

基于硫酸盐还原菌的含镉酸性矿山废水的治理及微生物群落特征

孙锐¹, 王萧燕¹, 李加兴¹, 董春晓¹, 马聪欣¹, 尹雪菲¹, 王淑平¹, 高宇^{1,2}

¹山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

²山东科技大学黄河三角洲地表过程与生态完整性研究所, 山东 青岛

收稿日期: 2023年2月28日; 录用日期: 2023年4月3日; 发布日期: 2023年4月10日

摘要

酸性矿山废水(AMD)危害是采矿业面临的最严重的环境问题之一。利用硫酸盐还原菌(SRB)处理AMD是一种低碳、绿色、经济, 具有广阔应用前景的技术。本文从煤矿煤层水中富集到一组硫酸盐还原菌群(SRBs), 进行高通量测序后发现具有硫酸盐还原能力的是脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)、脱硫弯曲孢菌属(*Desulfosporosinus*)、脱硫生孢菌属(*Desulfurispora*)。探究了SRBs在不同初始Cd²⁺浓度下的生长、硫酸盐还原和Cd²⁺的去除情况, 及在不同重金属浓度的模拟AMD中微生物群落的特征。结果表明, 随着Cd²⁺浓度的增加, OD₆₀₀逐渐降低, SO₄²⁻和Cd²⁺的去除率也逐渐降低。当Cd²⁺浓度为5 mg/L时, OD₆₀₀、SO₄²⁻和Cd²⁺的去除率均达到最大, 分别为0.706、100%和100%。利用高通量测序研究SRBs处理不同重金属浓度的矿山酸性废水中微生物群落特征表明, 一定范围内, 重金属离子浓度的增加并不会显著改变该SRBs的群落结构, 该SRBs具有较好的重金属耐受性。此外, 微生物相关性网络分析表明, 具有硫酸盐还原能力的菌属脱硫弯曲孢菌属(*Desulfosporosinus*)、脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)、脱硫生孢菌属(*Desulfurispora*)与其他菌属共同促进硫酸盐还原过程的发生。因此, 该SRBs具有良好的硫酸盐还原能力和重金属耐受性, 可用于含重金属酸性矿山废水的治理。

关键词

硫酸盐还原菌, 酸性矿山废水, 重金属镉, 微生物分析

Treatment and Microbial Community Characteristics of Cadmium-Containing Acid Mine Wastewater Based on Sulfate-Reducing Bacteria

Rui Sun¹, Xiaoyan Wang¹, Jiaying Li¹, Chunxiao Dong¹, Congxin Ma¹, Xuefei Yin¹,

文章引用: 孙锐, 王萧燕, 李加兴, 董春晓, 马聪欣, 尹雪菲, 王淑平, 高宇. 基于硫酸盐还原菌的含镉酸性矿山废水的治理及微生物群落特征[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(2): 157-165. DOI: 10.12677/aep.2023.132020

Shuping Wang¹, Yu Gao^{1,2}

¹College of Safety and Environment Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²Institute of Yellow River Delta Earth Surface Processes and Ecological Integrity, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Feb. 28th, 2023; accepted: Apr. 3rd, 2023; published: Apr. 10th, 2023

Abstract

Acid mine drainage (AMD) pollution is one of the most serious environmental problems restricting the development of mining industry. Sulfate-reducing bacteria (SRB) treatment of AMD is a low-carbon, environmentally friendly and economical technology with broad application prospects. In this study, a group of sulfate-reducing bacteria (SRBs) were enriched from coal seam water in coal mines. *Desulfovibrio*, *Desulfosporosinus* and *Desulfurispora* were identified by high-throughput sequencing. The growth, sulfate reduction and Cd²⁺ removal of SRBs at different initial Cd²⁺ concentrations, and the changes of microbial communities in simulated AMD at different heavy metal concentrations were explored. The results showed that the OD₆₀₀ gradually decreased with increasing Cd²⁺ concentration and the removal rate of SO₄²⁻ and Cd²⁺ also gradually decreased. The reduction rate of SO₄²⁻ and Cd²⁺ also decreased gradually, and the removal rate of SO₄²⁻ and Cd could reach 100% when the concentration of Cd²⁺ was 5 mg/L. Using high-throughput sequencing to study the characteristics of microbial communities in SRBs treating mine acid wastewater with different concentrations of heavy metals showed that the increase in the concentration of heavy metal ions within a certain range did not significantly change the community structure of the SRBs. The SRBs have good tolerance to heavy metals. In addition, microbial correlation network analysis showed that the bacterial genera *Desulfosporosinus*, *Desulfovibrio*, and *Desulfurispora* with sulfate-reducing ability jointly promoted sulfate recovery. Therefore, it has good sulfate reduction ability and heavy metal tolerance, and can be used for the treatment of acid mine wastewater containing heavy metals.

Keywords

Sulfate-Reducing Bacteria, Acid Mine Wastewater, Heavy Metal Cadmium, Microbial Analysis.

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭、金属矿石和含硫化物的矿物开采伴随的矿山废物往往会导致酸性矿山废水(AMD)的产生[1]。AMD 高重金属、高硫酸盐和低 pH 的特点, 不仅会破坏水体, 引起鱼类、藻类、浮游生物等水生生物的死亡, 也可能经生物积累产生持久毒性, 最终对环境和人类健康产生巨大的危害[2] [3]。过量硫酸盐的排入会影响地表水和地下水的供应, 破坏水生生态环境和可持续发展。AMD 中含有的大量重金属元素(Cu、Fe、Cd、Zn、Mn 等)会被生物富集在体内导致酶的失活, 进入人体后还会在一些器官中积累造成慢性中毒[4]。镉(Cd)作为一种工业用途的金属元素被广泛应用于各种现代工业, 如镍镉电池、颜料、合金、磷

肥、农药、纺织业、金属电镀和炼油工业的排放,会造成水、空气、土壤和食品的污染[5]。Cd 进入人体后会损伤神经系统、免疫系统、生殖系统,甚至引发肿瘤。根据世界卫生组织(WHO)的规定,饮用水中的硫酸盐浓度应保持在 250 mg/L 以下,对于某些金属,如锌、铜、镉,建议浓度分别低于 3 mg/L、2 mg/L 和 0.003 mg/L (WHO, 2008)。因此,杜绝高浓度 AMD 废水进入自然环境至关重要。

目前,用于治理 AMD 的技术有物理技术(离子交换、反渗透和吸附)、化学技术和生物技术[6]。化学技术一般通过添加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 或 CaO 进行处理。然而,这种方法生成的氢氧化物沉淀不稳定,可能引发二次污染,增加后续处理成本[7]。生物技术由于具有成本效益和环境安全性,正变得越来越重要。AMD 的微生物处理是向废水中投加硫酸盐还原菌(Sulfate-Reducing Bacteria, SRB), SRB 利用有机物进行生长代谢,将硫酸盐作为终端电子受体,还原为硫化物并生成 HCO_3^- , 进一步与金属离子结合形成硫化物沉淀达到去除重金属的目的。生成的 HCO_3^- 还可以提高碱度,在高 pH 下金属离子还可以形成氢氧化物和碳酸氢盐沉淀去除一部分重金属[8] [9]。

然而, SRB 在实际应用上仍存在一些的问题。例如,温度、pH、 SO_4^{2-} 浓度、重金属浓度等环境因素会影响 SRB 的生长,进而影响废水处理效果。然而,鲜有研究探讨重金属离子对 SRB 及其相关菌群的影响[10] [11]。因此,本研究的目的是从煤矿煤层水的水样中富集一组硫酸盐还原菌群,探究其对含 Cd^{2+} 矿山废水的处理效果,以及重金属浓度对 SRB 及其相关菌群的影响。研究成果对 SRB 在含镉酸性废水处理中的实际应用具有指导意义。

2. 实验材料和方法

2.1. 材料与设备

2.1.1. 试剂

本实验中使用的无水硫酸钠、氯化铵、磷酸氢二钾、乳酸钠、硫酸亚铁铵、抗坏血酸、氯化镁、氯化钙、氯化钡、无水乙醇、酵母粉、氢氧化钠、盐酸、铬酸钾等试剂均为分析纯。

2.1.2. 仪器设备

本实验中使用的仪器设备的型号如下: DHG-9053J 型精密恒温鼓风干燥箱(上海三发科学仪器有限公司)、721 型可见分光光度计(上海舜宇恒平科学仪器有限公司)、AL104 型电子天平(梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司)、SPX 型生化培养箱(宁波市新江南仪器有限公司)、YXQ-LS-18SI 型手提式压力蒸汽灭菌器(上海市申安医疗器械厂)、HC-3018 型高速离心机(安徽中科中佳科学仪器有限公司)。

2.2. 实验方法

2.2.1. 硫酸盐还原菌的富集



Figure1. Enriched sulfate reducing bacteria
图 1. 富集到的硫酸盐还原菌群

将 5 mL 的煤层水以及灭菌后的硫酸亚铁铵和抗坏血酸接种至盛有 100 mL 灭菌 Postgate 培养基的厌氧瓶(图 1)中[12], 置于恒温培养箱中 30°C 培养, 直至培养基的颜色变黑, 说明此时菌液中含有大量硫酸盐还原菌存在。按照上述条件再富集 3~4 次, 提高 SRBs 菌种密度。

2.2.2. SRBs 处理含镉废水

配制 100 mL Postgate 培养基, 设置 SO_4^{2-} 的浓度为 1000 mg/L, Cd^{2+} 的浓度分别为 5、10、30 mg/L, 120°C 高温灭菌 20 min。然后加入 5 ml 处于对数期的硫酸盐还原菌液, 在 30°C 的恒温培养箱中培养 192 h。每隔 24 h 测定微生物的生长量(OD_{600}); 每隔 48 h 测定剩余 SO_4^{2-} 和 Cd^{2+} 的浓度。

2.2.3. 重金属浓度对 SRBs 菌群的影响

模拟实际 AMD 成分(表 1), 设置低、中、高三个重金属浓度, 分别接种 5% 的硫酸盐还原菌液, 置于恒温培养箱中 30°C 培养 30 天后, 收集菌液进行高通量测序分析微生物群落的变化。

Table 1. Simulates AMD composition

表 1. 模拟 AMD 成分

成分/(mg/L)	浓度 1	浓度 2	浓度 3
SO_4^{2-}	1000	1000	1000
Cu^{2+}	0.65	1.5	3
Mn^{2+}	1.5	3	6
Fe^{2+}	3	10	30
Cd^{2+}	0.5	1	2

2.3. 分析方法

采用菌悬液 OD_{600} 间接测定生长量[13], 即将生长的菌液以灭菌后的培养基为参比, 在紫外-可见分光光度计 600 nm 处测定其吸光度。采用铬酸钡分光光度法(HJ/T 342-2007)于 420 nm 测定 SO_4^{2-} 的浓度。水中 Cd^{2+} 的测定参照《水质 Cu、Zn、Pb、Cd 的测定——原子吸收分光光度法(GB 7475-87)》。将含菌培养液进行离心过滤后送往上海美吉进行高通量测序, 并采用 SEM 方法进行表征。将 Cd^{2+} 浓度为 10 mg/L 的含菌培养液 8000 r/min 离心 5 min, 用 X 射线衍射技术(XRD)测定沉淀物的组分。

3. 结果与讨论

3.1. 硫酸盐还原菌的富集及鉴定

从煤矿煤层水中富集到一组硫酸盐还原菌群(SRBs), 之后进行 SEM 表征和高通量测序分析。结果如图 2 所示。采用 SEM 表征方法测得的 SRBs 的形态如图 2(a) SRBs 菌体呈弧杆状, 无鞭毛。对照《伯杰氏系统细菌分类学手册》中对脱硫弧菌属硫酸盐还原菌的描述: 多弧状, 偶有杆状, 初步判定分离得到的菌属于脱硫弧菌属。高通量测序得到的微生物群落如图 2(b), 主要由肠杆菌属(*Enterobacter*) 31.46%、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*) 19.82%、假单胞菌属(*Pseudomonas*) 13.26%、脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*) 12.26%、不动杆菌属(*Acinetobacter*) 5.94%、梭状芽孢杆菌属(*Clostridium*) 2.02%组成。肠杆菌属(*Enterobacter*)和克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)都属于兼性厌氧菌属, 发酵葡萄糖产酸产气, 不动杆菌普遍存在于土壤和水中, 这些细菌将死亡细胞和含有多糖和蛋白质的 EPS 分解成简单的有机分子, 如乙醇和乳酸, 这些简单的分子可以被 SRB 和 MB 在其代谢中利用[14]。其他一些研究报道, 一些梭状芽孢杆菌也是 SRB 的优势种[15]。该菌群中的脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)可以把硫酸盐还原成硫化氢, 达到还原硫酸盐的目的[16]。

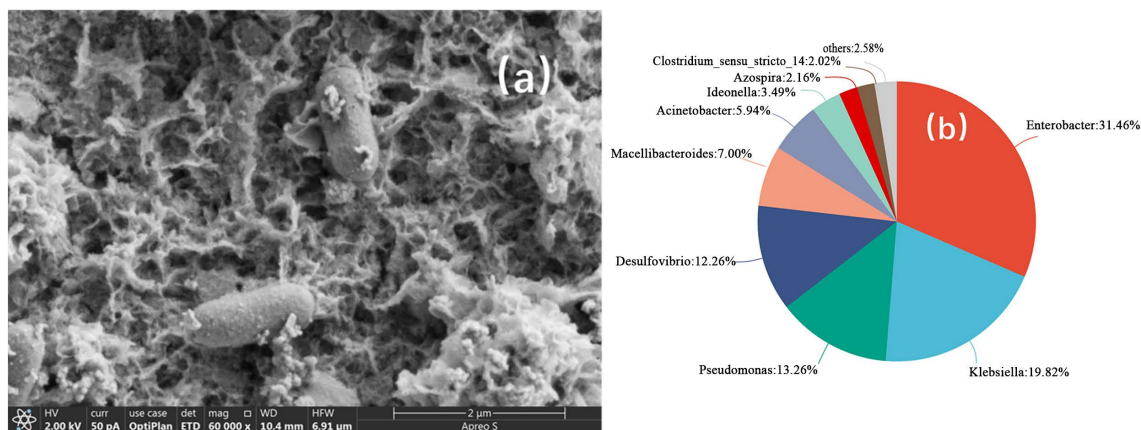


Figure 2. (a) SEM characterization; (b) Species abundance map at the genus level
图 2. (a) SEM 表征; (b) 属水平上的物种丰度图

3.2. SRBs 处理含镉废水

3.2.1. Cd^{2+} 浓度对 SRBs 生长的影响

SRBs 虽然能去除 Cd^{2+} , 但是较高 Cd^{2+} 浓度对其生长和代谢活动有抑制作用。本实验分别测定了该 SRBs 在 5、10、30mg/L Cd^{2+} 浓度下的生长情况, 结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 5 mg/L、10 mg/L、30 mg/L Cd^{2+} 的 SRBs 分别呈现出不同生长状况, 随着 Cd^{2+} 浓度的升高, SRBs 生长受到了一定程度的抑制。其中 Cd^{2+} 浓度为 5 mg/L 培养液中 SRBs 生长情况最好, 0~50 h 为对数生长期, 在 50~140 h 处于稳定期, OD_{600} 最大值 0.706, 140 h 进入衰亡期; Cd^{2+} 浓度为 10 mg/L 时, 0~24 h SRBs 生长较快, 24~96 h 生物量持续增加, 但生长缓慢, 最终达到 OD_{600} 最大值 0.481, 在 136 h 进入衰亡期; Cd^{2+} 浓度为 30 mg/L 时, SRBs 0~48 h 生长速率较大, 48~136 h 生物量变化较小, 始终维持在 0.2 左右, 在 136 h 之后进入衰亡期。

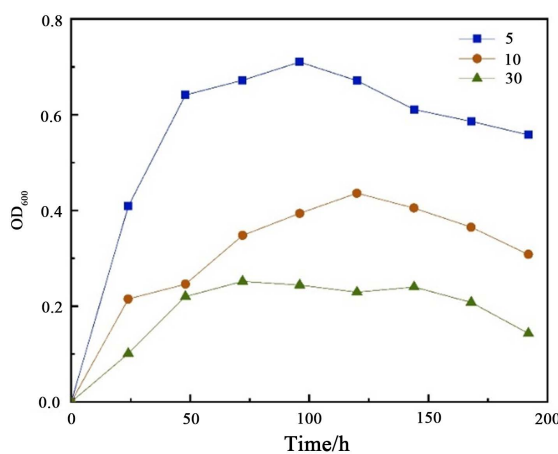


Figure 3. Growth of SRBs under different Cd^{2+} concentrations
图 3. SRBs 在不同 Cd^{2+} 浓度下的生长量

3.2.2. SRBs 对 SO_4^{2-} 和 Cd^{2+} 的去除

SRBs 在不同 Cd^{2+} 浓度下对硫酸盐还原和 Cd^{2+} 的去除效果如图 4 所示。图 4(a) SRB 在不同 Cd^{2+} 浓度下对硫酸盐的还原率。可以看出 SRBs 在 5~30 mg/L Cd^{2+} 浓度中对硫酸盐的还原率比较高, 48 h 内的硫酸

盐还原率最高达到 99%。随着反应时间的增加, 硫酸盐还原率明显下降, 可能是因为菌体对 Cd^{2+} 吸附过程中, 存在着 Cd^{2+} 的表面吸附与胞内运输、 SO_4^{2-} 胞内积累、 SO_4^{2-} 还原等行为, 随着时间的延长, Cd^{2+} 的胞内运输、 SO_4^{2-} 积累和还原需要消耗能量, 又会促进 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 等离子的释放, 导致被吸附或积累到体内 SO_4^{2-} 返回溶液中[17]。SRB 对 Cd^{2+} 的还原率总体上呈现上升趋势(图 4(b))。当 Cd^{2+} 浓度为 5 mg/L 时, Cd^{2+} 去除率可达到 100%。该 SRBs 对 10、30 mg/L Cd^{2+} 的去除率最高可达到 70%, 说明了活细胞内积累重金属离子的能力是有限度的。综上所述, 该硫酸盐还原菌群可以处理含较高 Cd^{2+} 浓度的废水。

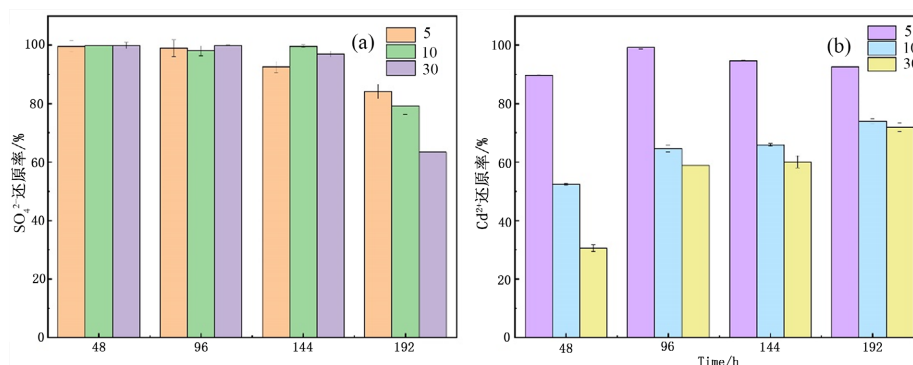


Figure 4. Reduction rates of (a) sulfate and (b) Cd^{2+} by SRBs.

图 4. SRBs 对(a)硫酸盐和(b) Cd^{2+} 的还原率

3.2.3. 沉淀物分析

将 Cd^{2+} 浓度为 10 mg/L 培养液中的沉淀物烘干、研磨成粉末后, 对其进行 X 射线衍射分析, 沉淀物的组成如图 5 所示。样品中沉淀的 2θ 吸收峰与标准谱图中的吸收峰值基本吻合且在特定位置衍射峰尖锐, 查询 XRD 标准谱图后确定沉淀相为 CdS , 对应的晶面为(111) (220)和(331), 特征峰 2θ 为 26.3° , JCPDS 卡证实 CdS 晶体为立方晶体。但是有些峰已经被弱化或发生漂移, 说明其他杂质也较多, 如 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 。XRD 图谱证明进一步证明了 SRB 对 SO_4^{2-} 的异化还原生成的 S^{2-} 可以与重金属 Cd^{2+} 形成硫化物沉淀。

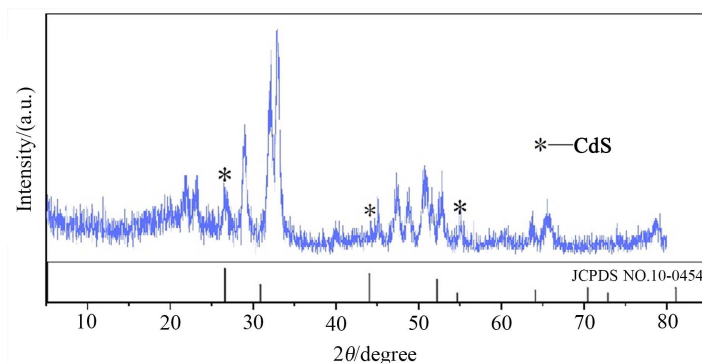


Figure 5. XRD characterization pattern of 10 mg/L Cd^{2+} concentration culture

图 5. 10 mg/L Cd^{2+} 浓度培养物的 XRD 表征图

3.3. 微生物分析

3.3.1. 微生物群落多样性

计算 Alpha 多样性统计量, 包括 Shannon 指数和 Chao1 指数, 如图 6 所示。采用 Shannon 指数评价微生物多样性的均匀性, Chao1 指数评价微生物丰富度[18]。由图可知, 在实验运行过程中, Shannon 指

数结果显示 OTU 水平上微生物物种多样性逐渐上升, Chao1 指数呈现出物种丰富度先升高后略微降低的趋势。结果表明, 重金属浓度的增加并没有引起该 SRBs 菌群多样性和丰富度的降低, 该 SRBs 对重金属浓度具有较好的耐受性。在适当的重金属浓度范围内, 微生物的多样性、均匀度和丰富度随培养时间延长而逐步上升, 表明系统内优势微生物种群的建立, SRBs 菌群达到稳定, 硫酸盐还原和重金属去除效果得以保证。

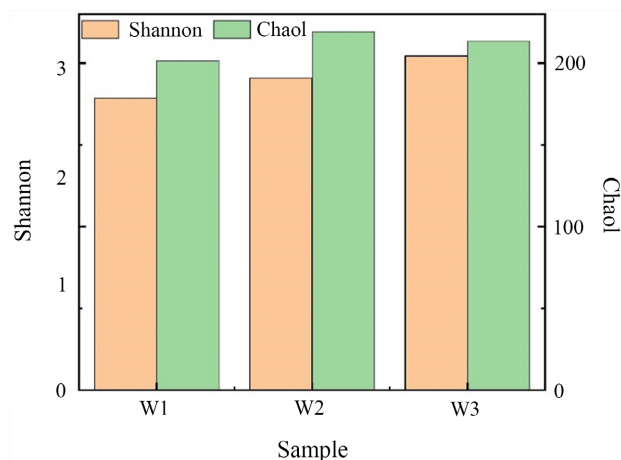


Figure 6. α diversity index of OTU level (W1-Concentration 1, W2-Concentration 2, W3-Concentration 3)

图 6. OTU 水平的 α 多样性指数(W1-浓度 1, W2-浓度 2, W3-浓度 3)

3.3.2. 属水平上的微生物相关性网络分析

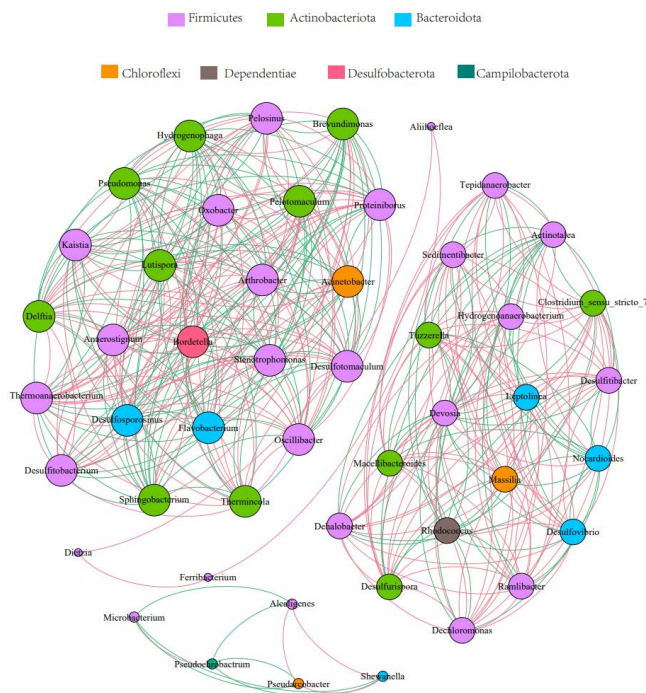


Figure 7. Correlation network diagram of different heavy metal concentration levels

图 7. 不同重金属浓度属水平上相关性网络图

在属水平上选取总丰度排名前 50 位的种, 计算种间 Spearman 相关系数来反映种间的相关性。当两

个微生物之间的 $P < 0.01$ 时, 网络中呈现出微生物之间的关系如图 7。在实验运行过程中, 与 S 代谢相关的菌属包括脱硫弯曲孢菌属(*Desulfosporosinus*)、脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)、脱硫生孢菌属(*Desulfurispora*) 等都属于厌氧菌属。这几种硫酸盐还原菌可以使用甲酸酯, 直链脂肪酸和芳香族化合物, 醇, 丙酮酸酯等作为碳源和电子供体, 利用硫酸盐和硫代硫酸盐充当末端电子受体, 并还原为 H_2S [19]。而且生态网络显示 *Desulfosporosinus* 和 *Desulfovibrio*、*Desulfurispora* 具有正相关性, 而且和周围的微生物关联性较大, 说明了硫酸盐还原菌在反应中的重要作用。*Oxobacter* 与 *Desulfosporosinus* 呈正相关, *Oxobacter* 是专性厌氧菌, 可以产生乙酸和丁酸, 从而驱动 SRB 代谢。*Clostridium_sensu_stricto_7* 是梭菌科(*Clostridiaceae*)下的一个属, 丰度也比较高, 与 *Desulfosporosinus*、*Desulfurispora* 呈正相关, *Clostridium_sensu_stricto_7* 是专性厌氧菌且不以 SO_4^{2-} 为电子受体, 与脱硫菌无竞争关系, 所以呈正相关。这些协同共生微生物可能在系统中促成硫酸盐还原过程的发生。

4. 结论

本研究从某煤矿煤层水富集出一组硫酸盐还原菌群(SRBs), 经过高通量测序鉴定出有硫酸盐还原能力的为脱硫弯曲孢菌属(*Desulfosporosinus*)、脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)、脱硫生孢菌属(*Desulfurispora*)。

1) 通过对该 SRBs 在不同 Cd^{2+} 浓度下的生长、硫酸盐和 Cd^{2+} 的去除情况以及在不同重金属浓度的模拟 AMD 中微生物群落的变化研究表明, 随着 Cd^{2+} 浓度的增加, SRBs 菌群的最大生物量逐渐降低。当 Cd^{2+} 浓度为 5 mg/L 时, OD_{600} 、 SO_4^{2-} 还原和 Cd^{2+} 去除均达到最大, 分别为 0.706、100%和 100%。

2) 微生物多样性分析表明, 一定范围内, 重金属离子浓度的增加并不会显著改变该 SRBs 的群落结构。此外, 具有硫酸盐还原能力的菌属脱硫弯曲孢菌属(*Desulfosporosinus*)、脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)、脱硫生孢菌属(*Desulfurispora*)与其他菌属共同促进硫酸盐还原过程的发生, 在反应中起着重要作用。

3) 基于该 SRBs 具有良好的硫酸盐还原能力重金属耐受性, 可用于含重金属酸性矿山废水的治理。

基金项目

作者感谢国家自然科学基金青年基金项目(42106151); 山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2021QD103)。

参考文献

- [1] Sampaio, G.F., Dos Santos, A.M., Da Costa, P.R., et al. (2020) High Rate of Biological Removal of Sulfate, Organic Matter, and Metals in UASB Reactor to Treat Synthetic Acid Mine Drainage and Cheese Whey Wastewater as Carbon Source. *Water Environment Research: A Research Publication of the Water Environment Federation*, **92**, 245-254. <https://doi.org/10.1002/wer.1235>
- [2] Johri, N., Jacquillet, G. and Unwin, R. (2010) Heavy Metal Poisoning: The Effects of Cadmium on the Kidney. *Bio-metals: An International Journal on the Role of Metal Ions in Biology, Biochemistry, and Medicine*, **23**, 783-792. <https://doi.org/10.1007/s10534-010-9328-y>
- [3] Hogsden, K.L. (2012) Consequences of Acid Mine Drainage for the Structure and Function of Benthic Stream Communities: A Review. *Freshwater Science*, **31**, 108-120. <https://doi.org/10.1899/11-091.1>
- [4] Sheoran, A., Sheoran, V. and Choudhary, R.P. (2010) Bioremediation of Acid-Rock Drainage by Sulphate-Reducing Prokaryotes: A Review. *Minerals Engineering*, **23**, 1073-1100. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.001>
- [5] Zhang, H., Li, H., Li, M., et al. (2018) Immobilizing Metal-Resistant Sulfate-Reducing Bacteria for Cadmium Removal from Aqueous Solutions. *Polish Journal of Environmental Studies*, **27**, 2851-2859. <https://doi.org/10.15244/pjoes/83666>
- [6] 张杰. 酸性矿山废水与选矿废水协同生化处理及重金属回收工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [7] Bai, H., Kang, Y., Quan, H., et al. (2013) Treatment of Acid Mine Drainage by Sulfate Reducing Bacteria with Iron in Bench Scale Runs. *Bioresource Technology*, **128**, 818-822. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.070>

- [8] Ayala-Parra, P., Sierra-Alvarez, R. and Field, J.A. (2016) Treatment of Acid Rock Drainage Using a Sulfate-Reducing Bioreactor with Zero-Valent Iron. *Journal of Hazardous Materials*, **308**, 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.029>
- [9] Zhang, H., Li, M., Yang, Z., *et al.* (2017) Isolation of a Non-Traditional Sulfate Reducing-Bacteria *Citrobacter freundii* sp and Bioremoval of Thallium and Sulfate. *Ecological Engineering*, **102**, 397-403. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.049>
- [10] Kusumawati, E., Sudrajat and Putri, J.S. (2017) Isolation and Identification of Sulfate Reducing Bacteria (SRB) from the Sediment Pond after a Coal Mine in Samarinda, East Kalimantan. *AIP Conference Proceedings*, **1813**, Article ID: 020006. <https://doi.org/10.1063/1.4975944>
- [11] Nancucheo, I., Rowe, O.F., Hedrich, S. and Johnson, D.B. (2016) Solid and Liquid Media for Isolating and Cultivating Acidophilic and Acid-Tolerant Sulfate-Reducing Bacteria. *FEMS Microbiology Letters*, **363**, fnw083. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnw083>
- [12] 胡浩鸣. 一株硫酸盐还原菌的分离鉴定及在酸性废水处理中的应用[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 东华理工大学, 2022.
- [13] 武金装, 刘红玉, 曾光明, 等. 柴油降解菌的筛选及其降解特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008(5): 1742-1746.
- [14] Doughari, H.J., Ndakidemi, P.A., Human, I.S., *et al.* (2011) The Ecology, Biology and Pathogenesis of *Acinetobacter* spp.: An Overview. *Microbes and Environments*, **26**, 101-112. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME10179>
- [15] Liu, F., Zhang, G., Liu, S., *et al.* (2018) Bioremoval of Arsenic and Antimony from Wastewater by a Mixed Culture of Sulfate-Reducing Bacteria Using Lactate and Ethanol as Carbon Sources. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **126**, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.011>
- [16] Zhang, M.L. and Wang, H.X. (2017) Removal of Cadmium, Iron and Sulfate from Synthetic Acid Rock Drainage Using Metal-Tolerant Sulfate Reducing Bacterial Sludge. In: Haeri, H., Ed., *Materials in Environmental Engineering*, De Gruyter, Berlin, 1231-1239. <https://doi.org/10.1515/9783110516623-121>
- [17] 白洁琼, 尹华, 叶锦韶, 等. 嗜麦芽窄食单胞菌对铜镉的吸附特性与离子交换[J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 217-225.
- [18] Xu, F., Ouyang, D.L., Rene, E.R., *et al.* (2019) Electricity Production Enhancement in a Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell System for Treating Saline Wastewater. *Bioresource Technology*, **288**, Article ID: 121462. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121462>
- [19] Galushko, A. and Kuever, J. (2019) *Desulfatirhabdium*. American Cancer Society, Atlanta.