

文章编号: 1006-6780(2001)01-0039-06

# 厌氧处理构筑物中SRB的生态学

任南琪, 王爱杰, 甄卫东

(哈尔滨工业大学 环境生物技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 对处理硫酸盐废水过程中, 硫酸盐还原菌 (SRB) 在处理构筑物中的生态学研究进行了综述。着重论述了影响SRB代谢的重要生态因子(包括pH值、温度、底物资源、抑制剂等), SRB与MPB和AB对H<sub>2</sub>和乙酸、VFA等共同底物的竞争利用, 并介绍了不同SRB种群对底物的竞争, 指出对SRB生态学研究的深入和完善可使硫酸盐废水的处理水平和技术不断提高。

**关键词:** 硫酸盐还原菌 (SRB); 生态学; 厌氧生物处理; 生态因子; 产甲烷菌 (MPB)

中图分类号: X703 文献标识码: A

## Ecology of SRB in anaerobic bio-treatment reactor

REN Nan-qi, WANG Ai-jie, ZHEN Wei-dong

(Research Center of Environmental Bio-technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** Sums up the ecology of sulfate-reducing-bacteria (SRB) in anaerobic bio-treatment reactor which includes 9 genus and over 100 species detected and widely distributed in the anaerobic treatment set, and depends on its biological diversity and nourishment variety, describes the important ecological factors having effect on the behavior of SRB such as pH, temperature, substrate, inhibitor, intermediate metabolite, the competition for co-substrate, such as H<sub>2</sub>, VFA, acetate, and the competition for acetate between SRB and MPB in particular, which is affected by temperature, immobilization of bacteria, concentration of sulfate and the acclimation of sludge, and the competition for substrate between different SRB population as well.

**Key words:** sulfate-reducing-bacteria (SRB); ecological factors; ecology; anaerobic bio-treatment; methane bacteria (MPB)

近年来, 随着人们对含硫酸盐有机废水厌氧生物处理的深入研究, 对硫酸盐还原菌 (SRB) 的认识也日趋成熟和完整, 很多国内外资料均报道了SRB生理学、生物化学和生态学研究的成果, 其中SRB生态学的研究一直是学术界关注的热点。在厌氧处理构筑物中, SRB既是在系统发生上具有多样性和独立性的类群, 同时又与其它有机物降解微生物有很多共同的生理生态特征<sup>[1]</sup>, 与废水厌氧处理的工艺和运行状况结合研究SRB生态学问题主要集中在: (1) 厌氧处理过程中SRB与其它微生物之间相互作用的群落生态学和种群生态学问题; (2) 如何量化限制性生态因子的强度人为创建富集SRB的生态条件; (3) 如何采取最佳的技术路线和动力学控制手段, 建立起SRB的实现生态位; (4) 利用厌氧处理过程中不同菌群协同作用, 形成降解硫酸盐与有机物的“生物链”。这些问题都是保证硫酸盐废水处理高效、稳定进行的重要因素, 为废水处理水平和处理能力的不断提高提供新的思路和有益的指导。

## 1 废水生物处理构筑物中的SRB

在制糖、制酒、制药、味精等富含硫酸盐的废水厌氧生物处理过程中, SRB是相当活跃分子,

收稿日期 2000-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59978012)

作者简介: 任南琪(1959-), 男, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师。

它以硫酸盐做最终电子受体，分解废水中的有机物，获得合成细胞物质和维持生命所需的能量。图1表明了这一过程分解代谢、电子传递和硫酸盐还原的关系。

### 1.1 SRB的生物学多样性

近年来，人们对SRB的分类法和生理学研究取得了重大突破，较成功地掌握了15个SRB种属<sup>[2,3]</sup>，其中参与废水处理的有9个属，主要的两个属为*Desulfovibrio*和*Desulfotomaculum*。前者一般为中温或低温型，不形成孢子，环境温度超过43℃会死亡；后者是中温或高温型，形成孢子。二者均为革兰氏阴性菌。这些SRB分布广泛，在利用多种有机物作电供体方面有相当惊人的能力和多样性，可以列出的作为SRB生长底物的物质接近100种<sup>[4,5]</sup>之多。

### 1.2 SRB的营养多样性

SRB是一类较独特的生理群组，人们对其营养代谢水平的研究获得了惊人的发现，它的营养多样性水平相当高，可作为硫酸盐还原电子供体的物质有氢、醇、脂肪酸(包括单羧基酸、二羧基酸)、某些氨基酸、糖、环状芳香族化合物、多种苯环取代基的酸类及长链溶解性烷烃。根据废水中SRB可利用的底物不同，SRB可分为四类：a.氧化氢的硫酸盐还原菌(HSRB) b.氧化乙酸的硫酸盐还原菌(ASRB) c.氧化较高级脂肪酸的硫酸盐还原菌(FASRB) d.氧化芳香族化合物的硫酸盐还原菌(PSRB)。

在FASRB中，一部分细菌能将高级脂肪酸完全氧化为CO<sub>2</sub>，H<sub>2</sub>O和H<sub>2</sub>S，另外的细菌则不完全氧化高级脂肪酸，其中主要产物为乙酸。Widdel在试验中证实并分离出可以氧化从C<sub>1</sub>到C<sub>18</sub>的脂肪酸、酮酸及芳香族化合物的SRB<sup>[2]</sup>。因此，当废水中有能形成短链脂肪酸的发酵细菌存在时，SRB可以完成一个完整的厌氧降解“生物链”(见图2)。

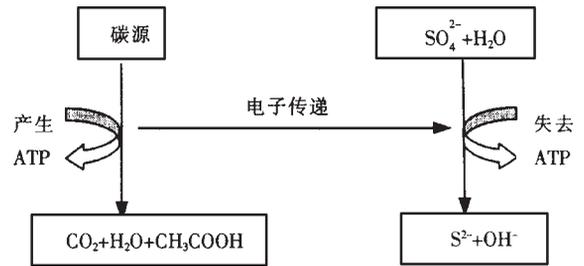


图1 SRB的代谢过程

Fig.1 The metabokism of SRB

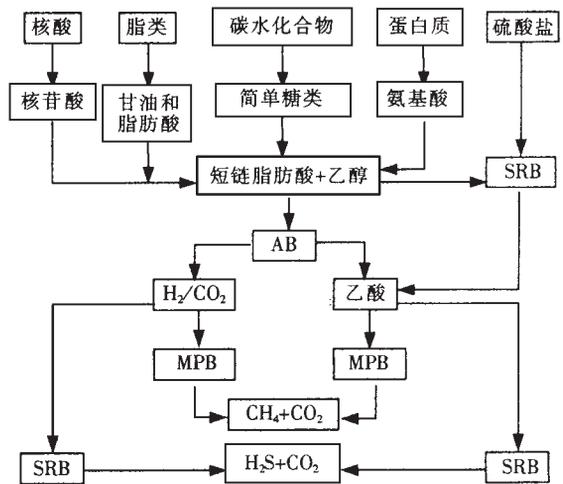


图2 MPB、SRB和AB对底物的竞争

Fig.2 The competition for substrate among MPB SRB and AB

## 2 厌氧处理构筑物中影响SRB的重要生态因子

厌氧处理构筑物中，各种生物因子、非生物因子的改变直接影响SRB的适应能力，决定其生长和活性，也决定了生态演替过程中对不同SRB种群的选择，其中较重要的生态因子有pH值、底物资源、温度、抑制剂、O<sub>2</sub>、重金属等。

### 2.1 pH值

很多学者<sup>[1]</sup>提出，SRB适合于微碱性的环境条件(7.0~8.0)，其最佳pH值条件为7.5~7.8<sup>[6]</sup>。Zobell等人发现SRB对pH值的耐受范围为5.5~9.0<sup>[7,8]</sup>，Pomeroy则认为pH值为5.0或9.0时SRB仍有较大活性<sup>[2]</sup>。近来，有人尝试在较低pH值下实现硫酸盐还原作用(因为pH值较低时，水中的H<sub>2</sub>S更易被吹脱)，发现pH值在5.0~6.0之间时SRB仍能正常生长<sup>[9]</sup>，在高酸性环境中(pH值2.5~4.5)，SRB仍能进行异化硫酸盐还原反应。

### 2.2 底物资源

SRB属于代谢谱较宽的广食性微生物，前面已述及它能代谢的有机物，可见其对细胞生长所需的碳源和能源没有特殊要求。在无机营养方面，除所需无机铁量稍高(最佳为10~15μgFe/L)外，大多数SRB与其它厌氧细菌有相似的营养结构<sup>[10]</sup>。正因为如此，在有机物厌氧降解过程中很多主要中间产物

既可被产甲烷菌(MPB)和产乙酸菌(AB)利用,又可被SRB摄取,而且它们生长的pH值和温度等因子类似,故对底物的利用是竞争性的。竞争的结果由三种菌群的反应动力学性质决定。SRB与MPB争夺共同的底物(乙酸和 $H_2$ )时,往往由于SRB对 $H_2$ 或乙酸有较高的亲和力( $K_m$ 值较低)而在竞争中取胜<sup>[1]</sup>。

### 2.3 温度

温度直接决定SRB的代谢活性和生长速度。在废水处理构筑物中,SRB对温度的依赖性是不同的,非随机性的,随着活性速率的降低它显示出更强的温度依赖性<sup>[12]</sup>。目前,还未分离到专性喜寒的SRB;中温SRB最佳生长温度为28~38℃,有报道其上限温度为45℃<sup>[13, 14]</sup>。Pomeroy和Bowlus从5℃到52℃的九个温度段上测定SRB的代谢速率,发现在38℃时速率最大<sup>[1]</sup>。Maree和Stroydom在20℃到38℃的范围内进行试验,发现中温SRB的最大生长率发生在30.5℃,温度在38℃以上时,SRB的生长受到抑制<sup>[5]</sup>;从油田水和地热环境中分离到的嗜热SRB最佳生长温度范围为54~70℃,最大生长温度范围为56~85℃。*Archaeoglobus*属的最佳生长温度为83℃,最高温度达92℃<sup>[16]</sup>。

### 2.4 氧

早期,人们认为异化SRB是严格的专性厌氧菌,且只能利用严格的厌氧技术实现对代谢谱较宽的不同SRB的分离<sup>[3]</sup>。但近期的研究结果表明SRB能在有分子氧存在的情况下存活甚至占优势。以下几个属的SRB甚至具有有氧呼吸的能力—*Desulfovibrio*, *Desulfobulbus*, *Desulfobacterium*和*Desulfococcus*。*D. desulfuricans*和*Dbt. autotrophicum*两个种可在微弱的有氧条件下生长<sup>[7]</sup>。据报道从废水中分离到的几个去磺弧菌属存在着抵抗分子氧的保护性酶,如超氧化物化酶, NADH氧化酶和过氧化氢酶,因此对氧有一定的耐受性。近期的几项研究结果表明在生物膜的有氧区SRB发生异化硫酸盐还原作用的速率较高, Jorgensen和Bak发现此时SRB的最高浓度可达 $2 \times 10^6$ /mL<sup>[11]</sup>。在处理硫酸盐废水的过程中,可以利用SRB能进行限制性氧代谢这一点,采取一定的厌氧-缺氧组合工艺,增强SRB的优势地位,提高COD和硫酸盐的去除率。

### 2.5 抑制剂

对SRB有抑制作用的金属盐有 $Na_2AsO_4$ ,  $K_2CrO_4$ ,  $PdCl_2$ ,  $CdCl_2$ ,  $Na_2MoO_4$ 等<sup>[11]</sup>。人们研究较多的是 $Na_2MoO_4$ ,因为它不仅会抑制SRB的生长,而且对MPB有激活作用,这可以提高厌氧处理中MPB对底物的竞争能力。Sorensen发现,当厌氧反应器中加入20mmol/L的 $Na_2MoO_4$ 时可以完全抑制SRB的活性,同时MPB的活性得到提高<sup>[8]</sup>。但是Karhadkar在利用酒厂废水做间歇试验时,发现加入同样浓度的 $Na_2MoO_4$ , SRB和MPB均被抑制<sup>[9]</sup>。这两种矛盾的结论可能是由于SRB的菌种来源不同,因此对毒物的响应效果不同。若经驯化,SRB对 $Na_2MoO_4$ 的耐受性应该有所提高。

### 2.6 代谢中间产物

硫酸盐废水中的 $SO_4^{2-}$ 是基本无毒性的,但它的存在使SRB产生代谢中间产物亚硫酸盐、 $H_2S$ 等对厌氧菌有相当的抑制作用,同时对SRB的生长也有一定的负反馈影响。一般认为,pH值在7.0~7.5范围内,系统中游离 $H_2S$ 的极限浓度为50mg/L,硫化物的极限浓度为200mg/L,超过这个浓度,SRB的生长和活性将受到严重的反馈抑制。Rinzema发现在连续运行的厌氧反应器中,亚硫酸盐对SRB的影响较小<sup>[20]</sup>,这是由于在此类反应器中,SRB增殖较快, $SO_3^{2-}$ 很快会继续转化而除去。Eis等证明,厌氧反应器在高达800mg/L的 $SO_3^{2-}$ 浓度时,废水处理的效果依然很好<sup>[11]</sup>。另外,硫酸盐浓度较高时,其阳离子 $Ca^{2+}$ 和 $Na^+$ 对SRB的活性也有抑制作用, $Ca^{2+}$ 可以沉积在污泥表面阻碍物质传递,并可能使污泥活性完全丧失<sup>[11]</sup>。迄今,研究反应器中SRB对 $Na^+$ 敏感性的例子不多, $Na^+$ 的50%IC(50%抑制浓度)由6~40g/L的报道都有,荷兰农业大学的研究发现产硫化物的SRB厌氧污泥在富含 $Na^+$ 废水中的50%IC为15g/L<sup>[23]</sup>。这些差别与污泥来源和驯化情况、其它金属离子的拮抗或增效作用以及试验方法均有关。

## 3 SRB、MPB和AB对底物的竞争

SRB能利用 $H_2$ 和乙酸将硫酸盐还原为硫化物,因此构成了SRB和MPB(产甲烷菌)对共同底物的争夺(见图2)。

### 3.1 SRB和MPB对氢的竞争利用

一般讲,SRB比MPB有较高的生长速率,较好的底物亲和力和较高的细胞产率。因此SRB比MPB利用氢的能力强,假如有足够的硫酸盐,所有的氢都可以被SRB利用,从SRB和MPB的热力学性质和生长动力学性质(表1<sup>[21]</sup>和表2<sup>[11]</sup>)可以证明这一点。Lovley等人发现在厌氧反应器中,与SRB共同生长的MPB几乎没有利用氢的能力,这可以解释为由于SRB更有效地利用氢,使废水中H<sub>2</sub>的浓度非常低,甚至低于MPB能利用的最低浓度<sup>[11]</sup>,从而抑制了利用氢产甲烷菌的生长。

### 3.2 SRB和MPB对乙酸的竞争利用及影响因素

乙酸是厌氧分解的最主要中间产物,通常降解COD的70%要经过乙酸而降解。表1和表2所示的SRB与MPB的热力学性质和生长动力学性质比较表明,SRB与MPB竞争乙酸时占优势,特别是在乙酸浓度较低时。但厌氧反应器中,由于生态因子和工艺条件的变动性,使SRB与MPB的竞争更趋复杂化。

#### 3.2.1 温度

中温时,利用乙酸的SRB与MPB具有同样的最适生长温度,短时间内温度对两者竞争的影响不明显。Visser<sup>[11]</sup>发现高温(55~65℃)范围内,温度的变化有利于SRB竞争底物。许多学者都肯定,在高温范围内,SRB比MPB更有竞争利用H<sub>2</sub>和乙酸的优势<sup>[11]</sup>。

#### 3.2.2 细胞的固定化

高效厌氧反应器是以细胞固定化能力强和污泥保留时间长为特征的。Alphenaar等<sup>[11]</sup>和Visser等<sup>[11]</sup>研究了UASB反应器处理含硫酸盐废水时的颗粒化形成过程,发现SRB和MPB形成颗粒的附着能力相近。Yoda等人<sup>[11]</sup>发现,SRB比MPB在填料上的吸附能力差,他们利用乙酸在厌氧流化床中研究SRB与MPB的竞争,长期连续流试验表明,乙酸浓度较低时,SRB在生物膜上占绝对优势;但乙酸浓度较高时,MPB是优占菌种。

#### 3.2.3 硫酸盐浓度

SRB的生长受到电子供体(乙酸)和电子受体(硫酸盐)两方面的制约。Visser<sup>[11]</sup>曾给出的硫酸盐浓度对SRB和MPB生长速率比值的影响(见图3),即较低的硫酸盐浓度下MPB的生长优于SRB;硫酸盐浓度较高时,由于硫酸盐向颗粒污泥内或生物膜内扩散时受到传质的限制,因此膜内或颗粒污泥内硫酸盐浓度也很低。Nielsen<sup>[11]</sup>和Lens<sup>[22]</sup>发现50mg/L的硫酸盐浓度能引起生物膜内利用乙酸的SRB产生硫酸盐缺乏,而对颗粒污泥内的SRB,这一浓度可高达300mg/L。

#### 3.2.4 污泥的类型和驯化

很多研究采用低浓度SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>废水中驯化的污泥作为种泥,这种情况下,利用乙酸的SRB的浓度在很长

表1 SRB和MPB利用H<sub>2</sub>、乙酸的K<sub>m</sub>值与自由能的比较

Table 1 Comparison of K<sub>m</sub> and G<sub>o</sub> with SRB and MPB used as H<sub>2</sub> and acetic-acid respectively

细菌	底物	K <sub>m</sub> mmol/L	自由能G <sub>o</sub> kJ
SRB	乙酸	0.2	-71.7
	H <sub>2</sub>	0.001	-152.6
MPB	乙酸	3.0	-31
	H <sub>2</sub>	0.006	-135.9

表2 SRB和MPB以乙酸为底物生长的动力学参数

Table 2 Dynamic parameters of SRB and MPB cultivating as acetic-acid

菌种	K <sub>s</sub> mmol/L	μ <sub>m</sub> 1/d	Y gVSS/mol乙酸	pH	温度 ℃
SRB					
<i>Desulfobacter</i>					
<i>D. postagei</i>	-	1.03	2.56	-	28
<i>Desulfotomaculum</i>					
<i>D. acetoxidans</i>	-	0.55	5.52	7.1	36
<i>D. acetoxidans</i>	-	1.44	7.55	7.1	36
<i>Desulfonema</i>					
<i>D. limicola</i>	-	0.55	-	7.6	30
富集培养物	0.10	0.51	-	-	31
生物膜	0.17	0.015	3.7	7.5	30
颗粒污泥	0.9	0.11		7.5	30
MPB					
<i>Methanotrix</i>					
<i>M. soehngeni</i>	0.44	0.11	1.47	7.6	37
<i>M. concili</i>	1.20	0.69	1.15	7.2	35
<i>Methanosarcina</i>					
<i>M. backeri</i>	0.69	2.4	-	6.3	35
富集培养物	5.60	0.26	3.2	-	30
富集培养物	0.55	0.037	-	7.5	30
颗粒污泥	0.9	0.08	-	7.5	30

注:K<sub>m</sub>为米氏常数;K<sub>s</sub>为生长速率;μ<sub>m</sub>为稀释率;Y为生物量增长。

时间里比MPB低得多<sup>[1]</sup>。Buisman等<sup>[23]</sup>发现COD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>比值大于20的废水中驯化的污泥,几乎没有利用乙酸还原硫酸盐的活性。大多数厌氧反应器在开始时SRB的量很低,如UASB,污泥停留时间很长,相当长的时间内SRB可能不会形成对MPB的优势生长。根据荷兰农业大学环境系的试验结果和动力学参数计算,若UASB中污泥停留时间为150d,种泥已在低硫酸盐废水中驯化,则SRB最终取得完全优势的生长需3a时间<sup>[24]</sup>。Visser等<sup>[1]</sup>发现污泥在高硫酸盐浓度的废水中驯化后,作为种泥接种于UASB中,当反应器进水中没有硫酸盐时,污泥中利用乙酸的SRB消失而利用氢的SRB仍以较高浓度存在。

### 3.3 SRB和AB对VFA的竞争利用

废水中存在硫酸盐时,挥发性脂肪酸(VFA)能以不同途径降解:a. VFA被AB(产乙酸菌)降解,这些AB与利用H<sub>2</sub>的SRB和MPB是互惠关系;b. VFA直接被SRB降解,完全氧化为CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O或不完全氧化为乙酸。由于不完全氧化时SRB有更快的生长速率,因此发生的可能性更大<sup>[24]</sup>。一般认为在较高硫酸盐浓度下,SRB的生长会占优势,因为它比AB更易生长。Visser等发现COD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>比值为10时,VFA主要由AB降解,而在较低的COD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>比值时,SRB直接利用丙酸成为主要途径。这是因为在低SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度下,利用丙酸的SRB对SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的竞争不如利用氢的SRB,因此在低SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度下,AB在与SRB竞争中占优势。

## 4 不同SRB种群对底物的竞争

表3给出了不同SRB种群对硫酸盐的亲合力大小,表明利用乙酸的富集培养物和*Desulfovibrio postagei*对硫酸盐的亲合力远小于利用氢的*Desulfovibrio*属。Laanboek<sup>[1]</sup>提出,*Desulfovibrio*、*Desulfovulbus*和*Desulfovibacter*三个属分别是利用氢、丙酸和乙酸的SRB,它们对硫酸盐的亲合力顺序为*Desulfovibrio*>*Desulfovulbus*>*Desulfovibacter*。因此,在硫酸盐浓度有限时,利用乙酸的SRB竞争不过其它SRB,使MPB有足够的乙酸作为底物生长。

## 5 结论

SRB是一类代谢谱较宽的多样性群体,在厌氧处理反应器中,各种生态因子相互影响,相互制约,共同作用于SRB构成其实现生态位,而SRB又与MPB、AB及其它厌氧菌在竞争底物资源的过程中形成了分离的生态位。从群体水平上研究SRB在厌氧处理中的功能与地位及其与其它微生物间种群关系,对硫酸盐废水处理水平的提高有重要的指导。另外,目前掀起了利用分子生物学手段研究环境微生物生态学的热潮,如荧光原位杂交(fluorescent in situ hybridization, FISH)、DNA多态性技术、PCR(polymerase chain reaction)及其相关技术等。这些技术可在不破坏生态系统原始状态的情况下,准确探明微生物在生态系统中的空间分布,并发现未知种属。这些研究方法引入到SRB生态学的研究中,必将使废水处理水平迈向一个新的高度。

### 参 考 文 献:

[1] DEVEREUX R, STAHL D A. The sulfate-reducing bacteria: contemporary perspectives, Chapter 6, Brock/Springer series in Contemporary Bioscience[M]. New York: Springer-Verlag, 1993.

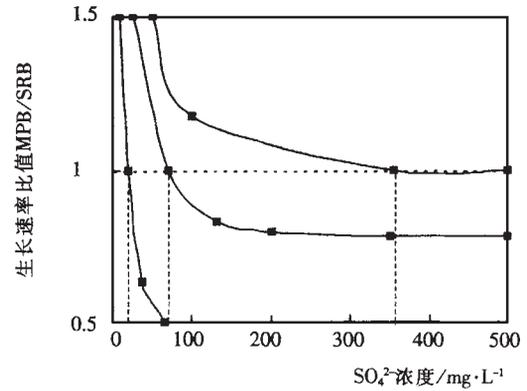


图3 硫酸盐浓度对MPB和SRB生长速率比值的影响

Fig.3 Effect of sulfate concentration on growth-rate of MPB and SRB

表3 不同SRB种群对硫酸盐的亲合力  
Table 3 Affinity for sulfate of different SRB populations

细菌名称	$K_s/\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$
<i>Desulfovibrio vulgaris</i> (Marburg)	0.5
<i>D. vulgaris</i> (Hildenborough)	3
<i>D. sapovorans</i>	0.7
<i>D. salexigens</i>	7
<i>Desulfovibacter postagei</i>	19

- [2] WIDDEL F. *Biology of Anaerobic Microorganisms*[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1988.
- [3] WIDDEL F, BAK F. *The Prokaryotes: A Handbook on the Biology of Bacteria: Ecophysiology, Isolation, Identification, Applications*, 2nd ed[M]. Now York: Springer-Verlag, 1992.
- [4] FAUQUE G, Le GALL J, BARTON L L. *Variations in Autotrophic Life* [M]. London: Academic Press, 1991.
- [5] HANSEN T A. *The Sulfate-Reducing Bacteria*[M]. Berlin: Contemporary Perspectives Springer-verlag, 1993.
- [6] MAREE J P, STRYDOM W F. Biological sulphate removal in an upflow packed bed reactor[J]. *Water Res.*, 1985, (9):1101-1106.
- [7] ZOBELL C E. Ecology of sulfate-reducing bacteria[J]. *Producers Mon.Penn. Oil Prod.Ass.*, 1958,22:12-29.
- [8] PFENNING N, WIDDEL F. *Biology of Inorganic Nitrogen and Sulfur*[M]. Berlin: Springer-verlag, 1981.
- [9] LI A. Sulfide Toxicity Reduction[P]. US patent: No.4, 588, 1986.
- [10] POSGATE J R. *Sulfate-Reducing Bacteria*[M]. Combridge, U. K: Combridge University Press,1979.
- [11] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京:中国轻工业出版社, 1998.
- [12] WESTRICH J T, BERNER R A. The effect of temperature on rates of sulfate reduction in marine sediments [J]. *geomicrobiol. J.* 1988, 6: 99-117.
- [13] WIDDEL F, PFENNING N. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*[M]. Baltimore:The Williams and wilkins Co., 1984.
- [14] WIDDEL F, HANSEN T A. *The Prokaryotes: A Handbook on the Biology of Bacteria: Ecophysiology, Isolation, Identification, Applications*, 2nd ed[M]. Now York: Springer-Verlag, 1992.
- [15] MAREE J P. Biological sulphate removal in an upflow packed bed reactor[J]. *Water Res.*, 1987, (2):141.
- [16] STETTER K O. *The Prokaryotes: A Handbook on the Biology of Bacteria: Ecophysiology, Isolation, Identification, Applications*, 2nd ed[M]. Now York: Springer-Verlag, 1992.
- [17] MARSHALL C, FRENZEL P, CYPIONKA H. Influence of oxygen on sulfate reduction and growth of sulfate-reducing bacteria[J]. *Arch.Microbiol.*, 1993, 159: 168-173.
- [18] SORENSEN J. Anaerobic Digestion of a Sulphate-Rich Molasses Wastewater: Inhibition of Hydrogen Sulphide Production[J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1981, 42: 5-11.
- [19] KARHADKAR P P. Sulfide and sulphate inhibition of methano genesis[J]. *Water Res.*, 1988, (9): 1061.
- [20] RINZEMA A, LETTINGA G. Anaerobic Treatment of Sulfate Containing Waste Water. In: D. L. Wise (ed). *Biotreatment System*[M]. Vol.3.Boca Raton, USA:CRC Press Inc., 1988.
- [21] 左剑恶, 胡纪萃. 含硫酸盐有机废水的厌氧生物处理[J]. *环境科学*, 1996, (3): 69.
- [22] LENS P. *Organic Matter Removal in Gradianted Biofilm Reactor*[D]. Belgium University of Gent, 1994.
- [23] BUISMAN C N T. *Biotechnological Sulfide Removal with Oxygen*[D]. The Netherland WAU, 1994.
- [24] VISSER A. *Anaerobic reactor technology 5*[A]. 1st Int. Course on Anaerobic and Low Cost Treatment of Wastes and Wastewater[C]. The Netherlands: IAC and WAU, 1994.