

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.05.013

硫酸盐还原菌处理低浓度含镉废水的试验研究

倪尚源, 刘岳林, 王映林

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 从污水厂污泥中培养驯化出以硫酸盐还原菌 (SRB) 为优势菌种的混合菌液, 以 Cd^{2+} 去除率为考察指标, 在适宜的厌氧生长环境下 (pH 值为 7.5, 温度为 35 °C) 研究其对低浓度含镉废水的处理效果。结果表明, 以 SRB 为优势菌种的混合菌液的去除效果随 Cd^{2+} 浓度的增大而降低。当 Cd^{2+} 初始质量浓度小于 40 mg/L 时, 菌液对 Cd^{2+} 的去除率接近 100%, 此时的处理效果稳定; 当 Cd^{2+} 的初始质量浓度达到 60 mg/L 时, Cd^{2+} 对菌株产生毒害作用从而使其失去处理能力。研究表明, SRB 可以有效地去除废水中的低浓度镉离子。

关键词: 硫酸盐还原菌; 镉离子; 筛选与纯化; 抑制; 去除率

中图分类号: X172, X53

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2020)05-0090-07

引文格式: 倪尚源, 刘岳林, 王映林. 硫酸盐还原菌处理低浓度含镉废水的试验研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(5): 90-96.

Treatment of Low Concentration Cadmium Wastewater by Sulfate Reducing Bacteria

NI Shangyuan, LIU Yuelin, WANG Yinglin

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: By using the removal rate of Cd^{2+} as the index, a research has been carried out of a mixture of sulfate-reducing bacteria (SRB), cultured and domesticated from sewage sludge, on the removal effect of low concentration cadmium-containing waste water under anaerobic growth environment (pH=7.5, temperature 35 °C). The results show that the removal efficiency of SRB as the dominant strain decreases with the increase of Cd^{2+} concentration. With the initial mass concentration of Cd^{2+} less than 40 mg/L, the removal rate of Cd^{2+} approximates 100%, a stable treatment effect so far achieved. When the initial mass concentration of Cd^{2+} reaches 60 mg/L, Cd^{2+} exerts a toxic effect on the strain, with SRB losing its processing power. The results show that SRB can effectively remove low concentration cadmium ions in wastewater.

Keywords: sulfate reducing bacteria; cadmium ion; isolation and purification; inhibition; removal rate

1 研究背景

近年来, 随着工农业的快速发展、城市圈的扩大

和矿产资源的开发, 我国流域重金属污染日趋严重。以湖南省湘江流域为例, 根据相关资料^[1]的统计, 大多数有色金属和稀有金属矿藏的开采和冶炼主要

收稿日期: 2019-12-20

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助项目 (13C053)

作者简介: 倪尚源 (1997-), 男, 安徽池州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为水处理技术,

E-mail: iamnishangyuan@163.com

通信作者: 王映林 (1967-), 女, 湖南益阳人, 湖南工业大学副教授, 主要从事水质分析, 水资源保护与利用, 废水分析处理方面的教学与研究, E-mail: 1131525644@qq.com

分布在湘江流域两岸, 导致了土壤中重金属污染的加剧, 又由于金属元素大多具有较强的迁移性, 使得流域被污染后, 金属元素在水流中以离子的形式流经被污染土壤后迁移到自然水体中。危害较大的为有色金属, 主要包括汞、铅、镉、铜、铬等重金属离子^[2]。李倩^[3]采用 Hakanson 指数法对湘江流域某研究区域土壤重金属潜在生态风险进行了评价。其中一项结果表明, 镉在该地土壤中的富集程度最大, 且具有严重的潜在生态风险, 应引起高度重视。

镉(Cd)是存在于自然界中的一种金属元素, 常见的镉化合物有氧化镉、氯化镉和硒化镉等。镉在水体中的存在形态除了简单离子, 还可以与氨、氰化物、氯化物、硫酸根形成配合离子的形态存在^[4]。在天然水域 pH 值范围内, 水体中的镉离子容易发生水解而生成羟基配合物和氢氧化物沉淀^[5]。镉的迁移能力强, 容易通过吸入灰尘和植物富集进入食物链, 对人体造成较大危害。重金属镉进入人体后会损伤神经系统、免疫系统、生殖系统, 引发肿瘤等^[6]。

含镉废水属于重金属废水, 针对该类废水传统常规处理方法主要有电解法、离子交换法、不溶性络合物法、沉淀法、反渗透法、气浮法、吸附法等^[7]。一般的化学沉淀法只能对高浓度污水具有较高的去除效率, 并且处理后的污水容易造成二次污染。离子交换法处理含镉废水的净化程度高, 可以回收镉, 无二次污染, 但成本较高, 并且一次性交换容量有限。膜分离法、电化学法等方法虽然能有效处理低浓度重金属废水, 但由于运行成本较高等问题导致无法被大规模应用于工程实践中。相较于传统常规处理方法, 微生物修复技术具有成本低、操作便利、环境友好等优点^[8-11]。在众多可修复重金属污染的微生物中, 硫酸盐还原菌(sulfate-reducing bacteria, SRB)是兼性厌氧的异养型微生物, 其种类繁多且不同种类的代谢类型不同^[12], 其主要处理含镉废水的途径是通过 SRB 在无氧呼吸过程中, 将 SO_4^{2-} 作为最终电子受体进行异化还原^[13], 从而将 SO_4^{2-} 还原成为 H_2S 。 H_2S 会与废水中的重金属离子反应生成金属硫化物沉淀, 从而达到将溶解性的金属离子从水中分离出来的目的。由于多数重金属硫化物的溶解度很小, 所以该方法可以适用于多种低浓度重金属废水的处理。

本研究从株洲市某污水厂的污泥中培养驯化出以 SRB 为优势菌种的混合菌液, 以 Cd^{2+} 去除率为考察指标, 考察了镉离子初始浓度对 SRB 去除含镉废水的影响, 为 SRB 处理含镉废水的进一步深入研究提供一定的基础。

2 材料与方法

2.1 试验材料

2.1.1 菌种

取自湖南省株洲市某污水处理厂污泥池底层污泥, 呈灰黑色, 颗粒粒径均匀。

2.1.2 主要仪器与试剂

高速台式离心机、电子天平、岛津 Shimadzu 原子吸收发射光谱仪、UV-1800 型紫外分光光度计, 均为市购; K_2HPO_4 和 NaCl 等化学试剂均为市购, 国产分析纯; 镉离子标准溶液参照国标配制, 所用试剂为 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$, 国产分析纯。

2.1.3 培养基

基础培养基: NaCl 10.0 g、酵母粉 5.0 g、胰蛋白胨 10.0 g、水 1 000 mL。富集或分离培养基: K_2HPO_4 , 0.01 g/L; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.2 g/L; 维生素 C, 0.1 g/L; 酵母浸膏, 1.0 mL/L; 乳酸钠, 4 mL/L, pH 值为 7.5; NaCl , 10.0 g/L; $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 10.0 g/L。

用 0.1 mg/L NaOH 溶液和 0.1 mg/L HCl 溶液将液体培养基的 pH 值调节至 7.5 左右, 之后将培养基放入高压蒸汽灭菌锅, 在 121 °C 条件下使用高压蒸汽灭菌 20 min。由于 Fe^{2+} 在高温条件下容易被氧化, 所以针对 $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 采用紫外线灭菌, 灭菌后放置备用, 等液体培养基降至室温后再加入。

2.2 试验方法

2.2.1 菌株的筛选分离与纯化

将取样的污泥分装在锥形瓶中, 按每升加入 5 g 无水硫酸钠, 在 35 °C 下振荡培养驯化 1 周。然后将其接入液体富集培养基进行厌氧培养, 大约 2~3 d 后, 锥形瓶中氧气耗尽, 形成厌氧环境, 培养基颜色变黑 (FeS 所致)。打开锥形瓶封口膜, 可闻到浓烈的臭鸡蛋气味 (H_2S), 将打湿的醋酸铅试纸置于瓶口位置进行检测, 变黑, 说明培养基中含有 SRB。每周将 10 mL 菌液接种至新鲜培养基, 连续培养 4 周后获得以 SRB 为优势菌种的混合菌液。即可采用稀释涂布-夹层培养法进行厌氧分离培养^[14]。

2.2.2 菌株对镉离子的耐受性试验

参考 D. Teclu 等的试验方法^[15], 将富集后的 SRB 混合菌液在厌氧条件下培养 50 h。然后, 在无氧条件下, 取 50 mL 菌液, 在转速为 5 000 r/min 下离心 8 min。舍去上清液, 用 2.5 g/L 的 NaHCO_3 溶液对离心管底部的菌体沉积物进行稀释, 控制 OD (optical density, OD) 值在 0.1 左右, 各接种 10 mL 于 5 个 250 mL 液体培养基中。密闭封口, 并用体积分数为

99.99%的 N_2 吹托这4个锥形瓶10 min,放入恒温培养箱中于35℃下培养12 h后(此时无 H_2S 生成),用移液管加入用 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ 配置好的 Cd^{2+} 溶液,使培养基内 Cd^{2+} 的质量浓度分别为10, 20, 40, 60, 80 mg/L,并且于7 d取样后置于离心机中于3 000 r/min下离心10 min。取上清液用微孔滤膜(孔径为0.22 μm)过滤,经酸化-消化处理后稀释不同倍数,用原子吸收分光光度计测定剩余 Cd^{2+} 的质量浓度。

2.2.3 菌株处理镉离子的去除效果试验

取厌氧培养50 h处于对数生长期的SRB混合菌液,在无菌条件下取50 mL菌液在转速为5 000 r/min下离心8 min。舍去上清液,再用浓度为2.5 g/L的 $NaHCO_3$ 溶液对离心管底部的菌体沉积物进行稀释,控制OD值在0.1左右,在1个250 mL液体培养基中接种10 mL,密闭封口,放入恒温培养箱中于35℃下培养12 h后,加入初始质量浓度为20 mg/L Cd^{2+} 溶液。同上述方法取样并测定剩余 Cd^{2+} 的浓度。按下式计算菌体对 Cd^{2+} 的去除率:

$$\text{去除率}(\%) = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100\%$$

式中 C_0 和 C_f 分别为镉离子的起始质量浓度和最终质量浓度(mg/L)。

3 结果与分析

3.1 菌液对 Cd^{2+} 耐受性试验

根据2.2.2节的试验步骤,打开瓶口密封膜对瓶内气味进行鉴别,考察7 d后耐受试验中各浓度梯度下锥形瓶内培养基表观变化情况,以此判断该试验条件下SRB对 Cd^{2+} 的耐受性,结果如表1所示。

表1 不同质量浓度梯度下的培养基变化

Table 1 Changes of culture medium under different mass concentration gradients

初始质量浓度/(mg·L ⁻¹)	表观	气味
10	有黑色沉淀物	有臭鸡蛋气味
20	有黑色沉淀物	有臭鸡蛋气味
40	有黑色沉淀物	有臭鸡蛋气味
60	无变化	无臭鸡蛋气味
80	无变化	无臭鸡蛋气味

从表1的结果可知,在培养基中 Cd^{2+} 的质量浓度低于40 mg/L时,7 d后锥形瓶内的培养基会变黑,打开瓶口密封膜会散发出浓烈的臭鸡蛋气味。当培养基中 Cd^{2+} 的质量浓度达到60 mg/L以上时,7 d后锥形瓶内的培养基无颜色变化,打开瓶口密封膜瓶内无明显臭鸡蛋气味。该结果初步说明当培养基中 Cd^{2+}

的质量浓度低于40 mg/L时,对SRB的正常生长代谢无明显影响,当培养基中 Cd^{2+} 浓度达60 mg/L以上时,SRB的生长代谢受到明显影响。相关资料^[16]显示,低浓度的重金属可刺激微生物生长,而高浓度的重金属可抑制微生物的生长繁殖,损害其呼吸作用,使细胞形态异常,甚至裂解。SRB可以通过细胞的主动吸收并积存重金属在细胞的原生质内,从而降低重金属的毒害作用,但重金属离子超过了自身的耐受性也会使SRB的代谢生长受到抑制^[17]。黄志等^[18]研究发现,随着重金属离子初始浓度的升高,SRB对于 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Fe^{2+} 各重金属离子的去除率均降低,当 Cd^{2+} 的初始质量浓度达50 mg/L后,重金属对SRB的抑制作用开始显现。

去除率是考察SRB在不同环境下去除能力的指标,7 d后课题组对培养基内 Cd^{2+} 质量浓度进行测定,并依照2.2.3中的公式计算SRB对 Cd^{2+} 的去除率,结果如图1所示。

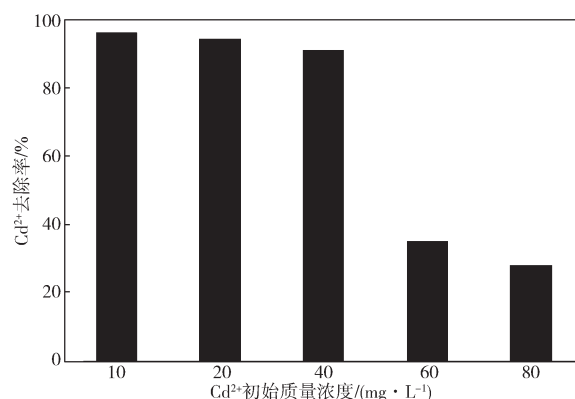


图1 不同初始质量浓度下SRB对 Cd^{2+} 的去除率

Fig. 1 Removal rate of Cd^{2+} by SRB under different initial mass concentrations

从图1中可以看出,当培养基中 Cd^{2+} 的质量浓度低于40 mg/L时,SRB对于 Cd^{2+} 的去除率接近100%;当培养基中 Cd^{2+} 的质量浓度达到60 mg/L以上时,SRB对于 Cd^{2+} 的去除率较低。试验结果从另一方面说明当生长环境的 Cd^{2+} 浓度超出SRB耐受性时,会对菌体的正常代谢生长有较为明显的抑制作用,从而降低其去除效果。而观察到高质量浓度(60, 80 mg/L) Cd^{2+} 条件下, Cd^{2+} 的去除率也有所下降,其原因可能是细胞的直接吸附作用,也有可能是细胞受到 Cd^{2+} 剧毒性裂解后的死菌体所具有的吸附作用,它能够通过吸附作用为SRB去除溶液中的高浓度重金属离子做出一定的贡献,金显春^[19]在研究微生物法除砷时,将试验所用的烟曲霉菌球经过高温杀菌后,制成吸附剂,并通过试验发现该吸附剂对As(III)和As(V)均有着良好的吸附效果。可以

推断, 本试验所培养驯化的 SRB 菌对于 Cd^{2+} 耐受极限应在 40~60 mg/L, 这与参考文献 [18] 中所得结论 (50 mg/L) 较为吻合, 说明该菌适用于低浓度 Cd^{2+} 废水的处理。

3.2 菌液对 Cd^{2+} 去除效果的试验

SRB 能否达到应用中解决含镉废水的问题, 还需研究其在不同浓度下对于 Cd^{2+} 的去除效果。在 2.1 节的试验结果基础上, 研究通过试验测定不同初始质量浓度 (10, 20, 40, 60 mg/L) 下 SRB 菌液对 Cd^{2+} 的处理效果, 结果如图 2 所示。

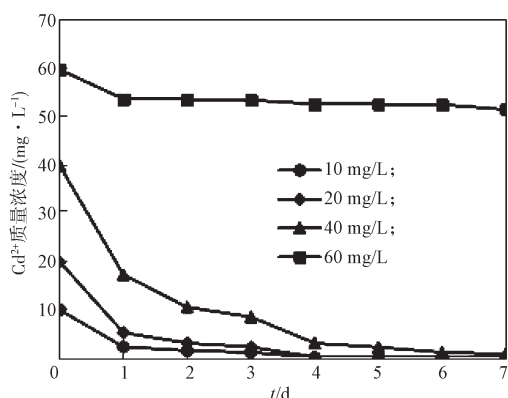


图 2 不同初始质量浓度下经 SRB 作用后废水中 Cd^{2+} 质量浓度的变化曲线

Fig. 2 Variation of residual concentration of Cd^{2+} in wastewater after SRB treatment under different initial mass concentrations

从图中 2 可以看出, 当培养基内 Cd^{2+} 溶液的质量浓度为 60 mg/L 时, SRB 对 Cd^{2+} 几乎没有去除效果, 在 1~2 d 内有部分 Cd^{2+} 浓度下降。当培养基内 Cd^{2+} 的质量浓度低于 40 mg/L 时, 在 SRB 生长的各个阶段对于 Cd^{2+} 都有较高的去除效果, SRB 可以完全去除培养基中的 Cd^{2+} , 去除率接近 100%。在整个过程中, Cd^{2+} 质量浓度随反应时间而不断下降, 培养基内的 Cd^{2+} 质量浓度在反应的前 4 d 下降得最快, 此后下降的速度趋于缓慢。这符合微生物生长的规律, SRB 在经过一段时间的适应期后, 在对数期的去除能力突出, 去除率在其对数期达到最高值, 其次为稳定期, 该结果与董静等 [20] 的研究结果相符。有学者在研究 SRB 处理含铀废水时, 发现利用以 SRB 为优势菌种的混合菌液在延滞期和对数期对于 U(VI) 的处理效果较好 [21]。

进一步分析 SRB 处理 Cd^{2+} 的效果随时间的变化规律, 以更好地在高效处理时间内利用 SRB 的去除能力解决含镉废水治理问题。课题组单独研究了 Cd^{2+} 初始浓度为 20 mg/L 时, 不同时间节点 SRB 对 Cd^{2+} 的去除效果, 结果如图 3 所示。

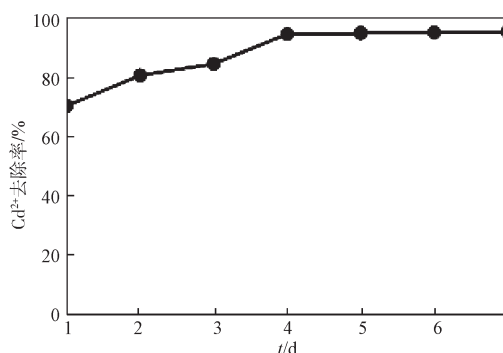
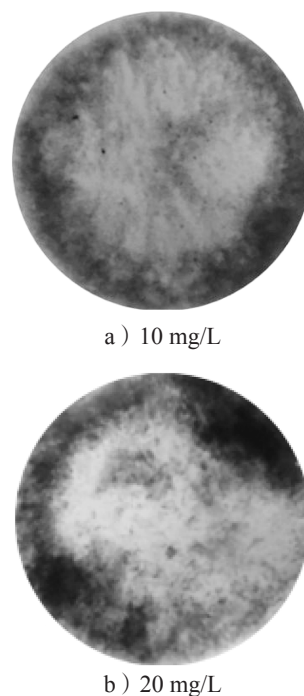


图 3 初始质量浓度为 20 mg/L 时 SRB 对 Cd^{2+} 的去除效果随时间的变化曲线

Fig. 3 Time dependent of Cd^{2+} removal rate by SRB with an initial mass concentration of 20 mg/L

从图 3 中可以看出, 向培养基中加入 20 mg/L 的 Cd^{2+} 溶液后, 前 4 d 去除的效果达到了 94%, 说明在整个 7 d 的处理过程中, SRB 前 4 d 的处理效果占据了重要地位。随着时间的增加, SRB 对于 Cd^{2+} 的去除速率 (单位时间内的去除率) 逐渐降低, 一方面可能与菌株的生长规律有关, 另一方面可能是与菌液中的硫酸根离子浓度下降有关 [22]。菌株在衰亡期对硫酸根离子的还原速率变慢, 其次, 随着反应的进行, 底物硫酸根离子的浓度减少。

SRB 对于各种重金属离子的去除机理一直是学者们研究的热点, 潘响亮 [23] 等通过试验发现硫酸盐还原菌群分泌的胞外聚合物对 Cu^{2+} 也有一定的吸附效果。本研究对反应后瓶底的沉积物进行了观察与分析, 判断 SRB 去除 Cd^{2+} 反应过程中的机理。图 4 为 7 d 后用于系统反应的锥形瓶底部的沉淀物图像。



a) 10 mg/L

b) 20 mg/L

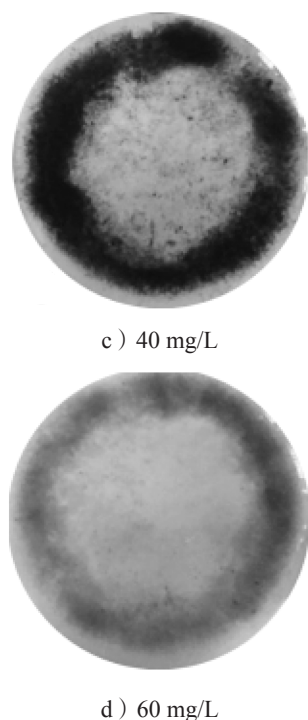


图4 不同初始质量浓度下锥形瓶底部沉淀物图像
Fig. 4 Sediment images at the bottom of the conical flask under different initial mass concentrations

从图4中可以观察到, 10~40 mg/L的3个锥形瓶底部有大量明显的黑色沉淀物, 经初步分析为CdS沉淀。由此可以得出, 在SRB菌株生长较好时, 对 Cd^{2+} 的去除途径中 H_2S 占据了主导地位, 其机理就是通过SRB还原 SO_4^{2-} 产生的 H_2S 反应生成CdS沉淀而得以去除。含有60 mg/L的 Cd^{2+} 溶液的锥形瓶底部有少量暗黄色沉淀物, 猜测沉淀物为少量CdS与死菌体的混合物。

结合3.1节的试验结果, 分析SRB菌株在耐受性范围以外的生长状况, 可以进一步掌握SRB处理含镉废水的条件, 在 Cd^{2+} 初始质量浓度为60 mg/L的情况下, SRB对其几乎没有处理效果, 过高的 Cd^{2+} 浓度会抑制SRB的还原过程, 甚至对细胞内部产生很大的损伤作用。相关资料^[24]表明, 重金属离子的剧毒性会导致其细胞内部的过度氧化和选择性损伤。它们和细胞结构组分的必要金属竞争含内部硫化物化合物和氧的结合位点, 从而破坏DNA链和蛋白质结构, 干扰细胞代谢中正常的氧化磷酸化^[25], 从而使微生物死亡。

4 结论与展望

利用生物技术对环境进行修复兴起于21世纪, 在治理重金属污染方面有很大的应用前景, 关于含镉废水的处理目前有很多。安毅夫^[26]利用硫酸盐还

原菌和解磷菌联合修复Cd污染土壤, 修复效率为73.96%。赵美花等^[27]利用黄孢原毛平革菌处理镉污染废水, 在最佳处理条件下, 对镉的去除率可达64%左右。本研究利用从污水处理厂污泥池中分离得到的以SRB为优势菌种的混合菌液处理低浓度含镉废水。

在适宜的环境条件下, SRB对 Cd^{2+} 的耐受极限应为40~60 mg/L, 有研究表明, SRB的耐受性可以通过有效途径提高, 田玉斌等^[28]通过采用聚乙烯醇-硼酸二次交联的方式, 制作了新型硫酸盐还原菌生物活性填料, SRB被包裹在包埋填料中, 提升了SRB对于重金属的耐受程度。此外, 可以通过驯化的方式来提高微生物的耐受性, 叶锦韶等^[29]认为在微生物的生长环境中含有一定浓度的某类重金属时, 可有效地诱导出微生物体内对重金属的运输与毒性起到拮抗与解毒作用的抗性基因。

初始质量浓度低于40 mg/L的含镉废水可以被SRB完全去除, 并且处理效果可以达到国家排放标准。从沉淀底物CdS可以说明将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} 从而与重金属离子形成沉淀, 是SRB去除重金属的主要途径。

在最佳的反应条件下 Cd^{2+} 的去除率接近100%, 效果比较理想, 说明利用SRB处理含镉废水具有一定的可行性, 试验所得数据可以为SRB处理低浓度含镉废水提供一定的基础参数支撑。由于微生物本身的处理机制和实验条件的不同, 如菌液投加浓度、pH值和温度等因素的影响, 不同微生物对不同重金属离子的去除效果存在一定差异。

反应过程中菌液pH值的变化与SRB还原 SO_4^{2-} 为 S^{2-} 形成CdS沉淀的关系是本试验有待解决的问题, 以及菌体裂解后高浓度 Cd^{2+} 废水浓度仍有所下降的原因也有一定的研究空间。同时, 不同的地区有着不同的环境条件, 相较于实验室研究有很大的差异, 如何结合实际开展实际的治理应用具有更深远的研究意义。

参考文献:

- [1] 王秋衡, 王淑云, 刘美英. 湖南湘江流域污染的安全评价[J]. 中国给水排水, 2004, 20(8): 104-106.
WANG Qiuheng, WANG Shuyun, LIU Meiyong. Safety Evaluation on Pollution of Xiang River Valley in Hunan Province[J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(8): 104-106.
- [2] 于靖靖, 师华定, 王明浩, 等. 湘江子流域重点污染企业影响区土壤重金属镉污染源识别[J]. 环境科学研

- 究, 2020, 33(4): 1013-1021.
- YU Jingjing, SHI Huading, WANG Minghao, et al. Identification of Soil Cadmium Pollution Sources in the Affected Areas of Key Pollution Enterprises in Xiangjiang Sub-Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(4): 1013-1021.
- [3] 李倩. 湘江流域某冶炼厂周边土壤 Cd、Pb、As 污染特征与风险评价[J]. 湖南有色金属, 2016, 32(6): 67-70, 80.
- LI Qian. Cd, Pb and As Pollution Characteristics and Risk Assessment in Soils Surrounding a Smelter Located in Xiang River[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2016, 32(6): 67-70, 80.
- [4] 刘爱民. 耐镉细菌筛选与吸附镉机理研究及其在镉污染土壤修复中的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- LIU Aimin. Isolation and the Mechanism of Cd²⁺ Adsorption of a Cadmium-Tolerant Bacterium and Its Application in Restoring Cadmium-Contamination Soils[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005.
- [5] 夏立江, 王宏康. 土壤污染及其防治[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2001: 83-120.
- XIA Lijiang, WANG Hongkang. Soil Pollution Prevention and Remediation[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2001: 83-120.
- [6] 罗珊, 陈前林, 敖先权, 等. 磷酸化壳聚糖对镉离子的吸附研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(6): 101-105.
- LUO Shan, CHEN Qianlin, AO Xianquan, et al. Adsorption of Phosphorylated Chitosan on Cadmium Ions[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(6): 101-105.
- [7] WILLIAMS C J, ADERHOLD D, EDYVEAN R G J. Comparison Between Biosorbents for the Removal of Metal Ions from Aqueous Solutions[J]. Water Research, 1998, 32(1): 216-224.
- [8] 梁莎. 化学改性生物吸附剂合成及其对重金属离子吸附行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- LIANG Sha. Study on Preparation of Chemically Modified Biosorbents and Their Adsorption Behaviors for Heavy Metal Ions[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [9] 李放. 硫酸盐还原菌株 (*Desulfovibrio desulfuricans*) 去除酸性废水中重金属离子研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- LI Fang. Study on the SRB (*Desulfovibrio Desulfuricans*) to Remove Heavy Metal Ions From Acidic[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [10] CRISAFI F, GENOVESE M, SMEDILE F, et al. Bioremediation Technologies for Polluted Seawater Sampled after an Oil-Spill in Taranto Gulf (Italy): a Comparison of Biostimulation, Bioaugmentation and Use of a Washing Agent in Microcosm Studies[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 106(1/2): 119-126.
- [11] AL-GHEETHI A A S, LALUNG J, NOMAN E A, et al. Removal of Heavy Metals and Antibiotics from Treated Sewage Effluent by Bacteria[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2015, 17(8): 2101-2123.
- [12] POSTGATE J. The Sulphate Reducing Bacteria[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984: 10-82.
- [13] 缪应祺, 倪国. 硫酸盐还原菌处理高浓硫酸盐废水[J]. 中国给水排水, 2003, 19(7): 66-67.
- MIAO Yingqi, NI Guo. Use of Sulfate-Reducing Bacteria for Treatment of High Sulfate Content Wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(7): 66-67.
- [14] 万海清, 苏仕军, 葛长海, 等. 一种分离培养硫酸盐还原菌的改进方法[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(5): 561-562.
- WAN Haiqing, SU Shijun, GE Changhai, et al. A Improved Method for Isolation and Cultivation of Sulfate-Reducing Bacteria[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2003, 9(5): 561-562.
- [15] TECLU D, TIVCHEV G, LAING M, et al. Bioremoval of Arsenic Species from Contaminated Waters by Sulphate-Reducing Bacteria[J]. Water Research, 2008, 42(19): 4885-4893.
- [16] 张甲耀. 重金属对微生物的毒性效应[J]. 环境科学, 1983(3): 71-74, 64.
- ZHANG Jiayao. Toxic Effects of Heavy Metals on Microorganisms[J]. Environmental Science, 1983(3): 71-74, 64.
- [17] 冯颖, 康勇, 张忠国. 含重金属离子酸性废水的厌氧生物处理[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(6): 104-107.
- FENG Ying, KANG Yong, ZHANG Zhongguo. Anaerobe Treatment of Acid Wastewater Containing Heavy Metal[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 27(6): 104-107.
- [18] 黄志, 徐建平, 马春艳, 等. 硫酸盐还原菌处理重金属离子[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2013(3): 43-46.
- HUANG Zhi, XU Jianping, MA Chunyan, et al. Study on Removal of the Heavy-Metal by Sulfate Reducing Bacteria[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2013(3): 43-46.
- [19] 金显春. 灭活烟曲霉菌球对砷的吸附[J]. 化学工程, 2009, 37(12): 59-62.
- JIN Xianchun. Adsorption of Arsenic by Inactivated *Aspergillus Fumigatus*[J]. Chemical Engineering,

- 2009, 37(12): 59-62.
- [20] 董净, 代群威, 赵玉连, 等. 硫酸盐还原菌的纯及对 Cd^{2+} 钝化研究 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42(5): 34-40.
DONG Jing, DAI Qunwei, ZHAO Yulian, et al. Isolation of Sulfate-Reducing Bacteria and Study on Its Passivation of Cd^{2+} [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(5): 34-40.
- [21] 刘岳林. Cu^{2+} 对硫酸盐还原菌处理低浓度含铀废水的影响与机理试验研究 [D]. 衡阳: 南华大学, 2011.
LIU Yuelin. The Influence and Mechanism of Cu^{2+} on Removal of U(VI) by Sulfate-Reducing Bacteria [D]. Hengyang: University of South China, 2011.
- [22] 刘艳. 一株硫酸盐还原菌 (*Desulfovibrio* sp. strain SRBa) 的分离鉴定及其去除水体中镉离子研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
LIU Yan. Isolation and Purification of a Sulfate-Reducing Bacterium *Desulfovibrio* sp. strain SRBa and Its Reduction of Cadmium [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [23] 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 Cu^{2+} 的吸附和机理 [J]. 水处理技术, 2005, 31(9): 25-28.
PAN Xiangliang, WANG Jianlong, ZHANG Daoyong. Copper(II) Sorption by EPS of Mixed SRB Population and Mechanism [J]. Water Treatment Technology, 2005, 31(9): 25-28.
- [24] 周芸. 啤酒酵母对水中重金属的吸附研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
ZHOU Yun. Study on Biosorption of Heavy Metal By Saccharomyces [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.
- [25] 李洪亮, 陈玉成. 污水生物处理中重金属的毒理学研究进展 [J]. 微量元素与健康研究, 2006, 23(1): 49-52.
LI Hongliang, CHEN Yucheng. Research Progress on Toxicology of Heavy Metals in Biotreatment Process of Wastewater [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2006, 23(1): 49-52.
- [26] 安毅夫. 硫酸盐还原菌与解磷菌联合修复 Cd 污染土壤 [D]. 西安: 西北大学, 2018.
AN Yifu. The Stability and Mechanism of Remediation on Cd Contaminated Soil by Sulfate Reducing Bacteria and Phosphate Solubilizing Bacteria [D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [27] 赵美花, 张朝升, 荣宏伟, 等. 黄孢原毛平革菌对镉废水的处理效果及去除途径 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(3): 72-76.
ZHAO Meihua, ZHANG Chaosheng, RONG Hongwei, et al. Removal Efficiency and Pathway of Cadmium Wastewater with *Phanerochaete Chrysosporium* [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(3): 72-76.
- [28] 田玉斌, 谭科艳, 石欢, 等. 新型硫酸盐还原菌包埋填料对于 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的去除效果 [J]. 工业水处理, 2017, 37(9): 83-86, 108.
TIAN Yubin, TAN Keyan, SHI Huan, et al. Removing Effects of the New Kind of Sulfate Reducing Bacteria Embedded Filler on Cd^{2+} and Pb^{2+} [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(9): 83-86, 108.
- [29] 叶锦韶, 尹华, 彭辉. 微生物抗重金属毒性研究进展 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2002(4): 1-4.
YE Jinshao, YIN Hua, PENG Hui. Advance on Study of the Resistance to Heavy Metal by Microorganisms [J]. Environmental Pollution Control Technology and Equipment, 2002(4): 1-4.

(责任编辑: 申剑)