

# 脱硫弧菌 SRB7 对重金属铬 Cr(VI)的还原特性

马小珍<sup>1</sup> 费保进<sup>1</sup> 金楠<sup>1</sup> 赵锐<sup>1</sup> 兰贵红<sup>1</sup> 陈涛<sup>2</sup> 乔代蓉<sup>1\*</sup>

(1. 四川大学生命科学学院 四川 成都 610064)

(2. 上海天美科学仪器有限公司成都分公司 四川 成都 610041)

**摘要:** 利用化工厂污泥废水中分离到的一株耐酸脱硫弧菌(*Desulfovibrio* SRB7), 对不同 pH、温度、碳源、菌废比等条件下 SRB7 还原 Cr(VI)能力进行研究。并从 H<sub>2</sub>S 还原途径、电子传递途径以及胞外聚合物(EPS)吸附途径研究 SRB7 菌体整体去除 Cr(VI)的特性。结果表明: 当 Cr(VI)起始浓度为 50 mg/L 时, pH 7.5, 培养温度 36°C, 碳源为乳酸钠, 混合菌液和 Cr(VI)溶液的菌废比为 1:5(V/V)能获得很好的还原效果。在 SRB7 去除 Cr(VI)的特性中, 吸附途径对 Cr(VI)的去除几乎不起作用; 电子传递途径在 Cr(VI)的还原过程中不占优势, 24 h 去除率为 51.42%; 而 H<sub>2</sub>S 途径在 Cr(VI)的还原过程中占主导地位, 24 h 去除率为 78.02%。

**关键词:** 脱硫弧菌 SRB7, 还原条件, H<sub>2</sub>S 途径, 电子传递途径, 吸附途径

## Characteristics of Reduce Cr(VI) by *Desulfovibrio* SRB7

MA Xiao-Zhen<sup>1</sup> FEI Bao-Jin<sup>1</sup> JIN Nan<sup>1</sup> ZHAO Rui<sup>1</sup> LAN Gui-Hong<sup>1</sup>  
CHEN Tao<sup>2</sup> QIAO Dai-Rong<sup>1\*</sup>

(1. College of Life Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

(2. Shanghai Tianmei Scientific Instrument Limited Company Chengdu Branch Office, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** Pollution of heavy metal chromium Cr(VI) in environment would cause cancer. Chromium Cr(VI) was defined as one of 129 important pollutants by American EPA. This study was carried out on the conditions of removal Cr(VI) including different originated pH, temperature, carbon source and the volume ratio of bacteria to wastewater using an acidproof *Desulfovibrio* (SRB7) which was departed from sewage sludge effluent water of a chemical plant. Meanwhile the characteristics of reducing Cr(VI) through sulfureted hydrogen approach, electron transfer approach and adsorption approach were studied. The results showed that the conditions of removal Cr(VI) were as follows: pH 7.5, temperature 36°C, using lactate sodium as the carbon sources and the volume ratio of bacteria to wastewater at 1:5(V/V), when the influent concentration was 50 mg/L. In this study for characteristics of reducing Cr(VI) by SRB7, adsorption approach couldn't remove Cr(VI); electron transfer approach which removed 51.42% of the Cr(VI) at 24 h, was not preponderant in the process of reduce Cr(VI); sulfureted hydrogen approach which removed 78.02% of the Cr(VI) at 24 h, was preponderant in the process of reduce Cr(VI).

**Keywords:** *Desulfovibrio* SRB7, Reduce conditions, Sulfureted hydrogen approach, Electron transfer approach, Adsorption approach

基金项目: 国家微生物资源平台项目(No. 2005DKA21208-7); 四川省条件平台项目(No. 07PT-03); 四川省支撑计划项目(No. 2008GZ0021); 国家基础性工作专项(No. SB2007FY400)

\* 通讯作者: Tel: 86-28-85412842; 信箱: qiaodr@sohu.com

收稿日期: 2008-12-25; 接受日期: 2009-02-26

© 中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 <http://journals.im.ac.cn>

铬 Cr 是生物新陈代谢过程中必需元素之一, 而摄入过量则产生毒害。铬在环境中主要以 Cr(III)和 Cr(VI)的形式存在, 其中 Cr(VI)毒性很大且能致癌, 为美国 EPA 公认的 129 种重点污染物之一, 也是我国重点整治的污染物。Cr(VI)广泛存在于工业废水中<sup>[1]</sup>, 如不经处理直接排入水体, 将对生态环境和人类生存产生巨大危害。而 Cr(III)毒性较低。处理 Cr(VI)的传统方法主要有化学还原、电解、渗析等<sup>[2,3]</sup>。这些方法有一定效果, 但耗资较大, 还可能造成二次污染。而利用微生物还原 Cr(VI), 不仅去除效率高, 而且运行成本低。

硫酸盐还原细菌 (Sulfate-reducing bacterium, SRB), 是指一类具有能把硫酸盐、亚硫酸盐、硫代硫酸盐等硫氧化物以及元素硫还原形成硫化氢这一生理特性的细菌的统称<sup>[4]</sup>, 共包括脱硫弧菌属、脱硫单胞菌属等 12 个属。大多数硫酸盐还原菌都可以利用硫酸盐、硫代硫酸盐等作为电子受体, 以乳酸盐、氢气、乙酸盐等作为电子供体, 将高价态的金属如: 铬 Cr(VI)、锰 Mn(IV)、铀 U(VI)等还原为低价态、易还原的形式。现在对于硫酸盐还原菌的研究方面主要在烟气脱硫和酸性矿山废水处理方面, 对于处理重金属离子废水的研究不如上述两个方面广泛, 且多数是以  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  等金属阳离子为对象, 对在阴离子基团如  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  中的重金属研究较少。目前的研究已提出 3 种硫酸盐还原菌还原去除重金属的途径, 分别为:  $\text{H}_2\text{S}$  还原途径、电子传递途径以及胞外聚合物(EPS)吸附途径, 但在对 Cr(VI)还原去除的研究中, 多只对硫酸盐还原菌的其中一种还原途径进行研究, 因此还需要对其还原去除 Cr(VI)的途径进行综合研究。

本实验室分离鉴定了一株耐酸脱硫弧菌 (*Desulfovibrio*)<sup>[5]</sup> SRB7。该菌属于中温菌, 具有较宽的 pH 生长范围(5.0~8.5)和很强的耐酸性能, 碳源利用范围广。本文以 SRB7 为研究对象, 建立了去除 Cr(VI)的适宜条件, 然后分别从吸附途径、电子传递途径和  $\text{H}_2\text{S}$  途径研究了硫酸盐还原菌(SRB)整体去除 Cr(VI)的特性, 确定了占主导地位的途径, 为将来 SRB7 的工业应用奠定了基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料

1.1.1 菌株: 由本实验室分离保存一株脱硫弧菌属

菌株(SRB7)。

1.1.2 培养基: 每 1 L 硫酸盐还原菌培养基配方为: NaCl 2.0 g,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1.0 g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  2.0 g,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0.5 g,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.5 g, 70% 乳酸钠 5 mL, 酵母膏 1.0 g, 调 pH 7.5。

### 1.2 硫酸盐还原菌的培养

制备 500 mL 液体培养基, 高纯  $\text{N}_2$  赶氧,  $1 \times 10^5$  Pa 灭菌 20 min。待培养基冷却后, 将 SRB7 菌株以接种量 10% 接种于培养基中, 放  $36^\circ\text{C}$  恒温培养箱培养 3 d。当有臭鸡蛋气味产生时, 用注射器抽取少量菌液在醋酸铅试纸上检验, 如果试纸变黑, 说明 SRB 已大量繁殖。

### 1.3 铬 Cr(VI)的测定

采用二苯碳酰二肼分光光度法(GB/T 15555.5—1995)测定铬 Cr(VI)浓度。

### 1.4 脱硫弧菌 SRB7 对 Cr(VI)的还原

将 50 mg/L 的铬 Cr(VI)标准溶液装满 1 个有效容量为 100 mL 的输液瓶, 用注射器吸取 15 mL 菌液于透析袋中, 扎紧, 放入上述输液瓶, 在  $36^\circ\text{C}$  恒温培养箱中培养 24 h, 每隔 2 h 测量溶液中剩余 Cr(VI)的浓度。此后 Cr(VI)还原研究均基于此方法。

### 1.5 脱硫弧菌 SRB7 对 Cr(VI)的还原条件研究

1.5.1 不同温度对 SRB7 还原 Cr(VI)的影响: 分别设定  $25^\circ\text{C}$ 、 $36^\circ\text{C}$ 、 $45^\circ\text{C}$  和  $55^\circ\text{C}$  的温度梯度, 测定其对 Cr(VI)还原的影响。

1.5.2 不同 pH 对 SRB7 还原 Cr(VI)的影响: 分别设定 pH 4.0、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0、9.5 的梯度, 测定其对 Cr(VI)还原的影响。

1.5.3 不同碳源对 SRB7 还原 Cr(VI)的影响: 分别以甲酸钠、乙酸钠、乙醇、丙酸钠、乳酸钠 5 种碳源培养 SRB7, 测定其对 Cr(VI)还原的影响。

1.5.4 不同菌废比对 SRB7 还原 Cr(VI)的影响: 分别设定 1:10、1.5:10、1:5 和 1:4 的菌废比, 测定其对 Cr(VI)还原的影响。

### 1.6 脱硫弧菌 SRB7 还原铬 Cr(VI)特性的初步研究

1.6.1 SRB7 还原 Cr(VI)吸附途径的研究: 收集并浓缩 EPS<sup>[6]</sup>, 移取 15 mL 浓缩 EPS 于透析袋中, 测定其对 Cr(VI)去除能力。

1.6.2 SRB7 还原 Cr(VI)电子转移途径的研究: 制备电子转移途径所需菌液细胞<sup>[7]</sup>, 吸取 15 mL 处理过的菌液细胞于透析袋中, 测定其对 Cr(VI)去除能力。

1.6.3 SRB7 还原 Cr(VI)  $\text{H}_2\text{S}$  途径的研究: 取 100 mL

经培养后的菌液, 4000 r/min 离心 30 min 得到含  $H_2S$  的上清液。吸取 15 mL 上清液于透析袋中, 测定其对 Cr(VI) 去除能力。

## 2 结果与分析

### 2.1 脱硫弧菌 SRB7 对 Cr(VI) 的还原

SRB7 对铬 Cr(VI) 的还原效果见图 1。从图 1 中可以看出, 2 h 后铬 Cr(VI) 的去除率就达到 69.84%, 此后一直保持很强的还原能力, 在 24 h 达到 96.86%。

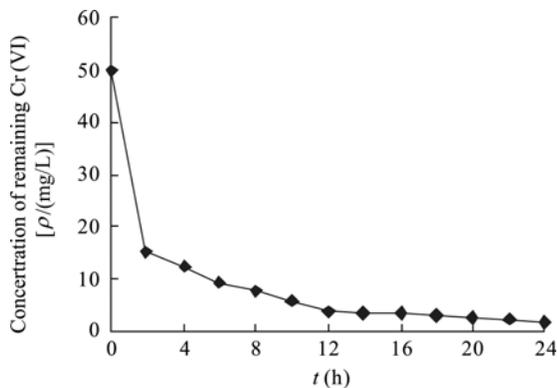


图 1 SRB 对铬 Cr(VI) 的还原

Fig. 1 Reduction of Cr(VI) by SRB

### 2.2 脱硫弧菌 SRB7 还原铬 Cr(VI) 条件的优化

**2.2.1 不同温度条件下 SRB7 对 Cr(VI) 的还原:** SRB7 最适生长温度是  $36^{\circ}C$ , 当温度高于  $45^{\circ}C$  后, OD 值迅速下降。在  $55^{\circ}C$  培养时, SRB7 无法正常生长<sup>[5]</sup>。在  $36^{\circ}C$  条件下测定 Cr(VI) 去除率最高为 96.64%。 $45^{\circ}C$  条件下的 Cr(VI) 去除率与  $36^{\circ}C$  接近, 为 93.92%。 $25^{\circ}C$  条件下的 Cr(VI) 去除率比  $36^{\circ}C$  和  $45^{\circ}C$  都低。在  $55^{\circ}C$  则几乎失去还原作用(表 1)。因此, 这 SRB7 还原 Cr(VI) 的适宜温度约为  $36^{\circ}C$ 。

**2.2.2 不同 pH 条件下 SRB7 对 Cr(VI) 的还原:** SRB7 具有较宽的 pH 生长范围。从表 2 中可以看出, 从 pH 5.0~8.5, SRB7 对 Cr(VI) 的去除率都比较高, 在 pH 7.5 时达到最高为 96.86%, 但在 pH 5.0 时仍能去除 85.96% 的 Cr(VI)。

表 1 不同温度下 Cr(VI) 的去除率  
Table 1 Removal rate of Cr(VI) under different temperature

温度( $^{\circ}C$ ) Temperature ( $^{\circ}C$ )	Cr(VI) 去除率(%) Removal rate of Cr(VI) (%)
25	89.32
36	96.64
45	93.92
55	7.64

表 2 不同 pH 条件下 Cr(VI) 的去除率  
Table 2 Removal rate of Cr(VI) under different pH

pH	Cr(VI) 去除率(%) Removal rate of Cr(VI) (%)
4.0	7.22
5.0	85.96
6.0	92.68
6.5	95.60
7.0	96.24
7.5	96.86
8.0	94.76
9.0	10.16

**2.2.3 不同碳源条件下 SRB7 对 Cr(VI) 的还原:** SRB7 的碳源利用范围很广, 不同碳源间利用速率的比较结果是: 乳酸钠 > 丙酸钠 > 乙醇 > 甲酸钠 > 乙酸钠<sup>[5]</sup>。在不同碳源条件下, SRB7 还原 Cr(VI) 的效率与利用 5 种碳源的速率一致。以乳酸钠作为碳源时, 最先产生  $H_2S$ , 还原 Cr(VI) 24 h 后, 去除率最高为 96.44%。相比之下, 以乙酸钠作为碳源时, Cr(VI) 的去除率最低(表 3)。因此, SRB7 还原 Cr(VI) 的适宜碳源是乳酸钠。

表 3 不同碳源条件下 Cr(VI) 的去除率  
Table 3 Removal rate of Cr(VI) under different carbon sources

碳源 Carbon source	Cr(VI) 去除率(%) Removal rate of Cr(VI) (%)
Sodium formate	91.00
Sodium acetate	89.32
Ethanol	93.08
Sodium propionate	94.56
Sodium lactate	96.44

**2.2.4 不同菌废比条件下 SRB7 对 Cr(VI) 的还原:** 在以 4 种不同的菌废比进行的 SRB7 还原 Cr(VI) 的研究中(图 2), 当菌废比为 1:10 时, Cr(VI) 的去除率只有 77.18%。而当菌废比为 1.5:10、1:5 和 1:4 时, Cr(VI) 的去除率都接近 100%。比较 4 种不同菌废比条件下单位体积菌液单位时间还原 Cr(VI) 的量可以发现, 当菌废比为 1:5 时, 其还原 Cr(VI) 的量最大为 0.00952 mg/(mL·h)。尽管当菌废比为 1:4 时, 其去除率最高, 达到了 99.38%, 但是其单位体积菌液单位时间还原 Cr(VI) 的量略低于菌废比 1:5 时。因此当 Cr(VI) 浓度为 50 mg/L 时, 适宜的菌废比是 1:5。

### 2.3 脱硫弧菌 SRB7 还原铬 Cr(VI) 特性的初步研究

**2.3.1 胞外聚合物(EPS)吸附途径的研究:** 胞外聚合物(EPS)在静止吸附 24 h 后, Cr(VI) 的浓度变化不

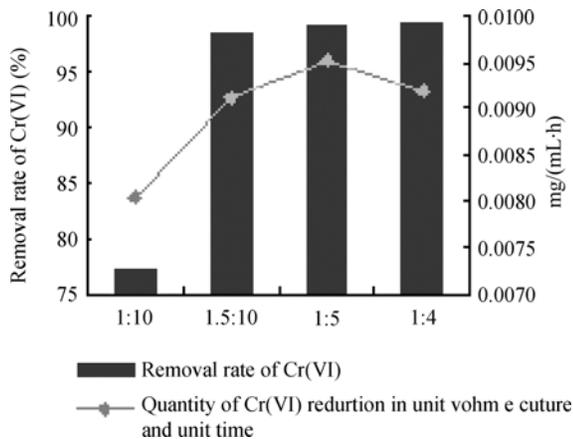


图 2 不同菌废比条件下 Cr(VI) 的去除率  
Fig. 2 Removal rate of Cr(VI) under different volume ratio of bacteria to wastewater

明显, 见表 4。这表明胞外聚合物(EPS)对于 Cr(VI) 的吸附效率近乎为零。

2.3.2 电子传递途径的研究: SRB7 电子传递途径 24 h 后的剩余 Cr(VI) 浓度是 27.95 mg/L, 去除率仅为 51.42%, 比 SRB7 在 4 h 时的剩余 Cr(VI) 浓度 (12.4 mg/L) 还高(图 3)。

表 4 胞外聚合物(EPS)对 Cr(VI) 的吸附情况  
Table 4 Adsorption condition of Cr(VI) by EPS

时间(h) Time (h)	剩余 Cr(VI) 浓度(mg/L) Remaining concentration of Cr(VI) (mg/L)
0	50
4	49.53
8	49.32
12	49.42
16	49.63
20	49.74
24	49.63

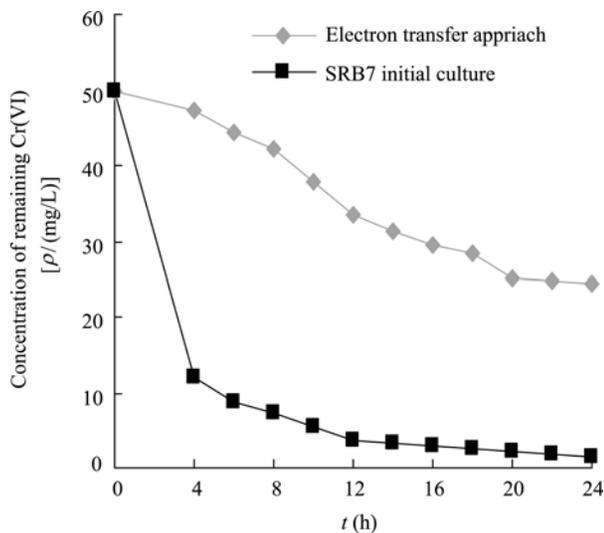


图 3 电子传递途径与 SRB7 原始菌液还原 Cr(VI) 的比较  
Fig. 3 Comparison of reduction Cr(VI) by electron transfer approach and SRB7 initial culture

2.3.3 H<sub>2</sub>S 途径的研究: SRB7 H<sub>2</sub>S 途径 24 h 后的剩余 Cr(VI) 浓度略高于 SRB7 在 24 h 时的剩余 Cr(VI) 浓度(图 4)。对比图 3 和图 4 就可以很清晰的发现, H<sub>2</sub>S 途径较电子传递途径是占优势的, 约占总还原量的 80%。

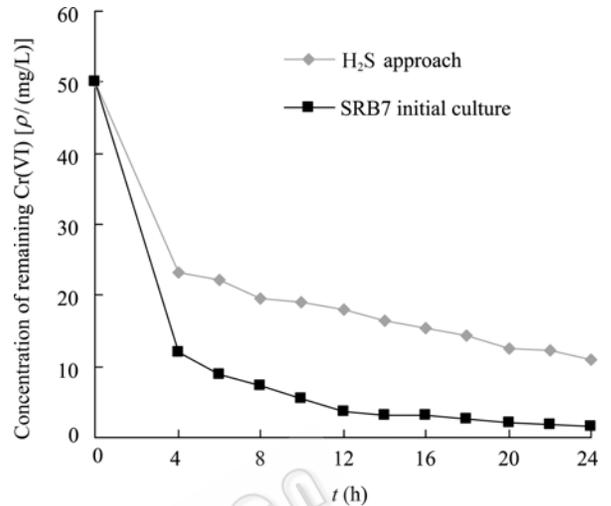


图 4 H<sub>2</sub>S 途径与 SRB7 原始菌液还原 Cr(VI) 的比较  
Fig. 4 Comparison of reduction Cr(VI) by H<sub>2</sub>S approach and SRB7 initial culture

### 3 讨论

#### 3.1 影响脱硫弧菌 SRB7 还原重金属铬 Cr(VI) 的环境因素

硫酸盐还原菌还原重金属铬 Cr(VI) 的效果, 在很大程度上取决于环境因素的影响。温度不仅会影响硫酸盐还原菌的自身生长状况, 也会影响其还原 Cr(VI) 的能力。本文研究的 SRB7 在 36°C 左右能较好还原 Cr(VI), 与它生长趋势一致, 说明硫酸盐还原菌生长速率将直接影响其还原 Cr(VI) 的效率。碳源同样对生长代谢和还原 Cr(VI) 有直接影响。当乳酸钠作为 SRB7 的碳源时, Cr(VI) 去除率最高, 这也应得益于在该碳源下较高的生长速率。适合的 pH 值是硫酸盐还原菌有效去除 Cr(VI) 的关键。有报道称, 多数硫酸盐还原菌当 pH 在中性时能较好的生长和还原去除重金属<sup>[8]</sup>。但是, 绝大多数工业废水都是偏酸性的, 使得硫酸盐还原菌的生长及应用就受到限制。SRB7 在 pH 7.5 时有最高的生长速率和 Cr(VI) 的去除率, 但在 pH 5.0 时, 不仅能够正常生长, 并且具有 85.96% 的还原 Cr(VI) 能力。这对于 SRB7 应用于工业废水处理上是一个优势。适宜的菌废比不仅可以最大限度的发挥硫酸盐还原菌还原 Cr(VI) 的作用, 还可以为大规模废水处理降低成本。

最适菌废比的判断标准目前还不统一<sup>[9]</sup>, 在本实验中, 同时考虑了 Cr(VI)的最终剩余浓度和单位体积菌液在单位时间还原 Cr(VI)的量两个指标。当菌废比是 1:5 时, 最终剩余浓度低, 且其单位体积菌液单位时间还原 Cr(VI)的量达到最大, 与其他研究<sup>[10]</sup>相比其菌废比较低, 有利于降低成本。本研究中的脱硫弧菌 SRB7 在适宜条件下培养 24 h 时对 Cr(VI)的还原达到 96.86%, 甚至更高, 与 Humphries 等<sup>[10]</sup>研究所得效果相当。

### 3.2 脱硫弧菌 SRB7 对于重金属 Cr(VI)可能的还原特性

国内外已报道的硫酸盐还原菌还原去除重金属的途径主要有以下 3 条: 1) SRB 利用  $S^{2-}$  完成对重金属的还原或直接沉淀; 2) 通过细胞内的电子传递途径还原高价态的重金属; 3) 利用表面的胞外聚合物(EPS)直接对重金属的吸附<sup>[7]</sup>。一些研究表明, 胞外聚合物(EPS)在吸附水溶液中的重金属中起重要作用<sup>[11-13]</sup>。但这些重金属通常都是指金属阳离子, 如  $Cu^{2+}$  和  $Zn^{2+}$ <sup>[6,14]</sup>, 而胞外聚合物(EPS)能否吸附阴离子基团中的重金属仍有待研究。在本研究中, 脱硫弧菌 SRB7 的胞外聚合物(EPS)对以阴离子基团  $Cr_2O_7^{2-}$  形式存在的 Cr(VI)几乎不起作用。在目前的研究中, 是否存在电子转移途径仍然有争论<sup>[15]</sup>。在瞿建国等<sup>[9]</sup>的研究报道中指出, 他们所利用的硫酸盐还原菌不具有通过电子传递途径还原 Cr(VI)的能力。但是本研究发现, SRB7 通过电子传递途径还原 Cr(VI)的机制是存在的, 只是这条途径在还原 Cr(VI)的过程中不占优势。利用  $H_2S$  去除重金属, 被认为是硫酸盐还原菌去除重金属的主要途径。本研究中  $H_2S$  途径还原 Cr(VI)的趋势与 SRB7 原始菌液还原 Cr(VI)的趋势基本一致, 在反应前 4 h 内, 剩余 Cr(VI)的浓度迅速下降而后速率变得平缓, 这样的反应速率类似化学反应特征, 推测是  $H_2S$  与 Cr(VI)直接反应的结果。

因此, 在 SRB7 还原 Cr(VI)的过程中, 反应前 4 h 内,  $H_2S$  途径占绝对的主导地位。4 h 后随着硫酸盐的减少以及营养物质的消耗, 单靠  $H_2S$  途径是不足以完成对剩余 Cr(VI)的还原, 这时电子传递途径就发挥更重要的作用。因此 SRB7 去除 Cr(VI)是  $H_2S$  途径和电子传递途径共同作用的结果, 在 36 h 后 Cr(VI)去除率高达 98.54%, 达到国家的排放标准。在反应的后期, SRB7 可能会利用吸附途径将已经还

原的 Cr(III)吸附, 但这对于剩余 Cr(VI)的浓度不会有影响。以上假设仍需进一步的实验数据来证实。

### 参 考 文 献

- [1] 刘俊良, 杨全利, 刘明德. 含铬废水处理技术综述. 河北科技图苑, 1997, 37(3): 13-15.
- [2] 徐英昭. 含铬废水的处理——焦亚硫酸钠法. 环境保护, 1993, 14(4): 14-16.
- [3] 王靖芳, 冯彦琳, 孙双红, 等. 乳状液膜法迁移及分离铬(VI)的研究. 环境化学, 1998, 17(1): 85-87.
- [4] 闵航, 陈美慈, 赵宇华, 等. 厌氧微生物学. 杭州: 浙江大学出版社, 1993, pp.218-222.
- [5] 陈涛, 曹毅, 伊芬芬, 等. 一株耐酸硫酸盐还原菌的分离筛选及生理特性研究. 四川大学学报(自然科学版), 2006, 43(2): 451-457.
- [6] 潘响亮, 王建龙, 张道勇. 硫酸盐还原菌混合菌群胞外聚合物对  $Cu^{2+}$  的吸附和机理. 水处理技术, 2005, 31(9): 25-28.
- [7] Payne RB, Gentry DM, Rapp-Giles BJ, et al. Uranium reduction by *Desulfovibrio desulfuricans* strain G20 and a cytochrome  $C_3$  mutant. *Appl Environ Microb*, 2002, 68(6): 3129-3132.
- [8] Reis MA, Almeida JS, Lemos PC, et al. Effect of hydrogen sulfide on growth of sulfate reducing bacteria. *Biotechnol Bioeng*, 1992, 40(5): 593-600.
- [9] 瞿建国, 申如香, 徐伯兴, 等. 硫酸盐还原菌还原 Cr(VI)的初步研究. 华东师范大学学报, 2005, 1: 105-110.
- [10] Humphries AC, Nott KP, Hall LD, et al. Reduction of Cr(VI) by immobilized cells of *Desulfovibrio vulgaris* NCIMB 8303 and *Microbacterium* sp. NCIMB 13776. *Biotechnol Bioeng*, 2005, 90(5): 589-596.
- [11] Fukushi K, Kato S, Auntsuki T, et al. Isolation of copper binding proteins from activated sludge Znlure. *Water Sci Technol*, 2001, 44: 453-459.
- [12] Beech IB, Cheung CWS. Interactions of exopolymers produced by sulphate reducing bacteria with metal ions. *Int Biodeter Biodegr*, 1995, 35: 59-72.
- [13] 张道勇, 赵勇胜, 潘响亮. 胞外聚合物(EPS)在藻菌生物膜去除污水中 Cd 的作用. 环境科学研究, 2004, 17(5): 52-56.
- [14] 潘响亮, 王建龙, 张道勇, 等. 硫酸盐还原菌混合菌群胞外聚合物对  $Zn^{2+}$  的吸附和机理. 环境科学研究, 2005, 18(6): 53-55.
- [15] Smith WL, Gadd GM. Reduction and precipitation of chromate by mixed culture sulphate-reducing bacterial biofilms. *J Appl Microbiol*, 2000, 88: 983-991.