优势种群的实现生态位

Fig. 3 The realized ecological niche of preponderant populations in the course of ecological succession

型顶极群落中优势种群的三维实现生态位图的简化模式。可见,在生态演替过程中具有重迭生态位的种群为梭杆菌属、气单胞菌属、拟杆菌属和脱硫杆菌属。优势种群的实现生态位取决于分离生态位和重迭生态位的制约和调节。FSRB与HPA分摊竞争形成种间营养生态位分离,SRB种内也存在营养生态位特化。在生态演替过程中,为形成稳定顶极群落,FSRB(p-SRB、b-SRB、f-SRB等)、HSRB和ASRB都趋向于底物可给性最强的空间生态位,使生态位宽度增加。生态位分离与生态位重迭组合使SRB种群的实现生态位发生“浓缩”。另外,尽管资源过剩时生态位相似的种群可共存,但生态因子的改变导致种群代谢速率的不同,即在不同的群落演替阶段,每个种群的代谢活性有一定差别,表现为COD去除率、 $\text{SO}_4^{2-}$ 去除率、 $\text{H}_2\text{S}$ 浓度的差异。

### 3 结论

(1)在产酸脱硫反应器中,致变因子 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 比引发的生态演替过程的结果是形成乙酸型顶极群落,而乙酸型顶极群落呈现出其优势种群的代谢特征和特定的乙酸型代谢类型。

(2)乙酸型代谢对于产酸脱硫反应器有极为重要的意义,种群间通过生物链式的协同代谢关系,使酸性末端中乙酸的分布比例高达

50%~82%,它恰恰是后续产甲烷相的适宜底物,从而提高系统的处理效率和稳定性。

(3)尽管乙酸型顶极群落从低碳硫比稳定型向高碳硫比稳定型和低碳硫比亚稳定型的演替过程中,优势种群的数量、组成及生态因子的组合方式均呈现各自的新“质”特征,但始终未改变群落的乙酸型代谢方式,这是乙酸型顶极群落稳定性的标志。

(4)可用ORP、pH值和ALK3个重要的生态因子的组合来描述生态演替过程中优势种群的三维实现生态位图的简化模式。在不同生态条件下,即使生态位相似的种群可具有相似的生态位,但其代谢速率和活性仍有一定差异。

### 参考文献:

- 1 Satoshi Okabe et al. Microbial ecology of Sulfate-Reducing Bacteria in wastewater bio-films analyzed by microelectrodes and FISH (fluorescent in situ hybridization) technique. Wat. Sci. & Tech., 1999, 39(7): 41~47.
- 2 冀滨弘 章非娟. 高硫酸盐有机废水厌氧处理技术的进展. 中国沼气, 1999, 17(3): 3.
- 3 Seger O M et al. The behavior of sulfate-reducing bacteria in acidogenic phase of anaerobic digestion. Water Res., 1998, 32(5): 1626~1634.
- 4 Larry L. Barton, Sulfate-Reducing Bacteria, 1995.
- 5 丁琼等.  $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$  比对硫酸盐废水厌氧消化的影响. 环境科学, 1993, 14(1): 78~92.
- 6 McCartney D M et al. Competition between methanogens and sulfate reducers: effect of  $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$  ratio and acclimation, Water Environ. Res., 1993, 65.
- 7 任南琪. 一体化有机废水处理产酸发酵设备[P]. 中国专利: 98240801.3, 1998-09-21
- 8 Maree J P, W F Strydom. Biological Sulfate Removal in an Up-flow Packed Bed Reactor. Water Res., 1985, 19(9): 1101~1106.
- 9 Visser A et al. Appl. Microbiol. Biotechnol., 1993, 40: 575~581.
- 10 中国石油天然气行业标准, “油田注入水细菌分析方法——绝迹稀释法”(部颁标准), SY-T0532-93.
- 11 左剑恶, 胡纪萃. 含硫酸盐有机废水的厌氧生物处理. 环境科学, 1991, 12(3): 67~71.
- 12 Cohen A et al. Anaerobic digestion of glucose with separated acid production and methane formation. Wat. Res., 1979, 13: 571~580.
- 13 赵惠勋. 群体生态学. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1990.