

厌氧混合培养中产甲烷菌和硫酸盐还原菌的动力学竞争*

II. 动力学推定的结果及讨论

贾晓珊, 李顺义

(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 根据前文建立的动力学模型及批量实验结果, 进行了包括乙酸及氢气利用在内的 MPB 和 SRB 的动力学常数的推定。结果显示, 以 *Methanotrix* 及 *Methanobacter* 为种属的乙酸和氢气利用 MPB; 以 *Desulfobacter postageix* 和 *Desulfobivrior* 为种属的乙酸和氢气利用 SRB 分别存在于葡萄糖消化过程中。在反映现实情况的低浓度硫酸根离子条件下, 热力学及动力学均占优势的乙酸利用 SRB 相反完全竞争不过乙酸利用 MPB。这是由于对硫酸根离子乙酸利用 SRB 竞争不过氢气利用 SRB 的缘故, 因为后者 ($K_s = 10.7 \sim 13.3 \text{ mg/L}$) 具有比前者 ($K_s = 19.5 \sim 21.4 \text{ mg/L}$) 更高的硫酸根离子亲合性。这一结果进一步显示有必要重新评价长久以来一直承担负面角色的 SRB 的作用。因为如果从有利于厌氧过程中甲烷主要产生者 - 乙酸利用 MPB 的生长这一角度来看, 适量生长的氢气利用 SRB 能够完全抑止作为对手的乙酸利用 SRB 的生长以至发挥重大的正面作用。另外, 该研究提供的动力学推定方法能简便、快速、准确的推定出微生物菌体浓度和诸动力学常数, 对于生物处理的近乎所有过程都具有参考价值。

关键词: 产甲烷菌 (MPB); 硫酸盐还原菌 (SRB); 微生物菌体浓度; 厌氧混合培养; 动力学模型; 动力学常数

中图分类号: X172 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 01-0092-06

在文献 [1] 中, 首先, 以 Monod 模型为基准建立了一系列的动力学模型用于: 微生物菌体浓度 (X_0)、最大比增长率 (μ_m)、对底物及硫酸根离子的饱和常数 (K_s) 的推定。其次, 进行了产甲烷菌 (MPB) 和硫酸盐还原菌 (SRB) 两系列的培养及批量实验。本文将根据文 [1] 的批量实验结果, 应用这些推定模型进行包括乙酸及氢气利用在内的 MPB 和 SRB 的动力学常数的推定。在此基础之上, 讨论现实的厌氧废水处理过程中 MPB 和 SRB 的动力学竞争机理。

1 动力学推定结果

1.1 系列 1 中 X_0 和 μ_m 的推定

1.1.1 乙酸利用 MPB 图 1 显示实验 A-1 及 A-2 的结果。两实验的结果均显示在乙酸的降解和甲烷的产生之间存在着明确的线性关系。图 2 所示的直线显示着两者之间的关系。斜率为 0.406 表示 MPB 降解的乙酸中 95.7% 转化为甲烷, 4.3% 转化为细胞合成。这一结果 (4.3%) 非常接近文 [2] 实验结果 (3.9%)。根据上述结果, 乙酸利用 MPB 的细胞及产物收率分别为 0.043 (Y_x) 和 0.957 (Y_p)。

将图 1 中两任意时间 t_1 和 t_2 的乙酸或甲烷浓度、细胞及产物收率分别代入文 [1] 的推定模型 (等式(16)和(17))能求出 X_0 及 μ_m 。同样, 根据图 1 中其他两任意时间 t_3 和 t_4 的数据以相似的方法也能求出 X_0 及 μ_m (见表 1)。从底物及产物两方的推定结果非常接近这一事实表明了本推定方法的合理性。

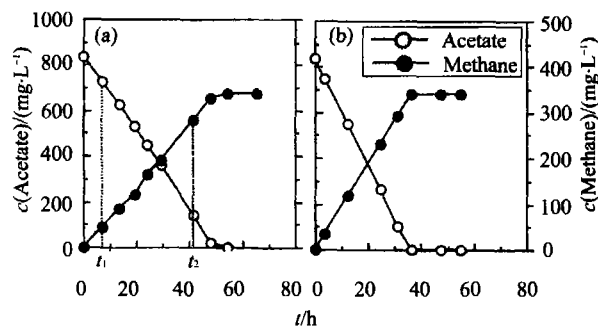


图 1 实验 A-1 (a) 和 A-2 (b) 中, 乙酸和累计甲烷浓度变化

Fig. 1 Changes of acetate concentrations and accumulated methane of runs A-1 (a) and A-2 (b)

1.1.2 氢气利用 MPB 在添加氢气的批量实验过

* 收稿日期: 2003-03-28

基金项目: 香港 RGC 资助项目

作者简介: 贾晓珊 (1962 年生), 男, 教授, 博士生导师; E-mail: eesjxs@zsu.edu.cn

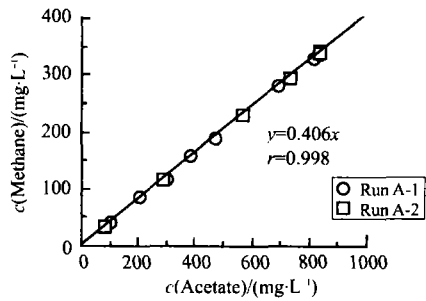


图 2 乙酸消耗量与甲烷产量的线性关系

Fig.2 Correlation between consumed acetate and methane production

程中保持着较强的震荡是为了实现污泥、混合液及气相的充分混合, 因此氢气在混合液及气相两者之间维持着瞬间平衡的关系, 且这种平衡关系依照亨利准则。由于气相中氢气的定量分析远较混合液相方便和准确, 因此本研究中将气相中氢气的变化来推定氢气利用 MPB 或 SRB 的动力学常数。

图 3 表明实验 H-1 及 H-2 的结果均显示在氢气的降解和甲烷的产生之间存在着明确的线性关系。同样, 图 4 所示的直线显示着两者之间的关系。斜率为 0.271 表示 MPB 降解的氢气中 95.6% 转化为甲烷, 4.4% 为细胞合成。这一结果 (4.4%) 非常接近文 [3] 的实验结果 (5.6%)。根据上述结果, 本研究的氢气利用 MPB 的细胞及产物收率分别为 0.044 (Y_x) 和 0.956 (Y_p)。

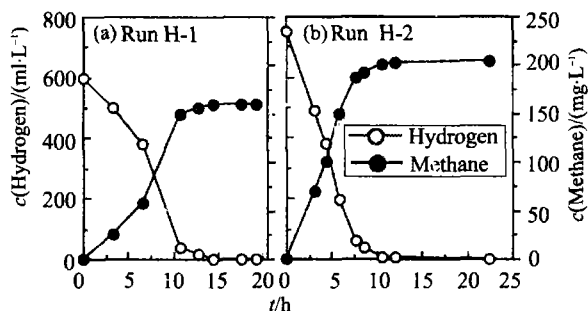


图 3 实验 H-1 (a) 和 H-2 (b) 氢气浓度和累积乙酸浓度的变化

Fig.3 Changes of hydrogen concentrations and accumulated methane of Runs H-1 and H-2

根据前述的方法求出氢气利用 MPB 的 X_0 及 μ_m (表 1)。与乙酸利用 MPB 的结果同样显示着从底物及产物两方的推定结果非常接近。

1.2 系列 2 中 X_0 和 μ_m 的推定

在添加硫酸根离子的情况下, 不仅仅 MPB, 乙酸和氢气利用的 SRB 也有可能存在于系列 2 中。由 5, 6 图中的硫酸根离子的被利用和甲烷的产生

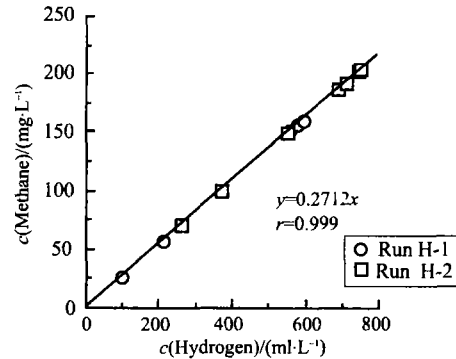


图 4 氢气消耗量与乙酸产量的线性关系

Fig.4 Correlation between consumed hydrogen and methane production

分别确认了 SRB 和 MPB 同时存在于系列 2 中。如果 SRB 和 MPB 的产率系数已知的话, 利用前述的方法分别能从底物及产物两方的变化推定出 SRB 和 MPB 的动力学常数。

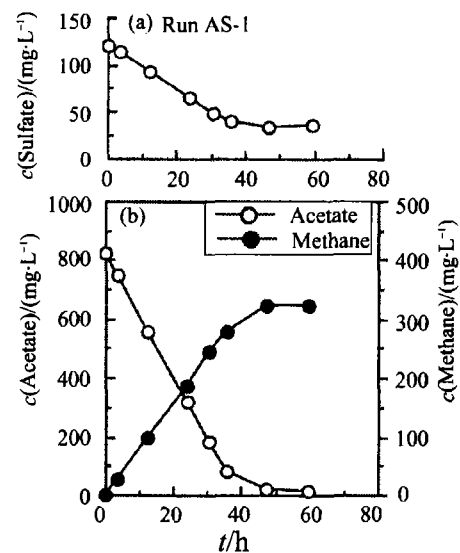


图 5 实验 AS-1 中, 硫酸盐 (a), 乙酸和累积甲烷 (b) 浓度的变化

Fig.5 Changes of sulfate concentration (a), acetate concentration and accumulated methane (b) of Runs AS-1

氢气利用 SRB 的 Y_x 为 0.059 mg-VSS/mg-COD^[2], 如换算成 COD 则为 0.072 mg-COD-Cell/mg-COD (0.059 × 1.22 mg-COD-Cell/mg-VSS); Y_p 则为 0.928 mg-COD-CH₄/mg-COD (1 - 0.072)。这里 1.22 为细胞组成 C₅H₇O₃N 的换算系数^[4]。

乙酸利用 SRB 的 Y_x 和 Y_p 值分别取为 0.050 mg-COD-Cell/mg-COD 和 0.950 mg-COD-CH₄/mg-COD^[5]。由表 1 可知系列 2 中乙酸和氢气利用 MPB 的 μ_m 分别为 0.12 和 1.33 ~ 1.46 d⁻¹, 非常接

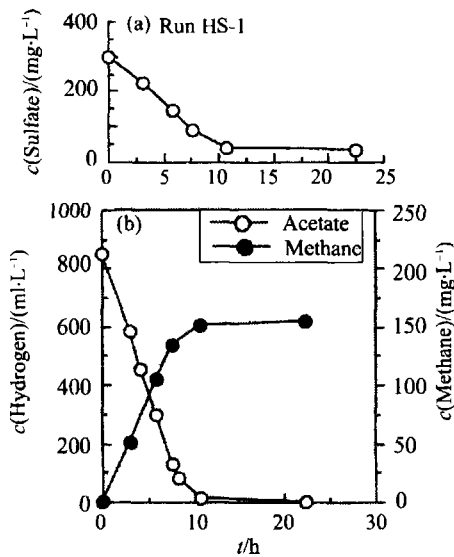


图 6 实验 HS-1 中, 硫酸盐 (a), 氢气和累积乙酸 (b) 浓度的变化

Fig.6 Changes of sulfate concentration (a), hydrogen concentration and accumulated methane (b) of Runs HS-1

近系列 1 的推定结果, 显示着两系列的乙酸和氢气利用 MPB 为同一类型的菌种。

1.3 K_s 的推定

图 7 给出了实验 A-1 中乙酸利用 MPB 的 K_s 分别从底物及产物变化求得的计算例。推定结果分别为 32.5 (底物) 和 35.5 (产物), 非常接近。同样, 其他各实验的推定结果分别汇总在表 1。

另外, 根据文献 [1] 的反应 (3) 和 (4), 以硫酸根离子浓度作为限制底物考虑的话, 同样这里 K_s 的推定方法也适用于 SRB 的硫酸根离子饱和常数。图 7 (c) 分别显示实验 AS-1 及 HS-1 中, 乙酸及氢气利用 SRB 的硫酸根离子饱和常数的计算。双方的推定结果分别为 19.5 和 13.3 mg/L。同样, 从实验 AS-2 及 HS-2 推定的乙酸及氢气利用 SRB 的硫酸根离子饱和常数分别为 21.4 和 10.7 mg/L。双方非常接近的推定结果, 显示着该系列不同 HRT 的乙酸和氢气利用 SRB 为同一类型的菌种。

2 讨论

2.1 葡萄糖消化过程中的 MPB 和 SRB

表 2 汇总了乙酸和氢气利用 MPB 和 SRB 动力学常数的推定结果和一些相关的文献数据^[5-20]。在微生物纯培养中, 在温度 33 ~ 37 °C 的条件下, *Methanotrix* 种属的乙酸利用 MPB 的动力学常数 μ_m 、 K_s 、 Y_x 分别为: 0.11 ~ 0.16 d⁻¹; 29.4 ~ 45 mg/L; 0.024 ~ 0.037 mg/L。在 35 ~ 36 °C 的温度条

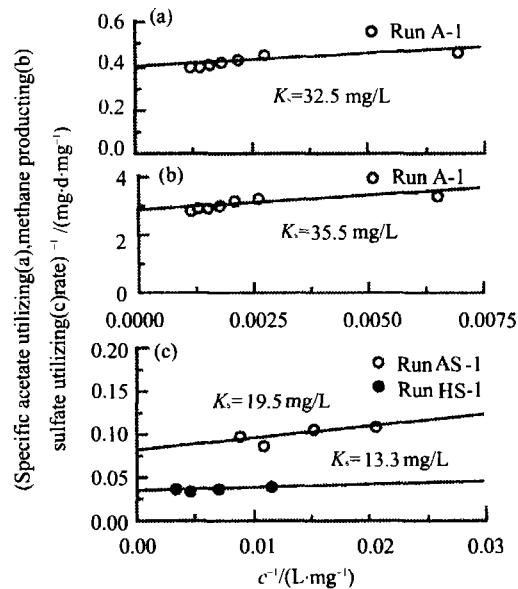


图 7 饱和动力学常数 K_s 推定

Fig.7 Estimation of saturation constant K_s

乙酸利用 MPB 和 K_s 由实验 A-1 中乙酸 (a) 和甲烷 (b) 浓度变化推定;

乙酸和氢气利用 SRB 的 K_s 由实验 AS-1 和 HS-1 中, 硫酸根浓度变化推定

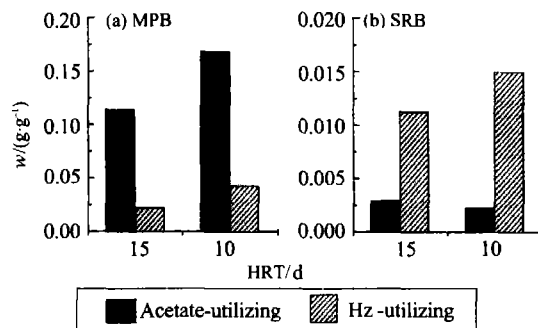


图 8 系列 2 微生物菌体浓度的变化

Fig.8 Changes of each bacterial mass concentration of Series 2

件下, *Methanosarcina* 种属的乙酸利用 MPB 的动力学常数 μ_m 、 K_s 、 Y_x 分别为: 0.44 ~ 0.91 d⁻¹; 320 ~ 1 860 mg/L; 0.037 ~ 0.050 mg/L。本研究推定的各常数分别为 0.09 ~ 0.12 (μ_m); 31 ~ 35.5 (K_s); 0.043 (Y_x), 非常接近 *Methanotrix* 种属的文献数据。另外, 同样在微生物纯培养中, 在温度 33 ~ 37 °C 的条件下, *Methanobacter* 种属的氢气利用 MPB 的动力学常数 μ_m 、 K_s 、 Y_x 分别为: 1.26 ~ 2.0 d⁻¹; 0.032 ~ 0.6 mg/L; 0.02 ~ 0.05 mg/L。本研究的各常数分别为 1.33 ~ 1.65 (μ_m); 0.36 ~ 0.54 (K_s); 0.044 (Y_x), 非常接近 *Methanobacter* 种属的文献数据。这些结果表明在葡萄糖的消化过程中,

产甲烷菌主要是 *Methanothrix* 和 *Methanobacter* 为种属的乙酸和氢气利用 MPB。同样的结果也被报道在 Labat 等^[21] 和 Wu 等^[22] 的研究中。另外本研究的结果同样揭示了以 *Methanothrix* 为种属的乙酸利用 MPB 的存在量是以 *Methanobacter* 为种属的氢气利用 MPB 的 8.2 ~ 10.8 倍（表 1）。这非常接近 Labat 等^[21] 报道的 10 倍的结果。

另外，如表 2 所示 *Desulfobacter postageix* 种属的乙酸利用 SRB 的动力学常数 (μ_m 、 K_s 、 $K_s(\text{sulfate})$) 分别为：0.72 ~ 1.03 L/d; 4.5 ~ 14.7 mg/L; 4.8 ~ 19.2 mg/L。 *Desulfovibrio* 种属的氢气利用 SRB 的动力学常数 (μ_m 、 K_s 、 $K_s(\text{sulfate})$) 分别为：1.37 ~ 3.6 L/d; 0.02 ~ 0.053 mg/L; 4.8 ~ 19.2 mg/L。

表 1 系列 1 和系列 2 的推定结果¹⁾

Tab.1 The estimated results of the Series 1

系列 I	Acetate-utilizing MPB						Hydrogen-utilizing MPB						
	$X_0/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		μ_m/d^{-1}		$K_s/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		$X_0/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		μ_m/d^{-1}		$K_s/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		
	HRT	1 ¹⁾	2 ²⁾	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	15	145 ± 16	160 ± 11	0.12 ± 0.02	0.12 ± 0.01	32.5	35.5	13 ± 2.2	15 ± 2.2	1.53 ± 0.12	1.48 ± 0.23	- ³⁾	- ³⁾
10	290 ± 21	317 ± 25	0.10 ± 0.02	31.0	32.4	36 ± 3.4	38 ± 3.4	38 ± 2.7	1.56 ± 0.21	1.65 ± 0.22	0.54	0.49	
系列 II	Acetate-utilizing bacteria						Hydrogen-utilizing bacteria						
	$X_0/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		μ_m/d^{-1}		$K_s/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		$X_0/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		μ_m/d^{-1}		$K_s/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		
	HRT	MPB	SRB	MPB	SRB	MPB	SRB	MPB	SRB	MPB	SRB	MPB	SRB
	15	187 ± 17	4.5 ± 0.4	0.12 ± 0.01	0.35 ± 0.03	33.8	20.7	36 ± 3.8	19 ± 2.3	1.33 ± 0.14	1.39 ± 0.25	0.36 ¹⁾	0.42 ¹⁾
10	185 ± 14	2.5 ± 0.3	0.12 ± 0.02	0.31 ± 0.03	35.1	19.3	46 ± 4.2	17 ± 1.8	1.46 ± 0.08	1.66 ± 0.25	0.42 ¹⁾	0.034 ¹⁾	

1) 由基质如乙酸和氢气的浓度变化推定的；2) 由产物如甲烷的浓度变化推定的；3) 由于误差太大不能推定

表 2 乙酸和氢气利用 MPB 和 SRB 的动力学常数

Tab.2 The kinetic constants for acetate-and hydrogen-utilizing MPB and SRB

Bacteria	Substrate	K_s ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	K_s ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	μ_m d^{-1}	Y_s ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	T $^{\circ}\text{C}$	文献
MPB, mixed culture	HAc	31.0 ~ 35.5		0.09 ~ 0.12	0.043 ¹⁾	37	本文
<i>Methanothrix soehngenii</i>	HAc	29.4		0.11	0.037	33	[6]
<i>Methanothrix soehngenii</i>	HAc	45		0.16	0.024	37	[8]
<i>Methanosarcina strain 227</i>	HAc	320		0.60	0.04	36	[8]
<i>Methanosarcina barkeri</i>	HAc			0.44	0.05	36	[9]
<i>Methanosarcina strain 227</i>	HAc	1867		0.91		35	[9]
<i>Methanosarcina mazei</i> S6	HAc	1067		0.70	0.037	35	[8]
SRB, mixed culture	HAc/SO ₄ ²⁻	19.3 ~ 20.7	19.5 ~ 21.4	0.31 ~ 0.35		37	本文
<i>Desulfobacter postagei</i>	HAc/SO ₄ ²⁻	14.7		1.03	0.04		[5]
<i>Desulfobacter postagei</i>	HAc/SO ₄ ²⁻	4.5	19.2	0.72	0.067	30	[10]
<i>Desulfobacter postagei</i>	HAc/SO ₄ ²⁻		4.8 ~ 9.6				[11]
<i>Desulfobacter postagei</i>	HAc/SO ₄ ²⁻	12.8				30	[12]
<i>Desulfomaculum acetoxidans</i>	HAc/SO ₄ ²⁻			0.69 ~ 1.4	0.085	36	[13]
<i>Desulfonema limicola</i>	HAc/SO ₄ ²⁻			0.55		30	[1433]
MPB, mixed culture	H ₂ /CO ₂	0.36 ~ 0.54		1.33 ~ 1.65	0.044 ¹⁾	37	[15]
<i>Methanobacter formicicum</i>	H ₂ /CO ₂	0.32		2.0	0.05		[16]
<i>Desulfobacter</i> Strain AZ	H ₂ /CO ₂	0.6		1.4	0.04	33	[17]
<i>Methanobrevibacter crboriphilus</i>	H ₂ /CO ₂	0.016				35	[18]
SRB, mixed culture	H ₂ /SO ₄ ²⁻	0.034 ~ 0.042	10.7 ~ 13.3	1.39 ~ 1.66		37	本文
<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	H ₂ /SO ₄ ²⁻	0.02				35	[18]
<i>Desulfovibrio</i> sp.	H ₂ /SO ₄ ²⁻	0.53		1.37	0.053	37	[15]
<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	H ₂ /SO ₄ ²⁻			3.6	0.07	35	[19]
<i>Desulfovibrio gigas</i>	H ₂ /SO ₄ ²⁻			1.37	0.11 ~ 0.13	35	[20]

这些都非常接近本研究的结果, 同样表明在比较低浓度硫酸根离子的葡萄糖消化过程中, 硫酸盐还原菌主要是 *Desulfobacter postageix* 和 *Desulfotribrio* 为种属的乙酸和氢气利用 SRB。同样的结果也被报道在 UASB^[22] 和 Biofilms^[23] 过程中。

2.2 低硫酸盐浓度条件下 MPB 和 SRB 的竞争

在讨论 MPB 和 SRB 的竞争关系时, 动力学常数是一个非常重要的影响因素。竞争的结果最终反映在 MPB 和 SRB 两者存在于反应系统中的生物浓度。本研究中, MPB 和 SRB 的动力学常数汇总在表 2 中; MPB 和 SRB 两者存在于系列 2 中的生物浓度的变化显示在图 8 中。

对于氢气, 动力学常数的比较显示着 SRB 能完全竞争过相对的 MPB。即使在低浓度的硫酸根离子条件下, 也能相当的成长最终达至于 MPB 的 51.4%。另外, 对于乙酸, 动力学常数的比较显示着 SRB 也能完全竞争过相对的 MPB。但是本研究显示出非常有意思的完全不同的结果。根据图 8, 在 HRT 等于 15 d 的条件下, 反而绝对多量的 MPB 存在于系统之中 (MPB/SRB 体积比为 100:2.41)。在 HRT 进一步减少到等于 10 d (更有利于 SRB 生长) 的条件下, 乙酸利用 SRB 的生物浓度相反进一步减少到 HRT 等于 15 d 的 80%, 氢气利用 SRB 的生物浓度则对应进一步增加到 HRT 等于 15 d 的 133%。这些结果表明在低浓度的硫酸根离子条件下, 乙酸利用 SRB 的生长并没有完全依照动力学常数所示的那样取得优势, 而是受到了严重的抑制。

在硫酸根离子浓度受限制的情形下, SRB 则不能发挥其最大的竞争能力, 其受到一个称为硫酸根离子饱和常数^[10]的影响。硫酸根离子饱和常数不但影响不同种类 SRB 之间的对硫酸根离子的竞争, 同时还进一步决定 MPB 和 SRB 之间的对底物乙酸和氢的竞争结果。在本研究的条件下, 乙酸和氢气利用 SRB 的硫酸根离子饱和常数分别为 19.5 ~ 21.4 和 10.7 ~ 13.3 mg/L, 显示着氢气利用 SRB 具有明显的对硫酸根离子的亲和优势。在稳定状态的 CSTR 运行时, 反应器维持着分别为 10.3 (HRT = 15 d) 和 15.4 mg/L (HRT = 10 d) 程度的低硫酸根离子浓度, 具有明显的对硫酸根离子亲和优势的氢气利用 SRB, 完全取得了生长优势。从有利于厌氧过程甲烷产生的 70% 以上的承担者 - 乙酸利用 MPB 的生长这一角度来看, 优势生长的氢气利用 SRB 能够完全抑止作为对手的乙酸利用 SRB 生长以至发挥重大的作用。

参考文献:

- [1] 贾晓珊, 李顺义. 厌氧混合培养中产甲烷菌和硫酸盐还原菌的动力学竞争 I. 动力学竞争推定的模型及实验方法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(6): 103 - 106.
- [2] FANG H H P, JIA X S. Microbial products (SMP) of acetotrophic methanogenesis [J]. Bioresource Technology, 1998, 66: 235 - 239.
- [3] JIA X S, FURUMAI H, FANG H H P. Extracellular polymers of hydrogen-utilizing methanogenic and sulfate-reducing sludges[J]. Wat Res, 1996, 30: 1439 - 1444.
- [4] JIA X S, FANG H H P. Methanogenic characteristics of formate-utilizing sludge [J]. J Environmental Engineering, 1999, 125(7): 596 - 601.
- [5] BRANDIS A, GEBHARDT N A, THAUER R K, et al. Anaerobic acetate oxidation to CO₂ by *desulfobacter postagei* [J]. Arch Microbiol, 1983, 136: 222 - 228.
- [6] ZEHNDER A J B, HUSER B A, BROCK T D, et al. Characterization of an acetate-decarboxylating non-hydrogen-oxidizing methane bacterium [J]. Arch Microbiol, 1980, 124: 1 - 11.
- [7] HUSER B A, WUHRMANN K, ZEHNDER A J B. Methanotrix *Soehngenii* gen. nov. sp. nov., a new acetotrophic non-hydrogen-oxidizing methane bacterium [J]. Arch Microbiol, 1980, 132: 1 - 9.
- [8] SMITH M R, MAH R A. Growth and methanogenesis by methanosarcina strain 227 on acetate and methanol [J]. Appl Environ Microbiol, 1978, 36(6): 870 - 879.
- [9] YANG S T, OKOS M R. Kinetic study and mathematical modeling of methanogenesis of acetate using pure cultures of methanogens [J]. Biotech Bioengr, 1987, 30: 661 - 667.
- [10] INGVOSEN K, ZEHNDER A J B, JORGENSEN B B. Kinetics of sulfate and acetate uptake by *desulfobacter postgatei* [J]. Appl Environ Microbiol, 1984, 47: 403 - 408.
- [11] INGVOSEN K, ZEIKUS J G, BROCK T D. Dynamics of bacterial sulfate reduction in a Eutrophic Lake [J]. Appl Environ Microbiol, 1981, 42: 1029 - 1036.
- [12] SCHONHEIT P, KRISTJANSSON J K, THAUER R K. Kinetic mechanism for the ability of sulfate reducers to out-compete methanogens for acetate [J]. Arch Microbiol, 1982, 132: 285 - 288.
- [13] WIDDET F, PFENNIG N. A new anaerobic, sporing, acetate-oxidizing, sulfate-reducing bacterium, *Desulfotomaculum (emend) acetoxidans* [J]. Arch Microbiol, 1977, 122: 119 - 122.
- [14] ALPHENAAR P A, VISSER A, LETTINGA G. The effect of liquid upward velocity and hydraulic retention time on granulation in UASB reactors treating wastewater with a high

- sulphate content [J]. *Bioresource Technology*, 1993, 43: 249 – 258.
- [15] RPBOMSPM J A, TOIEDJE J M. Competition between sulfate-reduction and methanogenic bacteria for H_2 under resting and growing conditions [J]. *Arch Microbiol*, 1984, 137: 26 – 32.
- [16] SCHAURE N L, FERRY J G. Metabolism of formate in methanobacterium formicicum [J]. *J Bacteriol*, 1980, 142: 800 – 807.
- [17] ZEHNDER A J B, WUHRMANN K. Physiology of a methanobacter strain. AZ [J]. *Arch Microbiol*, 1977, 111: 199 – 205.
- [18] KRISTJANSSON J K, SCHONHEIT P, THAUER R K. Different K_s values for hydrogen of methanogenic bacteria and sulfate reducing bacteria: an explanation for the apparent inhibition of methanogenesis by sulfate [J]. *Arch Microbiol*, 1982, 131: 278 – 232.
- [19] ADZIONG W, THAUER R K. Growth yields and growth rates of *Desulfovibrio vulgaris* (Marburg) growing on hydrogen plus sulfate and hydrogen plus thiosulfate as the sole energy sources [J]. *Arch Microbiol*, 1978, 117: 209 – 214.
- [20] BRANDIS A, THAUER R K. Growth of *Desulfovibrio* species on hydrogen plus sulphate as sole energy source [J]. *J Gen Microbiol*, 1981, 126: 249 – 252.
- [21] LABAT M, GARCIA J L. Study on the development of methanogenic microflora during anaerobic digestion of sugar beet pulp [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1986, 25: 163 – 168.
- [22] WU W M, HICKEY B F, ZEIKUS J E. Characterization of metabolic performance of methanogenic granules treating brewery wastewater: role of sulfate-reducing bacteria [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1991, 57: 3438 – 3449.
- [23] RASKIN L, RITTMANN B E, STAHL D A. Competition and coexistence of sulfate-reducing and methanogenic populations in anaerobic biofilms [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1996, 62: 3847 – 3857.

Kinetic Competition Between Methanogenic and Sulfate-Reducing Bacteria in Anaerobic Mixed Cultures

II . Results and Discussion

JIA Xiao-shan, LI Shun-yi

(Department of Environmental Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The estimated kinetic parameters showed that *Methanotrix*, *Methanobacter*, *Desulfobacter postagei* and *Desulfovibrio* like MPB and SRB were presented during the glucose degradation process. The SRB cannot out-compete MPB for acetate at low concentration of sulfate. This was due to the acetate-utilizing SRB cannot out-compete the hydrogen-utilizing SRB for sulfate, because the latter has a higher ($K_s = 10.7 \sim 13.3$ mg/L) affinity than former (19.5 ~ 21.4 mg/L) for sulfate. It reveals that the hydrogen-utilizing SRB is obviously favorable for acetate-utilizing MPB to out-grow the acetate-utilizing SRB and have been believed to play a critical role in a practical methanogenic process.

Key words: methane-producing bacteria (MPB); sulfate-reducing bacteria (SRB); bacterial mass concentration; anaerobic mixed culture; kinetic parameter