

用硫酸盐还原菌去除废水中锑的实验研究

欧阳小雪^{1,2}, 张国平^{1,*}, 李海霞^{1,2}, 付志平^{1,2}, 陈京晶^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:用硫酸盐还原菌(SRB)去除模拟废水中的Sb,对比不同pH值、温度及Sb初始浓度的去除效果和不同反应时间内各因子(Sb、SO₄²⁻、pH、Eh及OD)的动态变化。结果表明:反应的最佳pH范围为6.0~7.0,温度范围为30~35℃,去除率均可达到90%以上。随着SRB的繁殖,溶液的pH值升高,SO₄²⁻被还原为H₂S,导致SO₄²⁻及Eh降低。Sb(V)被还原为Sb(III),Sb(III)再与H₂S反应生成Sb₂S₃沉淀,这一机制使得溶液中Sb被去除。

关键词:硫酸盐还原菌;废水;锑;去除

中图分类号:X703 文献标识码:A 文章编号:1672-9250(2014)05-0663-06

锑及其化合物用途广泛,主要用于陶瓷、电池、造纸、塑料、油漆、玻璃、合金及助燃剂,其中制作阻燃剂是锑的主要用途^[1]。中国是主要的锑储量和生产大国,锑储量占世界总储量(2×10⁶t)一半以上,世界锑年产量中很大部分来自中国,采矿和精炼产生的矿渣、废水大量排入环境中^[2]。锑是一种有毒有害的元素,对人体和生物具有积累毒性及致癌性^[3-5],美国环保局和欧盟先后将其确定为优先控制污染物^[1]。在矿山环境中,选矿、冶炼过程排出的废水中通常含锑很高,需要处理。

在重金属废水的处理中常用的方法有:沉淀、吸附、液膜法及电化学等方法^[3,6-8]。这些物理化学的方法能够很好地去掉废水中的重金属污染,但也有局限性,例如成本高、选择性低、耗能高,并可能产生二次污染等。近些年,生物方法逐渐被引入重金属废水处理领域,因其低成本、对重金属有高的去除率而越来越受到人们的关注^[9-12]。在生物方法中,硫酸还原菌(SRB)的研究很多。

硫酸盐还原菌(SRB)是自然界中广泛存在的一类原核微生物,其可以利用有机碳异化还原硫酸根离子生成硫化氢,硫化氢与水中溶解态的金属离子反应产生不溶于水的硫化物沉淀,从而去除污水中的重金属污染。其反应机制描述如下^[13]:

1. 在厌氧条件下,有机碳(用CH₂O表示)被氧化产生ATP,同时释放出高能电子,并通过SRB特有的电子传递链(如黄素蛋白、细胞色素C等),将产生的高能电子传递给氧化态的硫元素(用SO₄²⁻表示),并将其还原为H₂S。在整个过程中有机碳不仅是SRB的碳源和电子供体,也是能源,硫酸盐仅作为最终电子受体起作用,即SRB利用SO₄²⁻作为最终电子受体将其还原为硫化物。

2. 生成的H₂S与溶液中的重金属离子(用Me²⁺表示)结合,形成不溶于水的沉淀。



已有许多研究运用SRB处理废水中的重金属,并取得了显著的效果。Jong等(2003)^[14]用上流式厌氧反应器中SRB混合菌群处理废水中SO₄²⁻和重金属离子,发现Cu、Zn、Ni的去除率达到97.5%以上,对砷和铁的去除率也分别达到了77.5%和82%以上。苏冰琴和李亚新^[15]采用厌氧膨胀颗粒污泥床反应器研究SRB对含硫酸盐和重金属废水处理效果时,Fe²⁺、Mn²⁺、Ni²⁺、Zn²⁺、Cu²⁺的最大去除率分别达到了95.3%、93.1%、98.2%、89.9%、95.6%。Bai等^[16]研究了上流式厌氧反应器中SRB和Fe⁰复合作用对于酸性矿山废水中重金属离子的去除效果,发现硫酸盐去除率达到61%以上,

收稿日期:2014-01-20;改回日期:2014-04-01

基金项目:本研究受中国科学院一·三·五项目资助和国家自然科学基金项目(41273150)。

第一作者简介:欧阳小雪(1988-),女,硕士研究生,主要从事环境地球化学研究。E-mail:ouyangxiaoxue11@163.com。

*通讯作者:张国平(1966-),男,研究员,主要从事矿山环境中锑的地球化学过程及影响的研究。E-mail:zhangguoping@vip.gyig.ac.cn。

Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 的去除率也分别达到了 99% 和 86% 以上。但是运用 SRB 处理含 Sb 废水的研究很少。Wang 等(2013)^[17] 研究了 SRB 在不同 pH 时处理含 Sb 废水的效果并对其产物进行了分析。他们的研究中 Sb 的初始浓度高达 25 mg/L, 而典型矿山水中 Sb 含量为几个 mg/L^[2]。

本研究主要采用 SRB 对废水中 Sb 进行去除实验, 研究不同 pH、温度及初始 Sb 浓度对 Sb 去除的影响和不同实验时间内各因子(Sb、 SO_4^{2-} 、pH、Eh 及光密度 OD)的动态变化情况, 以期得到最佳去除条件, 为含 Sb 废水的治理提供依据。

1 材料和方法

1.1 实验仪器

SPX-70BIII 生化培养箱(上海泰斯特仪器有限公司)、756MC 紫外可见光光度计(上海菁华科技仪器有限公司)、LDZX-50KBS 立式压力蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂)、855-ACB 厌氧箱(Plas-Labs)、双道原子荧光光谱仪(AFS)(北京海光仪器公司)、pHS-3C 型数显酸度计(上海雷磁仪器厂)、ORP 氧化还原电位计(日本 TOA-DKK)。

1.2 试剂及药品

1.2.1 培养基

液体培养基选择改良后的 PostgateC^[18] 培养基: K_2HPO_4 0.5 g/L; NH_4Cl 1.0 g/L; $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.0 g/L; Na_2SO_4 1.0 g/L; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L; 乳酸钠 1.0 g/L; 酵母膏 1.0 g/L; 抗坏血酸 0.1 g/L, pH 为 7.0, (固体培养基是在液体的基础上加入 3% 琼脂), 在 0.1 MPa, 121 °C 灭菌 30 min。

1.2.2 其他试剂和药品

$\text{H}_6\text{KO}_6\text{Sb}$ (99.0%, Fluka 公司), N_2 为 99.99% 纯氮。 Na_2SO_4 (110 °C 烘 4 h)、NaCl、乙醇、甘油、氯化钡晶粒 ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、硫脲, 实验中所有试剂均为分析纯。

1.2.3 模拟废水的配制

先用 $\text{H}_6\text{KO}_6\text{Sb}$ 固体配成含锑 500 mg/L 的储存液, 溶液中锑以五价的 SbO_3^- 存在。实验时用 500 mg/L 的储存溶液配成所需 Sb 浓度的模拟废水。用 1 mol/L HCl 和 NaOH 调节溶液 pH 值。

1.3 菌种富集及分离纯化

1.3.1 菌体富集

在位于贵阳市西南 10 km 阿哈湖上游, 取煤矿

下游溪流的底泥约 2 g, 立即放入 100 mL 液体培养基厌氧瓶内, 带回实验室将厌氧瓶置于厌氧箱中, 在 30 °C 条件下静置培养, 直到培养液变成墨黑色 (FeS 的颜色) 后接种培养, 转接 7 次, 每次接种量 10%, 对菌种进行富集。

1.3.2 菌种分离纯化

菌种分离及纯化采用先 Hungate^[19] 滚管后平板涂布的方法。

(1) Hungate 滚管: 在厌氧箱内先将富集培养的菌液用培养液按适当比例 ($1:10^2 \sim 10^6$) 稀释后吸取 0.5 mL 菌液于装有 4.5 mL 灭完菌还未冷却固体培养基的厌氧管中, 立即在桌面匀速滚动, 使培养基均匀固定在厌氧管壁上, 凝固后用无菌针头吸出多余液体, 放于培养箱 30 °C 培养, 一周后长出黑色菌落, 从中挑取浓黑色的单菌落, 接种于 100 mL 液体培养基中, 并检查液体培养基是否变黑, 将变黑的菌液继续滚管, 挑取单菌落, 如此滚管 5 次后, 得到相对纯化的菌液。

(2) 滚管方法易于厌氧操作, 但是不利于菌落的观察与分离, 因此为了充分分离纯化 SRB 还需进行平板涂布。将滚管得到的菌液在厌氧箱内按适当比例 ($1:10^2 \sim 10^6$) 稀释后, 平板划线, 用胶带封口后置于厌氧箱中 30 °C 下培养, 7 d 后长出黑色菌落, 挑取长势良好、浓黑色的单菌落, 接种于 100 mL 液体培养基中, 将变黑的菌液继续平板划线, 挑取单菌落, 作进一步的纯化。交替纯化直至平板菌落形态一致。将得到的纯菌制成固体斜面置于 4 °C 中冰箱保存备用。

1.4 实验及分析方法

1.4.1 实验方法

从固体斜面挑取细菌于培养液中培养至对数期, 然后按 10% 转接到液体培养基内, 培养 12 h 后用注射器加入过滤灭菌的 Sb 溶液, 控制液体培养基与 Sb 溶液的比例, 使混合液的 Sb 浓度为设定的初始浓度, 置于培养箱内静置培养, 并定期取 3 mL 菌液, 用原子荧光光谱测定 Sb 的浓度, 同时做平行实验 ($n=4$) 及不加细菌的对照实验。分别以 pH、温度、Sb 初始浓度进行单因子条件实验。

(1) pH 对 Sb 去除的影响: 控制 Sb 初始浓度为 50 mg/L, 接种量为 10%, 初始 pH 设置为 5.0、6.0、7.0、8.0、9.0, 用 1 mol/L 的 HCl 及 NaOH 调节。温度 30 °C, 培养时间为 7 d。测定溶液中的初始、残余 Sb 浓度及溶液 pH, 并计算 Sb 的去除率: (初始

$\text{Sb 浓度} - \text{残余 Sb 浓度} / \text{初始 Sb 浓度} \times 100\%$ 。

(2)温度对 Sb 去除的影响:控制 Sb 初始浓度为 50 mg/L,接种量为 10%、pH 为 7.0,温度设置为 20、25、30、35、40 °C。培养 7 d 后测定溶液中的初始和残余 Sb 浓度。

(3)Sb 初始浓度对 Sb 去除的影响:控制接种量为 10%、pH 为 7.0、温度 30 °C, Sb 初始浓度设置为 1、2.5、5、10、25、50 mg/L,培养 7 d 后测定溶液中的初始和残余 Sb 浓度。

(4)Sb 去除随时间的变化:菌液厌氧培养 12 h 后,细菌大量繁殖,溶液的 SO_4^{2-} 浓度随之降低至 1200 mg/L,培养液中的 pH 为 6.5、氧化还原电位 ORP 为 21 mV,向菌液中加入 Sb 溶液至初始浓度为 5 mg/L(这一浓度与矿山水的 Sb 浓度为同一水平),30 °C 连续培养 7 d,按时取样测定 Sb、 SO_4^{2-} 、pH、Eh 及 OD 等因子的变化情况。

1.4.2 测定项目及方法

Sb 浓度测定:样品中的 Sb 含量采用氢化物发生原子荧光光谱法(AFS)测定,将反应溶液用 0.22 μm 滤膜过滤,取一定体积的滤液于 25 mL 容量瓶中,加入 5% 抗坏血酸和 5% 硫脲混合液 5 mL,将 Sb 从五价还原为三价,再加入 1.25 mL 浓盐酸,定容至刻度,用 AFS 测定 Sb 含量(文中所有 Sb 含量均为总 Sb)。

SO_4^{2-} 浓度测定:硫酸根的测定采用硫酸钡比浊法测定(GB7871-87)。

OD 值:采用紫外分光光度计于 600 nm 波长测定 OD 值;

pH 值:采用 pHS-3C 型数显酸度计测定;

Eh 值:采用日本 TOA-DKK 的 ORP 仪测定。

2 结果与讨论

2.1 pH 对 Sb 去除的影响

pH 是影响 SRB 生长及去除重金属的重要影响因素。微生物生命活动和物质代谢与 pH 值密切相关,不同微生物对 pH 值有不同要求,过高或过低 pH 值对微生物生长和重金属去除都不利^[15, 20-22]。由图 1 可知,当 pH 为 5.0~8.0 之间时,Sb 去除率都较高(87.0%~90.9%)。尤其是 pH 为 6.0 和 7.0 时达到 90.5% 和 90.9%。而在 pH 为 9.0 时,Sb 去除率明显降低为 68.6%。由结果可知:用 SRB 去除 Sb 的最佳处理 pH 值为 6.0~7.0。赵宇华等(1997)^[23]认为 SRB 在 pH 为 6.5~7.5 时,生

长良好,最佳的 pH 为 7.5,SRB 不能在 pH 小于 5.0,大于 8.0 的环境中生存。而 Reis 等(1992)^[24]认为 SRB 在 $\text{pH} < 6$ 的条件下一般不生长,在 pH 值 6.48~7.43 之间时硫酸盐还原效果最好,在 6.7 时得到最大的硫酸盐还原率。李亚新和苏冰琴(2000)^[15]认为液中 pH 值较低时,会抑制 SRB 对重金属的去除,当 pH 值升高时,金属硫化物沉淀增多,金属离子的去除率得以提高。本研究与这些研究结果基本相同。另外实验中溶液的 pH 值均有所变化,无论初始溶液是偏酸性还是偏碱性,培养 7 d 后 pH 值均在 7.1~7.5 左右。

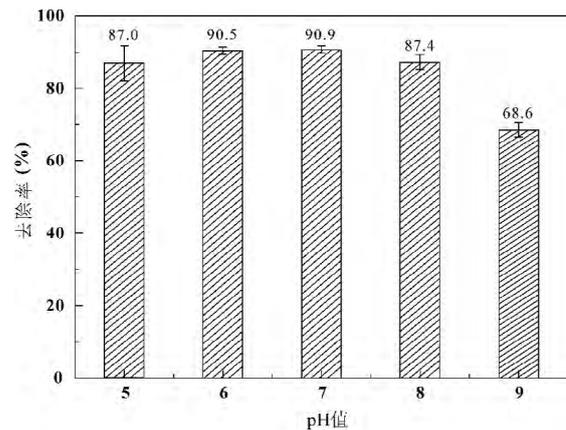


图 1 pH 值对锑去除的影响

Fig. 1 Effect of pH on the removal of antimony

2.2 温度对 Sb 去除的影响

微生物的生长与温度密切相关,因而温度是影响微生物去除重金属的重要因素。由图 2 可知,当温度为 20 °C 时,Sb 去除率为 74.4%,随着温度的升高 Sb 去除率也逐步提高;当温度为 30 °C、35 °C 时,Sb 去除率最高分别达到 94.0%、94.6%;当温度为 40 °C 时,Sb 去除率降为 10.2%,说明在此温度下 SRB 的生物活性受到了抑制,影响了 Sb 的去除效果。本研究的结果与其他研究结果相符合^[23, 25]。

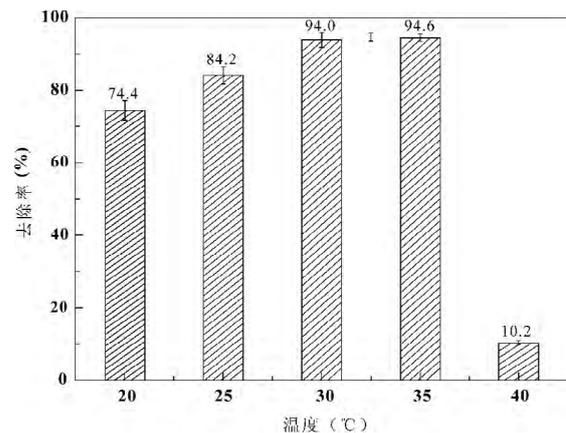


图2 温度对锑去除的影响

Fig.2 Effect of temperature on the removal of antimony

2.3 Sb 初始浓度对 Sb 去除的影响

重金属可能会影响微生物的活性,进而对重金属去除过程造成影响。因而有必要研究不同 Sb 浓度下 SRB 对 Sb 的去除效果。由图 3 可知,当初始 Sb 浓度为 1 mg/L 时,Sb 去除率最低,为 9.9%;当初始 Sb 浓度为 2.5~50 mg/L 时,Sb 去除率均达到 66%以上。尤其是当 Sb 浓度为 50 mg/L 时,Sb 的去除率可达到 90%以上。由此可以推测 Sb 浓度为 50 mg/L,并未造成对 SRB 活性的抑制。至于初始 Sb 浓度最低时 Sb 去除率也最低,可能原因是 SRB 繁殖至一定程度时 Sb 的残余浓度基本保持稳定,故而导

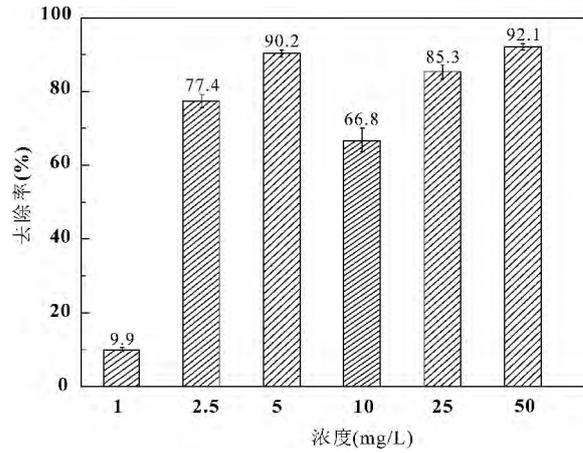


图3 锑初始浓度对锑去除的影响

Fig.3 Effect of the initial concentration on the removal of Sb

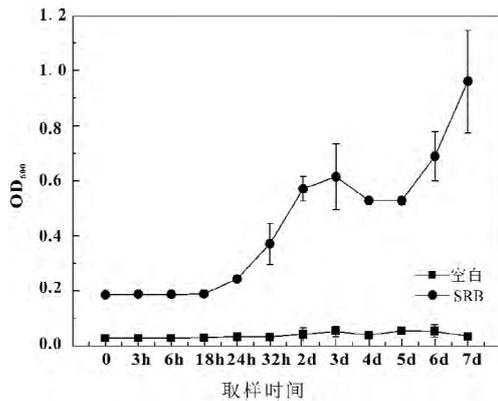
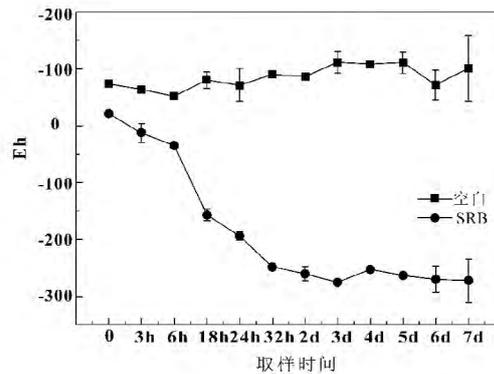
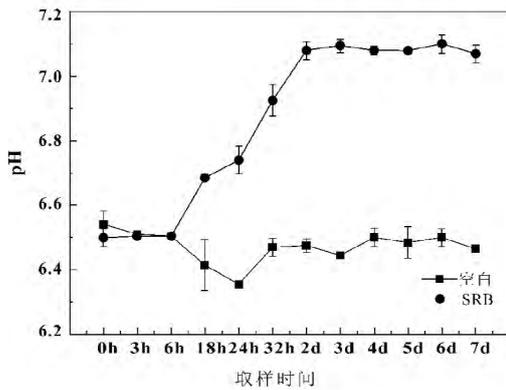
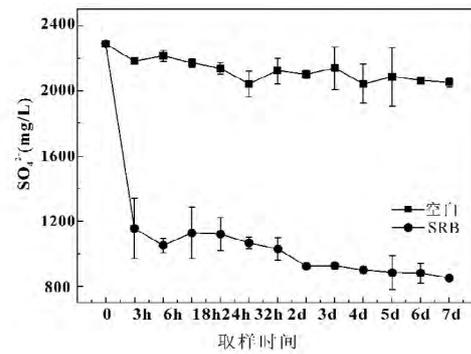
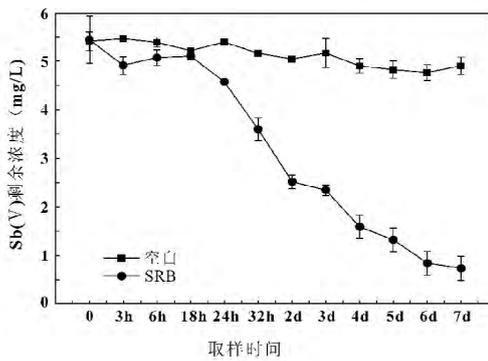


图4 处理过程中物理化学参数随时间的变化

Fig.4 Variations in Sb and SO4^2- concentrations with pH, Eh and OD values in the treatment process

2.4 Sb去除随时间的变化

图4(A, B, C, D, E)是SRB处理含Sb废水7 d内溶液中各参数变化情况。从图中可以看出,较不加菌空白,24~32 h时SRB开始大量繁殖(图4E),溶液中的有机碳作为碳源被消耗, SO_4^{2-} 被还原为 H_2S ,于是 SO_4^{2-} 降低(如图4B),pH值升高(图4C), H_2S 的大量产生及细菌的增多导致了Eh的降低(图4D),同时菌株SRB使培养基中的Sb与生成的 H_2S 反应,生成 Sb_2S_3 沉淀(实验产物可见为红色),从而使溶液中Sb的浓度降低(如图4A)。由于溶液中的Sb最初是五价(SbO_3^-),而形成沉淀时是三价的 Sb_2S_3 ,因而根据实验现象推测溶液中Sb的去除经历了以下过程:

(1)溶液中的Sb(V)(即 SbO_3^-)被还原为Sb(III)(即 SbO_3^-)。

(2)Sb(III)(即 SbO_3^-)与生成的 H_2S (含 $\text{HS}^- + \text{S}^{2-}$)反应,生成红色的 Sb_2S_3 沉淀。

4 d后细菌进入衰退期,活菌的数量减少,OD值降低(后两天OD升高,推测是溶液体积减少及沉

淀大量产生使OD值升高),此时溶液pH、Eh基本维持稳定, SO_4^{2-} 仍被还原为 H_2S ,于是 SO_4^{2-} 浓度仍有些许下降,溶液中的Sb继续与 H_2S 反应生成 Sb_2S_3 沉淀,此外在SRB生长后期菌体直接将Sb吸附在胞外聚合物上,与菌体一同沉降,进而使溶液中的Sb得以去除,并于7 d后达到86.7%的去除率。

3 结论

实验表明,利用硫酸盐还原菌去除水中的Sb是可行有效的,处理的最佳pH范围为6.0~7.0,最佳温度范围为30~35℃,在这一条件下对废水中Sb的去除可以达到90%以上。

溶液中Sb去除的基本过程可以描述为:随着SRB繁殖,溶液中有机碳被消耗,溶液pH值升高向弱碱性变化, SO_4^{2-} 被还原为 H_2S ,于是 SO_4^{2-} 降低, H_2S 的大量产生及细菌的增多导致了Eh的降低,溶液中的Sb(V)先被还原为Sb(III),Sb(III)再与生成的 H_2S 反应生成 Sb_2S_3 沉淀,使得溶液中的Sb被去除。

参 考 文 献

- [1] Filella M, Belzile N, Chen Y W. Antimony in the environment: A review focused on natural waters: I. Occurrence [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 57:125-176.
- [2] He M C, Wang X Q, Wu F C, *et al.* Antimony pollution in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 421-422:41-50.
- [3] Guo X J, Wu Z J, He M C. Removal of antimony(V) and antimony(III) from drinking water by coagulation-flocculation-sedimentation (CFS) [J]. *Water Research*, 2009, 43(17): 4327-4335.
- [4] 何孟常, 万红艳. 环境中锑的分布、存在形态及毒性和生物有效性 [J]. *化学进展*, 2004, 16(1): 131-135.
- [5] Hammel W, Debus R, Steubing L. Mobility of antimony in soil and its availability to plants [J]. *Chemosphere*, 2000, 41(11): 1791-1798.
- [6] Zhang D Y, Pan X L, Zhao L, *et al.* Biosorption of antimony (Sb) by the cyanobacterium *Synechocystis* sp [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2011, 20(5): 1353-1358.
- [7] Kang M, Kamei T, Magara Y. Comparing polyaluminum chloride and ferric chloride for antimony removal [J]. *Water Research*, 2003, 37(17): 4171-4179.
- [8] Li X H, Dou X M, Li J Q. Antimony(V) removal from water by iron-zirconium bimetal oxide: Performance and mechanism [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(7): 1197-1203.
- [9] Achal V, Pan X L, Zhang D Y. Remediation of copper-contaminated soil by *Kocuria flava* CR1, based on microbially induced calcite precipitation [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1601-1605.
- [10] Wang J L. Biosorption of copper(II) by chemically modified biomass of *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37(8): 847-850.
- [11] Sheng P X, Wee K H, Ting Y P, *et al.* Biosorption of copper by immobilized marine algal biomass [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 136(2-3): 156-163.
- [12] Ho Y S, Chiang T H, Hsueh Y M. Removal of basic dye from aqueous solution using tree fern as a biosorbent [J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(1): 119-124.
- [13] Castillo J, Pérez-López R, Caraballo M A, *et al.* Biologically-induced precipitation of sphalerite-wurtzite nanoparticles

- by sulfate-reducing bacteria: Implications for acid mine drainage treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 423:176–184.
- [14] Jong T, Parry D L. Removal of sulfate and heavy metals by sulfate reducing bacteria in short-term bench scale upflow anaerobic packed bed reactor runs [J]. *Water Research*, 2003, 37(14): 3379–3389.
- [15] 苏冰琴, 李亚新. EGSB反应器中硫酸盐还原与重金属去除 [J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(2): 246–249.
- [16] Bai H, Kang Y, Quan H G, *et al.* Treatment of acid mine drainage by sulfate reducing bacteria with iron in bench scale runs [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 128: 818–822.
- [17] Wang H W, Chen F L, Mu S Y, *et al.* Removal of antimony (Sb(V)) from Sb mine drainage: Biological sulfate reduction and sulfide oxidation-precipitation [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 146: 799–802.
- [18] Hernández Gayosso M, Zavala Olivares G, Ruiz Ordaz N, *et al.* Microbial consortium influence upon steel corrosion rate, using polarisation resistance and electrochemical noise techniques [J]. *Electrochimica acta*, 2004, 49(25): 4295–4301.
- [19] 朱旭芬. 现代微生物学实验技术 [M]. 浙江大学出版社, 2011.
- [20] 马保国, 胡振琪, 张明亮, 等. 高效硫酸盐还原菌的分离鉴定及其特性研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 608–611.
- [21] 甄卫东, 任南琪, 王爱杰, 等. 一株硫酸盐还原菌的分离及生理生态特性的研究 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(增): 527–532.
- [22] 刘艳. 一株硫酸盐还原菌 DSRBa 的分离鉴定及特性分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(1): 176–182.
- [23] 赵宇华, 叶央芳, 刘学东. 硫酸盐还原菌及其影响因子 [J]. *环境污染与防治*, 1997, 19(5): 41–43.
- [24] Reis M A M, Almeida J S, Lemos P C, *et al.* Effect of hydrogen sulfide on growth of sulfate reducing bacteria [J]. *Biotechnology and bioengineering*, 1992, 40(5): 593–600.
- [25] 李亚新, 苏冰琴. 利用硫酸盐还原菌处理酸性矿山废水研究 [J]. *中国给水排水*, 2000, 16(2): 13–17.

Removal of Antimony in Synthetic Wastewater by Sulfate-reducing Bacteria

OUYANG Xiao-xue^{1,2}, ZHANG Guo-ping^{1,*}, LI Hai-xia^{1,2},
FU Zhi-ping^{1,2}, CHEN Jing-jing^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The removal of Sb in wastewater by sulfate-reducing bacteria was conducted. The effects of pH, temperature and the initial Sb concentration as well as the evolution of the reaction were evaluated. The results showed that the optimal pH range was 6.0~7.0 and the optimal temperature was 30~35 °C. The removal of Sb was more than 90%. In the reaction, organic carbon was converted to HCO₃⁻ and SO₄²⁻ was reduced to H₂S, resulting in the decrease of SO₄²⁻ and Eh. In the meantime, Sb(V) was reduced to Sb(III), which reacted with H₂S and was precipitated as Sb₂S₃. This mechanism resulted in the removal of Sb in wastewater.

Key words: sulfate-reducing bacterium; wastewater; Sb; removal