



移动扫码阅读

刘虎,贺欣,晋华.酸性矿井水中微生物群落探讨及生物修复的应用分析[J].能源环境保护,2022,36(4): 18-25.

LIU Hu, HE Xin, JIN Hua. Discussion on the microbial communities in acid mine drainage and their application to bioremediation[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(4): 18-25.

# 酸性矿井水中微生物群落探讨及其在生物修复的应用分析

刘虎<sup>1</sup>, 贺欣<sup>2</sup>, 晋华<sup>2,\*</sup>

(1. 太原碧蓝水利工程设计有限公司, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 针对酸性矿井水治理难题, 分析了酸性矿井水的形成机制, 探讨了酸性矿井水中原核生物和真核生物种类及作用, 总结了微生物修复技术的应用实例。分析表明: 以微生物主导的生物氧化作用是加速酸性矿井水氧化的主要原因; 古细菌、细菌等原核生物对水中矿物元素进行氧化作用, 部分原生动物、藻类和真菌等真核生物能减缓水质污染; 充分利用微生物的生理代谢作用可强化修复效果, 结合源头控制与末端治理的生物修复技术是未来研究的重要方向。

**关键词:** 酸性矿井水; 微生物群落; 生物修复

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2022)04-0018-08

## Discussion on the microbial communities in acid mine drainage and their application to bioremediation

LIU Hu<sup>1</sup>, HE Xin<sup>2</sup>, JIN Hua<sup>2,\*</sup>

(1. Taiyuan Bilan Hydraulic Engineering Design Co., Ltd., Taiyuan 030024, China;

2. The College of Hydraulic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In view of the difficulties of treating acid mine drainage (AMD), the formation mechanism of AMD was introduced. The species and functions of prokaryotes and eukaryotes in AMD were discussed, and the application examples of microbial remediation technology were summarized. The analysis showed that biological oxidation dominated by microorganisms was the main reason for accelerated oxidation of AMD. Prokaryotes such as archaea and bacteria oxidized mineral elements in mine water, and some eukaryotes such as protozoa, algae and fungi could slow down the pollution in AMD. Making full use of the physiological metabolism of microorganisms could strengthen the repair effect. Bioremediation technology combined with source control and end treatment was an important direction of future research.

**Key Words:** Acid mine drainage; Microbiological communities; Bioremediation

## 0 引言

酸性矿井水 (acid mine drainage, AMD) 是指煤矿、铜矿、锌矿、铀矿、锡矿、钨矿以及黄铁矿等多种含硫矿物与水、空气和微生物接触后发生氧化反应造成积水酸化和金属溶解, 形成 pH 低、重

金属离子浓度高的酸性水<sup>[1]</sup>。这种具有腐蚀性和破坏性的水溢出矿坑后会对周围生态环境造成严重影响, 已成为仅次于全球变暖的第二大环境问题<sup>[2]</sup>, 因此, 采用环保经济、可持续发展的方法治理 AMD 刻不容缓<sup>[3-4]</sup>。目前, AMD 治理技术按照反应原理可分为化学修复和生物修复, 其中生物

收稿日期: 2022-02-10; 责任编辑: 蒋雯婷

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (2217080871)

第一作者简介: 刘虎 (1986—), 男, 河南项城人, 工程师, 主要从事水资源和水环境研究。E-mail: liuhuemail@126.com

通讯作者简介: 晋华 (1969—), 女, 山西灵石人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文及水资源和环境地质研究。E-mail: jinhua@tyut.edu.cn

修复因经济环保、工艺稳定和高效节材等优势逐渐凸显<sup>[5-6]</sup>。

在生物修复 AMD 中,主要倾向于末端治理,而源头控制的研究鲜有报道。硫酸盐还原菌是常用于末端治理的微生物,但其生存环境需不断添加有机物,适宜 pH 范围为 5.5~9<sup>[7]</sup>,不适合治理酸性较强的矿井水,且添加过多有机物会增大水的 COD,加重水体污染<sup>[8]</sup>。因此,需要探索更多微生物用于源头控制 AMD 的产生和末端治理强酸性矿井水。在自然界中,环境本身具有自我修复能力,但煤矿过度开采的破坏程度一直远大于环境承载力的自我修复能力<sup>[9]</sup>,使完全实现自然修复遥遥无期。生物修复在自然修复过程中占据重要地位<sup>[10]</sup>,主要依靠微生物的生理代谢功能来降低污染物浓度,而研究 AMD 微生物群落是实现生物修复的基础。

目前,国内外已有大量学者对 AMD 微生物群落的组成展开研究。尹华群<sup>[10]</sup>分析出铜矿 AMD 中主要为八纲细菌,其中以嗜酸性氧化菌为优势菌群;KORZHENKO 等<sup>[11]</sup>表明在铜矿 AMD 微生物群落中,除细菌外还存在古细菌。但这些研究大都关注微生物群落中的原核生物,缺乏对环境真核生物的探讨及可用于 AMD 治理的微生物分析。文章从 AMD 的形成机制出发,研究近年来有关 AMD 中微生物群落的文献,对 AMD 微生物中存在的原核生物和真核生物的种类和功能进行分析,探讨从源头控制和末端治理开展生物修复 AMD 的应用研究,为后续展开生物修复 AMD 工

作奠定基础。

## 1 AMD 的形成机制

酸性矿井水是硫化矿物在化学氧化和生物氧化共同作用下生成含大量硫酸根离子和重金属离子的酸性积水<sup>[3]</sup>,其形成的主要原因是富含硫和金属的矿床发生化学氧化和生物氧化,其中由大量微生物主导的生物氧化能使硫化矿物溶解速率加快  $10^6$  倍<sup>[12-13]</sup>。AMD 的形成机制如图 1 所示,其具体过程为硫化矿物在充足的氧气和水作用下发生化学氧化,硫元素一部分以低价态硫膜的形式附着于矿物表面,在一定程度上阻止了化学氧化进程;另一部分生成了中间产物硫酸从而降低了水的 pH,促进矿物中金属元素的溶解,形成含高浓度金属的酸性矿井水。酸化后的矿井水加快了嗜酸性微生物的生长和繁殖,其中嗜酸性氧化菌能将矿物中低价态硫氧化为高价态硫,同时释放能量维持自身代谢,矿井水中主要发生生物氧化为主<sup>[10,13]</sup>。已有资料表明,当矿井水 pH 高于 4 时,硫氧化由化学氧化和氧化亚铁硫杆菌 *Acidithiobacillus ferrooxidans* (*A. ferrooxidans*) 等微生物主导的生物氧化共同作用;当 pH 在 1.5~4 之间,主要发生以 *A. ferrooxidans* 介导的生物氧化为主;当 pH 降到 1.5 以下,氧化亚铁钩端螺旋菌 *Leptospirillum ferrooxidans* (*L. ferrooxidans*) 大量生长,在生物氧化中占据主导地位<sup>[14]</sup>。由此可见,微生物在硫化矿物的氧化和 AMD 的加速形成中起着非常重要的作用。

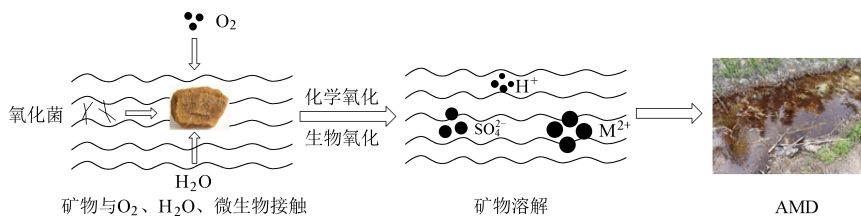


图 1 AMD 形成机制

Fig.1 The formation mechanism of AMD

## 2 AMD 中的微生物

酸性矿井水中存在丰富的微生物,按细胞类型可分为以古细菌和细菌为主的原核生物和以原生动物、藻类和真菌为主的真核生物,表 1 中对不同矿物 AMD 中出现的微生物进行总结。这些微生物从矿物或其他资源中获得能量维持自身生长的同时在水体环境中发挥着元素循环的作用。古细菌、细菌等原核生物对矿物元素起到

氧化作用,如将低价态硫氧化为硫酸根离子,形成高浓度硫酸根的酸性矿井水<sup>[15-16]</sup>。部分原生动物、藻类和真菌等真核生物能影响矿井水中微生物群落的生长,还有一部分真核生物能通过生理代谢起到减缓水质污染的作用<sup>[17]</sup>,可降低矿井水的酸性离子和重金属离子浓度。微生物的这些作用对矿井水的形成有很大影响,因此,研究 AMD 中微生物的种类和作用对修复 AMD 有重要意义。

表 1 不同矿物 AMD 中的微生物种类  
Table 1 Microbial species in AMD of different minerals

| 矿区<br>位置           | 矿物<br>类型 | 原核生物                                                                                                                                                                                                                                      |                                                              | 真核生物                                                   |                                              | 文献      |
|--------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------|
|                    |          | 细菌                                                                                                                                                                                                                                        | 古细菌                                                          | 藻类及真菌                                                  | 原生动物                                         |         |
| 湖北<br>大冶           | 铜矿       | $\alpha$ -Proteobacteria, $\gamma$ -Proteobacteria (主要为 <i>A. ferrooxidans</i> ), <i>Nitrospira</i> (主要为 <i>L. ferrooxidans</i> ) 以及 <i>Actinobacteria</i>                                                                                | 由 广 古 菌 门 <i>Euryarchaeota</i> 中的 <i>Thermoplasma</i> 相关古菌组成 | /                                                      | /                                            | [18]    |
| 英国安<br>格爾西         | 铜矿       | <i>Actinobacteria</i> , $\gamma$ -Proteobacteria, $\alpha$ -Proteobacterial, <i>Nitrospirae</i> ( <i>Leptospirillum</i> spp.)                                                                                                             | 主要为 广古菌门 <i>Euryarchaeota</i> 中的 <i>Thermoplasmatales</i>    | /                                                      | /                                            | [11]    |
| 山东<br>招远           | 金矿       | $\alpha$ -Proteobacteria, $\beta$ -Proteobacteria, $\gamma$ -Proteobacteria, <i>Firmieutes</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Acidobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i>                                                                      | /                                                            | /                                                      | /                                            | [19]    |
| 广西<br>大厂           | 锡矿       | $\alpha$ -Proteobacteria, $\gamma$ -Proteobacteria ( <i>A. ferrooxidans</i> 为主), <i>Nitrospira</i> ( <i>L. ferrooxidans</i> 为主), <i>Acidobacteria</i>                                                                                     | /                                                            | /                                                      | /                                            | [20]    |
| 广东<br>韶关           | 铅锌矿      | <i>Nitrospira</i> , $\alpha$ -Proteobacteria, $\beta$ -Proteobacteria, $\gamma$ -Proteobacteria, $\delta$ -proteobacteria, <i>Firmieutes</i> 和 <i>Acidobacteria</i>                                                                       | 广古菌门 <i>Euryarchaeota</i> 的 <i>Thermoplasmatales</i>         | /                                                      | /                                            | [21-22] |
| 云南<br>蒙自           | 银矿       | $\alpha$ -Proteobacteria, $\gamma$ -Proteobacteria, $\delta$ -proteobacteria, <i>Nitrospira</i> , <i>Acidobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> 和 <i>Firmicutes</i>                                                                        | 广古菌门 <i>Euryarchaeota</i>                                    | /                                                      | /                                            | [23]    |
| 安徽<br>桐城           | 黄铁矿      | $\alpha$ -Proteobacteria, $\beta$ -Proteobacteria, $\gamma$ -Proteobacteria, <i>Actinobacteria</i> , <i>Acidobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i> , <i>Firmicutes</i> , <i>Cyanobacteria</i>                                               | 泉古菌门 <i>Crenarchaeota</i> 和 广古菌门 <i>Euryarchaeota</i>        | 定鞭藻 <i>Nuclearia</i> , 青霉菌 <i>Penicillium</i>          | 尖毛虫 <i>Oxytricha</i>                         | [24-25] |
| 广东大<br>宝山          | 多金<br>属矿 | $\alpha$ -Proteobacteria (主要 <i>Acidiphilium</i> ), $\gamma$ -Proteobacteria (主要为 <i>A. ferrooxidans</i> ), <i>Nitrospirae</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Firmicutes</i>                                                                | 广古菌门 <i>Euryarchaeota</i> 中的 <i>Thermoplasmatales</i>        | 绿藻 <i>Chlorophyta</i> 和真菌                              | 纤毛虫 <i>Ciliophora</i>                        | [26-27] |
| 安徽<br>芜湖           | 黄铁矿      | $\alpha$ -Proteobacteria (常见 <i>Acidiphilium</i> ), $\beta$ -Proteobacteria (常见 <i>Ferrovum</i> ), $\gamma$ -Proteobacteria, <i>Actinobacteria</i> , <i>Acidobacteria</i> , <i>Firmicutes</i> , <i>Cyanobacteria</i> , <i>Nitrospirae</i> | 广古菌门 <i>Euryarchaeota</i>                                    | 绿藻中的衣藻 <i>Chlamydomonas</i> 及球藻 <i>Auxenochlorella</i> | 尖毛虫 <i>Oxytricha</i> , 鞭毛虫 <i>Ochromonas</i> | [28-29] |
| 阿根廷圣<br>路易斯<br>卡罗纳 | 金矿       | $\alpha$ -Proteobacteria, $\beta$ -Proteobacteria, $\gamma$ -Proteobacteria, <i>Acidobacteria</i> , <i>Nitrospirae</i> , <i>Cyanobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i>                                                                      | 广古菌门 <i>Euryarchaeota</i>                                    | 多种藻类和真菌                                                | 线虫 <i>Nematoda</i>                           | [30]    |

2.1 原核生物

酸性矿井水中存在单细胞原核生物,主要有两门古细菌以及七门细菌<sup>[31]</sup>。一般情况下,AMD 中的古细菌主要有泉古菌门(*Crenarchaeota*)和广古菌门(*Euryarchaeota*),它们都是极端嗜酸微生物,其中部分古细菌具有氨氧化作用,能将 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 氧

化转化为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>,促进环境中氮元素循环,影响微生物群落的变化<sup>[32-33]</sup>。AMD 中的部分 *Crenarchaeota* 可氧化低价硫元素,能将硫作为电子受体在细胞内进行化学暗反应氧化为高价态硫,并利用这个过程产生的能量进行自养生长;*Euryarchaeota* 中存在热原体属(*Thermoplasma*)对

铁元素有很强的氧化能力,这类古细菌提高了 AMD 中  $\text{Fe}^{2+}$  向  $\text{Fe}^{3+}$  的转换速率<sup>[34-35]</sup>。

AMD 中存在种类丰富的细菌,主要有变形杆菌(*Proteobacteria*)、硝化螺旋菌(*Nitrospira*)、蓝细菌(*Cyanobacteria*)、厚壁菌(*Firmicutes*)、放线菌(*Actinobacteria*)、酸杆菌(*Acidobacteria*)和拟杆菌(*Bacteroidetes*)等七门细菌。变形杆菌主要有  $\alpha$ -变形杆菌( $\alpha$ -*Proteobacteria*)、 $\beta$ -变形杆菌( $\beta$ -*Proteobacteria*)、 $\gamma$ -变形杆菌( $\gamma$ -*Proteobacteria*)三纲细菌。 $\alpha$ -*Proteobacteria* 中最常见的是嗜酸菌(*Acidiphilium*),它是一种以有机物作为电子供体和能源的化能异养菌,能在有氧或无氧条件下氧化有机物并还原  $\text{Fe}^{3+}$ ,去除 AMD 中的有毒有机物并不断回收水中  $\text{Fe}^{3+}$  产生  $\text{Fe}^{2+}$ ,故嗜酸菌与铁氧化细菌具有促进共同生长的协同作用,为铁氧化细菌创造了有益的环境<sup>[36]</sup>。 $\beta$ -*Proteobacteria* 的铁卵形菌 *Ferroplasma* 是化能自养菌,普遍存在于含铁的 AMD 中,能利用  $\text{O}_2$  为电子受体将  $\text{Fe}^{2+}$  氧化为  $\text{Fe}^{3+}$ ,与 *Acidiphilium* 相互促进生长<sup>[28]</sup>;此外,它还能利用卡式循环固定  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$ ,因此,这种细菌在 AMD 中的铁氧化、碳氮循环中发挥重要作用<sup>[37-38]</sup>。在酸化的矿井水中常发现  $\gamma$ -*proteobacteria* 纲 *A. ferrooxidans* 和 *Nitrospira* 门的 *L. ferrooxidans*,这两种细菌是促进矿物发生生物氧化的主要菌种,能加速  $\text{Fe}^{2+}$  和硫元素的氧化,其中化能自养的 *A. ferrooxidans* 常生存在 pH 为 1~5 富含硫元素的 AMD 中,可利用空气中的  $\text{CO}_2$  为碳源、氮和磷的无机化合物为营养源,将  $\text{Fe}^{2+}$  和低价硫元素氧化成  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  获得能量促进生长,是一般 AMD 中生物氧化的主要参与者<sup>[39]</sup>;能在 pH 为 1~3 的极端环境中生存的 *L. ferrooxidans* 是化能自养专性铁氧化细菌,该细菌能固定环境中的  $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$  为自身提供营养,以氧气为电子受体将  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ,常与 *A. ferrooxidans* 共同存在于 AMD 中<sup>[40]</sup>。在一些露天开采形成的 AMD 中存在着蓝细菌(*Cyanobacteria*),这种单细胞原核生物体内含有叶绿素,能通过光学作用产生氧气,影响周边局部环境中碳和氮的循环,能产生细胞外物质(如多糖)吸附金属离子以减轻污染<sup>[41-42]</sup>。另外,在不同 AMD 中还广泛出现 *Firmicutes*、*Actinobacteria*、*Acidobacteria* 及 *Bacteroidetes* 门细菌,这些嗜酸或耐酸细菌可通过利用环境中的有机物驱动碳元素循环,从而促进铁、硫氧化菌的生长并催化矿物溶解<sup>[23]</sup>。

## 2.2 真核生物

酸性矿井水中还存在着原生动动物、藻类和真菌等多种真核生物<sup>[28]</sup>。原生动物是 AMD 中主要的消费者,通过捕食细菌获得能量而生存,这种食物链关系能在一定程度上消耗细菌,在 AMD 中可抑制氧化细菌的过度生长,减缓矿井水的酸化<sup>[16]</sup>。在夏季和秋季,*Ochromonas* 鞭毛虫是 AMD 中常见的原生动物,它能进行光合作用自养也能捕食细菌和微藻等异养生存,是 AMD 中顶级的捕食者,在控制 AMD 中嗜酸细菌的丰富度和微生物群落结构方面起着关键作用<sup>[28]</sup>;在一些黄铁矿 AMD 中还出现了 *Eutreptia* 鞭毛虫,这类鞭毛虫可以捕食 AMD 中的 *A. ferrooxidans* 和 *L. ferrooxidans*,对产酸细菌进行生物控制,能在一定程度上减少嗜酸性细菌的数目<sup>[43]</sup>。冬季的 AMD 中常发现纤毛虫 *Ciliophora* 中的 *Oxytricha* 尖毛虫,这种原生动物以细菌、单细胞绿藻和小型鞭毛虫为食,有较强的耐寒性,是酸性环境下寒冷环境中生存较好的捕食者。

藻类是露天矿坑或老窑水溢出河段的 AMD 中最易观察到的微生物,不同的藻类具有不同的功能。一些含有叶绿素能进行光合作用的藻类是 AMD 中的主要生产者,如硅藻 *Pinnularia* spp. 能通过光合作用将无机物合成有机物,增加水中的碳源和氮源,为矿井水中的微生物提供能量,促进 AMD 中各类微生物的生长<sup>[16]</sup>;绿藻 *Chlorophyta* 中的球藻 *Auxenochlorella* 和衣藻 *Chlamydomonas* 是 AMD 中常见的光自养嗜酸藻类,能将光合作用与吸收溶解的有机碳结合为化能异养的细菌提供营养来源,但它们对温度敏感,极少同时出现,秋冬季 *Auxenochlorella* 生长茂盛,春夏季则被 *Chlamydomonas* 取代。还有一些藻类可影响 AMD 中环境的变化,如红藻 *C. caldarium* 能促进 AMD 的酸化,为嗜酸菌的大量繁殖创造良好的生存条件,能加重 AMD 水环境的酸化污染<sup>[12]</sup>;此外,有研究表明 *Chlorella* spp.、*Scenedesmus* spp. 和 *U. lactuca* 等藻类可通过生物吸附形成有机聚合物促进金属离子沉淀,降低 AMD 水体中的重金属含量<sup>[44-45]</sup>。

真菌在 AMD 微生物群落结构中具有重要作用,大多数真菌具有抗金属性,可隔离特异性金属,这增大了不耐受金属离子微生物的生存率,丰富了 AMD 中的微生物种类。有的真菌能产生可溶性碳酸盐,促进化学自养型嗜酸性原核生物的生长,从而影响 AMD 中微生物群落的结构和功

能,如青霉菌 *Penicillium* 能通过消耗有机废物和产生次生代谢物来影响群落的结构和功能<sup>[25]</sup>;有的可作为原核生物的载体,帮助原核生物附着于硫化矿物表面,如 *Eurotiomycetes* 和 *Dothideomycetes*<sup>[46-47]</sup>。

3 生物修复 AMD 的应用

目前 AMD 治理已成为重点和难点,而生物修复因其经济、环保、效果稳定且无二次污染等优势

逐渐凸显,表 2 为近年来生物修复 AMD 的部分研究实例。硫酸盐还原菌常被用于生物反应器,对硫酸根离子和 pH 的变化具有明显作用;而藻类在吸收 AMD 中金属离子方面已初见成效,但尚未被广泛应用。近年来,氧化细菌在一定条件下产生的次生矿物可吸附重金属离子,故也可用于治理 AMD。总之,合理运用微生物代谢进行生物修复 AMD 是实现可持续发展的重要手段。

表 2 生物修复 AMD 的研究实例

Table 2 Research examples of bioremediation of AMD

| 微生物种类                                                                                                                                        | 修复机理 | 修复过程                                                                              | 修复污染物                                                | 修复效果                                                                                                                                 | 文献   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 藻类                                                                                                                                           | 吸附   | 与污染水接触进行吸附                                                                        | 所有元素                                                 | 有效去除水中至少 60%~90%的所有元素                                                                                                                | [44] |
|                                                                                                                                              |      |                                                                                   | Hg                                                   | 每克藻类约可吸附 209 μg 的汞离子                                                                                                                 | [48] |
|                                                                                                                                              | 吸附   | 与稀有金属离子水溶液接触                                                                      | 稀有金属                                                 | 可除去水中 70%的金属离子,并能从藻体内 100%提取稀有金属                                                                                                     | [49] |
| 铁氧化菌 <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> 和铁还原菌 <i>Acidiphilium multivorum</i>                                                              | 氧化还原 | <i>A. multivorum</i> 进行铁还原后再用 <i>A. ferrooxidans</i> 进行氧化反应,循环 5 个周期后铁和硫被沉淀成羟基硫酸铁 | Fe、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                     | 能去除 AMD 中所有铁离子和约 40%的硫酸盐,但对其他金属离子基本没有效果                                                                                              | [50] |
| <i>Flavobacterium</i> 、 <i>Brevundimonas</i> 、 <i>Stenotrophomonas</i> 、 <i>Thermomonas</i> 组成的铁锰氧化细菌                                        | 生物氧化 | 将铁锰氧化细菌接种在 AMD 溶液中培养 10 d                                                         | Fe、Mn                                                | 能有效去除 AMD 中 Fe 和 Mn,去除效率分别达到 99.8%和 98.6%                                                                                            | [51] |
| 由 <i>Ferrofum</i> 、 <i>Delftia</i> 、 <i>Acinetobacter</i> 、 <i>Metallibacterium</i> 、 <i>Acidibacter</i> 和 <i>Acidiphilium</i> 组成的嗜酸铁氧化还原细菌群 | 氧化还原 | AMD 流经由嗜酸性的铁氧化细菌和铁还原细菌组成生物反应器装置                                                   | Fe                                                   | 可去除 93.7%的总 Fe 和 99%的 Fe <sup>2+</sup> ,但对硫酸根和酸性去除效果不太明显                                                                             | [52] |
| 硫酸盐还原菌(SRB)                                                                                                                                  | 生物还原 | AMD 流过 SRB 和石灰石组成连续碱度生产系统                                                         | Fe、Cu、Zn、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、酸性           | pH 从 4 上升到 7;SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 的还原率约为 61%;Fe <sup>2+</sup> 、Cu <sup>2+</sup> 和 Zn <sup>2+</sup> 的去除效率分别约为 76%、78.5%和 82% | [53] |
| 硫酸盐还原菌(SRB)                                                                                                                                  | 氧化还原 | AMD 经过由 SRB 和废铁形成动态反应柱                                                            | Cr、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 和酸性                 | Cr <sup>6+</sup> 、Cr <sup>3+</sup> 和 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 的去除率分别为 96.9%、67.1%和 54.3%,pH 从 4 左右增大为 6.98                      | [54] |
| 硫酸盐还原菌(SRB)和硫氧化菌 <i>Sulfurovum</i>                                                                                                           | 氧化还原 | AMD 流经硫酸盐还原菌与氧化细菌组成阶段式生物反应器                                                       | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Co、Ni、Fe、Zn、Cu、Mn 和酸性 | pH 从 4 左右增加到 6.7~7.5,去除 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 约为 91%,Co 和 Ni 的去除率均大于 80%,Fe、Zn、Cu 和 Mn 的去除率分别为 70%、80%、73%和 60%              | [55] |

3.1 源头生物控制

生物修复是可持续治理 AMD 的重要手段,根据 AMD 的特征选择合适的微生物应用于源头控制和末端治理,减少 AMD 产生的同时加强出流

AMD 的治理工作是解决 AMD 污染的有效方法。在源头治理方面,可通过控制加速矿物氧化的微生物数量来减缓生物氧化速率以达到辅助修复的目的,或通过增加 AMD 中可吸附金属离子的微生

物来缓解水体中高浓度金属的污染。AMD 中有以捕食嗜酸菌为生的原生动物,其对嗜酸菌的捕食是选择性的,能快速降低水中嗜酸菌的数量<sup>[56]</sup>,改变 AMD 中的原核生物种群结构,从而减缓 AMD 的氧化速率。SCHMIDTKE 等<sup>[57]</sup>在对德国东部卢萨提亚矿区 AMD 的研究中发现鞭毛虫 *Ochromonas* 对细菌群落有着明显的控制作用。藻类可作为源头控制的吸附剂,无二次污染并能从其体内提取和回收所吸附的重金属, *Chlorella spp.*、*Scenedesmus spp.*和 *U. lactuca* 等藻类都可吸附金属离子<sup>[44,58]</sup>。KARINE 等<sup>[59]</sup>在治理巴西煤矿 AMD 的研究中表明,藻类在处理含高浓度重金属的 AMD 后,出水可达到排放标准。

### 3.2 末端生物治理

末端治理 AMD 出露点时,除常用的硫酸盐还原菌外,还可使用能生存在强酸环境中的氧化细菌。氧化细菌能加快矿物的氧化产生次生矿物(施氏矿物和黄铁钒),这类矿物具有较大的比表面积,对重金属离子有很好的吸附和共沉淀作用,对 AMD 中的铁离子具有较好的吸附效果,但对硫酸根离子、其他金属离子和 pH 的治理需配合其他材料才能达到较好的效果<sup>[60]</sup>。CHEN 等<sup>[52]</sup>曾使用铁氧化细菌治理煤矿 AMD,该细菌对铁表现出良好的去除效果。硫酸盐还原菌(SRB)是生物治理应用最多的微生物,能还原硫元素并分泌阴离子聚合物,降低 AMD 中金属离子浓度并提高 pH<sup>[61-62]</sup>,但不适合处理酸性较强的 AMD。Liu 等<sup>[63]</sup>使用 SRB 作为硫酸盐生物反应器处理 pH 为 2.5 的 AMD 时,先用氢氧化钠将 AMD 的 pH 提高至 7 后再使用硫酸盐生物反应器处理该矿井水,因为过低的 pH 会抑制 SRB 的正常生长代谢,这也是 SRB 在生物修复 AMD 中无法应用在原位治理的原因。因此,选择合适的微生物应用于生物源头控制和末端治理中是实现 AMD 治理可持续发展的重要路径。

## 4 结 语

利用微生物的生命代谢活动可持续治理 AMD 是生物修复的优势。AMD 中真核生物存在能捕食氧化菌的原生动物和吸附金属离子的多种藻类,可应用于源头控制减少 AMD 污染物的产生和排放,如在针对修复含贵金属、稀有金属等需回收金属的 AMD,可采用藻类与污染物接触吸附后提取回收其中的金属。此外,利用原核生物中氧

化细菌产生次生矿物的机理在末端修复含高浓度铁离子 AMD 的方面具有广阔前景,而传统的硫酸盐还原菌适合治理酸性较弱的 AMD,例如,在修复酸性较强且富含铁离子的 AMD 时,可利用嗜酸性的铁氧化还原细菌去除水中大部分铁元素;对于含大量金属离子和  $\text{SO}_4^{2-}$  且 pH 在 4 以上的 AMD,可通过氧化反应配合硫酸盐还原菌来实现高效治理。在生物修复 AMD 中,可根据实际情况选择合适的方法。将源头控制和末端治理相结合的生物修复 AMD 具有绿色、低成本、环境友好等特点,是未来发展的主要方向,需更多研究者深入探索。

## 参考文献

- [1] Kefeni K K, Msagati T A M, Mamba B B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 151: 475-493.
- [2] Orbecido A, Tigue A A, Malenab R A, et al. A systematic mapping study on the development of permeable reactive barrier for acid mine drainage treatment [J]. *Matec Web of Conferences*, 2019, 268: 06019.
- [3] Naidu G, Ryu S, Thiruvengatchari R, et al. A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 247: 1110-1124.
- [4] Pereira T, Santos K, Lautert-Dutra W, et al. Acid mine drainage (AMD) treatment by neutralization: Evaluation of physical-chemical performance and ecotoxicological effects on zebrafish (*Danio rerio*) development [J]. *Chemosphere*, 2020, 253: 126665.
- [5] 倪师军,李珊,李泽琴,等. 矿山酸性废水的环境影响及防治研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23: 501-508.
- [6] 左莉娜,贺前锋. 酸性矿山废水的治理技术现状及进展 [J]. *环境工程*, 2013, 31: 35-38.
- [7] 陈凤梅,李亚新. 硫酸盐还原菌处理酸性矿山废水的技术及思考 [J]. *工业用水与废水*, 2007, 38: 17-20.
- [8] 王玮,许武林. 硫酸盐还原菌的污染与防治方法 [J]. *环境污染与防治*, 2000, 22: 31-32.
- [9] 胡振琪,龙精华,王新静. 论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39: 1751-1757.
- [10] 尹华群. 在铜矿矿坑水微生物群落结构与功能研究中基因芯片技术的发展和运用 [D]. 长沙: 中南大学, 2007: 1-38.
- [11] Korzhenko V A A, Toshchako V S V, Bargiela R, et al. Archaea dominate the microbial community in an ecosystem with low-to-moderate temperature and extreme acidity [J]. *Microbiome*, 2019, 7: 1-14.
- [12] Sethurajan M, Hullebusch E, Nanchaiah Y V. Biotechnology in the management and resource recovery from metal bearing solid wastes: Recent advances [J]. *Journal of Environmental*

- Management, 2018, 211: 138-153.
- [13] 刘云. 黄铁矿氧化机理及表面钝化行为的电化学研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 2-5.
  - [14] Johnson D B, Hallberg K B. Acid mine drainage remediation options: A review [J]. The Science of the Total Environment, 2005, 338: 3-14.
  - [15] Nordstrom D K, Blowes D W, Ptacek C J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update [J]. Applied Geochemistry, 2015, 57: 3-16.
  - [16] Brake S S, Hasiotis S T. Eukaryote-dominated biofilms and their significance in acidic environments [J]. Geomicrobiology Journal, 2010, 27: 534-558.
  - [17] Shamik D, 方家松, 李江涛, 等. 现代酸性矿山废水环境中的真核微生物: 生物多样性, 生理学, 生物地球化学特征及其对古环境和早期生命演化的指示 [J]. 第四纪研究, 2013, 33: 68-78.
  - [18] 霍强, 刘晰, 刘文斌, 等. 封闭环境下酸性矿坑水中微生物生态多样性的研究 [J]. 现代生物医学进展, 2009, 9: 2255-2259.
  - [19] Li M, Tian H, Wang L, et al. Bacterial diversity in Linglong gold mine, China [J]. Geomicrobiology Journal, 2016, 34: 267-273.
  - [20] 王杰伟. 多种不同类型酸性矿坑水中微生物群落结构分析 [D]. 长沙: 中南大学, 2007: 30-37.
  - [21] 陈林兴. 矿山酸性废水中古菌微生物的物种和功能多样性研究 [D]. 广州: 中山大学, 2017: 26-48.
  - [22] 谭贵良. 极端酸性矿山废水中微生物群落组成及多样性 [D]. 广州: 中山大学, 2006: 20-37.
  - [23] 梁宗林, 秦亚玲, 王沛, 等. 云南省蒙自酸性矿山排水微生物群落结构和功能 [J]. 生物工程学报, 2019, 35 (251): 10-24.
  - [24] Hao C, Zhang L, Wang L, et al. Microbial community composition in acid mine drainage lake of Xiang Mountain sulfide mine in Anhui Province, China [J]. Geomicrobiology Journal, 2012, 29: 886-895.
  - [25] Hao C, Wang L, Gao Y, et al. Microbial diversity in acid mine drainage of Xiang Mountain sulfide mine, Anhui Province, China [J]. Extremophiles, 2010, 14: 465-474.
  - [26] Liang J L, Li X J, Shu H Y, et al. Fine-scale spatial patterns in microbial community composition in an acid mine drainage [J]. Fems Microbiology Ecology, 2017, 93: 1-8.
  - [27] 刘帆, 张晓辉, 唐宋, 等. 酸性矿山废水对沉积物真核微生物群落的影响 [J]. 中国环境科学, 2019, 39: 5285-5292.
  - [28] Hao C, Wei P, Pei L, et al. Significant seasonal variations of microbial community in an acid mine drainage lake in Anhui Province, China [J]. Environmental Pollution, 2017, 223: 507-516.
  - [29] Xin R, Banda J F, Hao C, et al. Contrasting seasonal variations of geochemistry and microbial community in two adjacent acid mine drainage lakes in Anhui Province, China [J]. Environmental Pollution, 2020: 115826.
  - [30] Bonilla, Jose O, Kurth, et al. Prokaryotic and eukaryotic community structure affected by the presence of an acid mine drainage from an abandoned gold mine [J]. Extremophiles, 2018, 22: 699-711.
  - [31] 陆建军, 陆现彩, 王睿勇, 等. 多金属矿山环境中矿物的微生物分解及环境效应研究进展 [J]. 高校地质学报, 2007, 13: 621-629.
  - [32] 陈熙, 张明, 郭怡雯. 氨氧化古细菌 (AOA) 的研究进展 [J]. 上海化工, 2009, 34: 1-6.
  - [33] Lehtovirta L E, Prosser J I, Nicol G W. Soil pH regulates the abundance and diversity of Group 1. 1c Crenarchaeota [J]. Fems Microbiology Ecology, 2009, 70: 367-376.
  - [34] Aytar P, Kay C M, Mutlu M B, et al. Diversity of acidophilic prokaryotes at two acid mine drainage sites in Turkey [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22: 5995-6003.
  - [35] 谢学辉. 酸性矿水中微生物群落及其在黄铁矿表面的吸附 [D]. 长沙: 中南大学, 2007: 37-72.
  - [36] Ullrich S R, Poehlein A, Voget S, et al. Permanent draft genome sequence of *Acidiphilium* sp. JA12-A1 [J]. Standards in Genomic Sciences, 2015, 10: 1-10.
  - [37] 曹子敏, Banda J F, 裴理鑫, 等. 安徽某铁矿不同矿山废水库中微生物群落结构特征 [J]. 微生物学报, 2019, 59: 1076-1088.
  - [38] Ullrich S R, Anja P, Tischler J S, et al. Genome analysis of the biotechnologically relevant acidophilic iron oxidising strain JA12 indicates phylogenetic and metabolic diversity within the novel genus "*Ferrofum*" [J]. Plos One, 2016, 11: 1725-1735.
  - [39] 张宇, 李茹, 李茜, 等. 氧化亚铁硫杆菌脱硫研究进展 [J]. 当代化工, 2021, 50 (2): 464-473.
  - [40] Parro V C, Moreno P M. Infrared line parameters at low temperatures relevant to planetary atmospheres [J]. Research in Microbiology, 2004, 155: 703-709.
  - [41] Mesa V, Gallego J, Gonzalez G R, et al. Bacterial, archaeal, and eukaryotic diversity across distinct microhabitats in an acid mine drainage [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 1756.
  - [42] Hou D, Zhang P, Zhang J, et al. Spatial variation of sediment bacterial community in an acid mine drainage contaminated area and surrounding river basin [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 251: 109542.
  - [43] Johnson D B, Rang L. Effects of acidophilic protozoa on populations of metal-mobilizing bacteria during the leaching of pyritic coal [J]. Microbiology, 1993, 139: 1417-1423.
  - [44] Pinto J, Henriques B, Soares J, et al. A green method based on living macroalgae for the removal of rare-earth elements from contaminated waters [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110376.
  - [45] 曹琳辉. 银山铅锌矿酸性矿坑水微生物群落结构分析 [D]. 长沙: 中南大学, 2007: 1-34.
  - [46] Baker B J, Tyson G W, Goosherst L, et al. Insights into the diversity of eukaryotes in acid mine drainage biofilm communities [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009,

- 75: 2192-2199.
- [47] Baker BJ, Lutz M A, Dawson S C, et al. Metabolically active eukaryotic communities in extremely acidic mine drainage [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70: 6264-6271.
- [48] Henriques B, Rocha L, Lopes C, et al. Study on bioaccumulation and biosorption of mercury by living marine macroalgae: Prospecting for a new remediation biotechnology applied to saline waters [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 281: 759-770.
- [49] Jacinto J, Henriques B, Duarte A, et al. Removal and recovery of critical rare elements from contaminated waters by living *Gracilaria gracilis* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 344: 531-538.
- [50] Jin D, Wang X, Liu L, et al. A novel approach for treating acid mine drainage through forming schwertmannite driven by a mixed culture of *Acidiphilium multivorum* and *Acidithiobacillus ferrooxidans* prior to lime neutralization [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 400: 123108.
- [51] Hou D, Zhang P, Wei D, et al. Simultaneous removal of iron and manganese from acid mine drainage by acclimated bacteria [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 396: 122631.
- [52] Hea C, Tx B, Zn A, et al. In-situ remediation of acid mine drainage from abandoned coal mine by field pilot-scale passive treatment system: Performance and response of microbial communities to low pH and elevated Fe [J]. Bioresource Technology, 2020, 317: 123985.
- [53] 石太宏, 杨娣, 冯玉香, 等. SAPS 处理酸性矿山废水的模拟应用研究 [J]. 环境工程学报, 2015, 9: 2277-2283.
- [54] Wang X, Di J, Dong Y, et al. The dynamic experiment on treating acid mine drainage with iron scrap and sulfate reducing bacteria using biomass materials as carbon source [J]. Journal of Renewable Materials, 2021, 9: 163-177.
- [55] Elis W N, Llandroa G G, Lauren N M Y, et al. Sulfate and metal removal from acid mine drainage using sugarcane vinasse as electron donor: Performance and microbial community of the down-flow structured-bed bioreactor [J]. Bioresource Technology, 2021, 330: 124968.
- [56] 周可新, 许木启, 曹宏. 原生动物的捕食作用对水细菌的影响 [J]. 水生生物学报, 2003, 27: 190-195.
- [57] Schmidtke A, Weithoff B G. Potential grazing impact of the mixotrophic flagellate *Ochromonas* sp. (Chrysophyceae) on bacteria in an extremely acidic lake [J]. Journal of Plankton Research, 2006, 28: 991-1001.
- [58] Mang K C. Algae-based heavy metal remediation in acid mine drainage: A review [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2020, 18: 2499-2512.
- [59] Karine B S, Vitor O A, Jessica W, et al. Removal of pollutants from an AMD from a coal mine by neutralization/precipitation followed by "in vivo" biosorption step with the microalgae *Scenedesmus* sp. [J]. Minerals, 2020, 10 (711): 1-11.
- [60] 宋永伟, 王鹤茹, 梁剑茹, 等. 嗜酸性氧化亚铁硫杆菌介导的次生铁矿物形成的影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 2018, 38: 1024-1030.
- [61] 林海, 李真, 贺银海, 等. 硫酸盐还原菌治理酸性矿山废水研究进展 [J]. 环境保护科学, 2019, 5: 25-31.
- [62] Costa J M, Castro K, Rodriguez R P, et al. Anaerobic reactors for the treatment of sulphate and metal-rich wastewater: A review [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2020: 1-12.
- [63] Liu X, Zou G, Wang X, et al. A novel low pH sulfidogenic bioreactor using activated sludge as carbon source to treat acid mine drainage (AMD) and recovery metal sulfides: Pilot scale study [J]. Minerals Engineering, 2013, 48: 51-55.