

不同类型微生物钝化固定镉污染的研究进展

陈瑞红, 秦永丽, 赖凤, 蒋永荣

(桂林电子科技大学生命与环境科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 这是一篇矿山生态修复领域的论文。近年来, 微生物钝化固定逐渐成为重金属污染治理领域的研究热点。结合典型菌株与重金属镉的钝化固定规律对微生物钝化固定镉的机制进行归纳: (1) 微生物细胞壁及胞外聚合物 (EPS) 具有丰富的基团, 如羧基、羟基等, 能够有效吸附 Cd^{2+} , 并提供成核位点, 钝化为晶体矿物; (2) 环境中的硫酸盐还原菌、溶磷菌、产脲酶菌可通过自身代谢, 生成金属沉淀, 通过微环境变化, 形成晶体矿物; 铁锰氧化菌是通过自身代谢产物间接吸附重金属离子。研究微生物钝化固定镉的反应机制及含镉晶体矿物形成微观环境条件, 对修复镉污染有重要意义。

关键词: 矿山生态修复; 微生物; 镉污染; 钝化固定; 机理

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.06.014

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 06-0087-07

引用格式: 陈瑞红, 秦永丽, 赖凤, 等. 不同类型微生物钝化固定镉污染的研究进展[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(6): 87-93+116.

CHEN Ruihong, QIN Yongli, LAI Feng, et al. Research progress of different types of microorganisms passivation and fixation of cadmium contamination[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(6): 87-93+116.

镉 (Cadmium, Cd) 是人体非必需元素, 主要以化合物的形态存在于自然界中。在自然环境下, Cd 的含量一般处于较低水平, 不会对生态和人体健康造成伤害。随着工农业的快速发展, 产生大量含重金属污染物, 造成较严重的重金属污染。尤其是矿区土壤面临着较为严重的重金属污染, 罗研等对东北典型煤矿区重金属环境进行了评价与分析, 结果显示 Cd 元素达到重度污染, 重金属潜在生态风险显示土壤为中等生态危害^[1]。重金属元素在土壤中的迁移转化是造成土壤污染的重要原因之一^[2]。全国目前约有 8.71×10^5 万 m^2 耕地受到 Cd 的污染, 涉及 11 个省市的 25 个地区^[3]。Cd 在环境中很难被消除, 会通过食物链在动植物体内积累, 损害动物的肾脏、免疫、神经、心血

管、骨骼和生殖系统。研究重金属元素的迁移转化规律^[2]及重金属污染钝化技术, 能够有效控制重金属污染对环境、对生物、人体的危害。对于 Cd 污染的治理, 现阶段的处理方法主要分为物理化学修复、生物修复, 常见的物理化学修复方法有吸附、离子交换、化学固化、电动修复等; 生物修复主要是利用动物、植物、微生物的新陈代谢实现重金属污染的修复。与其他修复手段相比, 微生物修复技术更加安全、经济、具有生态意义, 但修复见效缓慢, 易受环境影响。

微生物对重金属的钝化固定是自然界普遍存在的现象, 微生物通过自身代谢可以直接或间接使游离重金属离子以矿物的形态在细胞内或细胞外固定下来, 也称为生物矿化。不同的微生物有

收稿日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金 (52060004); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2021KY0204)

作者简介: 陈瑞红 (1990-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事微生物修复环境污染研究。

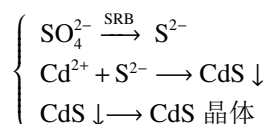
通信作者: 蒋永荣 (1970-), 女, 硕士, 教授, 主要从事废水生物处理及微生物学。

不同的钝化固定机制,除部分微生物通过细胞壁及胞外聚合物(EPS)中存在的羧基、羟基等基团吸附重金属离子外;部分微生物代谢产生的 S^{2-} 、 CO_3^{2-} 等离子可与重金属离子反应生成重金属沉淀,同时环境的变化可以促进晶核的生成,进而生成矿物,达到固定钝化重金属的作用。有研究者分离鉴定了具有钝化重金属能力的微生物。本文重点综述了近几年微生物钝化重金属Cd的研究进展和机理,旨在为后续的镉污染治理提供理论支撑。

1 硫酸盐还原菌对镉钝化固定作用

1.1 耐镉硫酸盐还原菌的筛选

硫酸盐还原菌(Sulfate reducing bacteria, SRB)是一组进行硫酸盐还原代谢的厌氧细菌的总称。厌氧条件下,SRB可将土壤中的 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} , S^{2-} 可与 Cd^{2+} 反应生成CdS沉淀,进而达到降低有效态镉含量目的,反应方程式如下:



SRB可有效去除环境中的 Cd^{2+} ,而丰富SRB库,对采用SRB修复环境镉污染具有重要意义。据不完全统计,目前已发现40种SRB,包括脱硫单胞菌属(*Desulfuromonas*)、脱硫球菌属(*Desulfococcus*)、脱硫八叠球菌属(*Desulfosarcina*)等。邓敏等通过研究发现,SRB对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 有良好的钝化还原效果,对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的去除率可达94.8%、93.9%^[4]。周冰玉等^[5]从重

金属污染水体中分离鉴定了12株SRB,均属于*Desulfovibrio*,其中有4株具有较强的镉耐受能力,可耐受80 mg/L的 Cd^{2+} 。Jeong等^[6]研究发现SRB可有效去除海洋环境中的Cd,较佳去除温度为37℃。

1.2 硫酸盐还原菌钝化固定的机理

耐镉SRB是一种能够高效去除重金属离子的微生物,进一步研究SRB去除镉的条件及机理,有助于修复环境中的重金属污染。相关研究发现SRB可将 Cd^{2+} 矿化为面心立方结构的CdS晶体^[7]。彭书传等^[8]研究了硫酸盐还原菌胞外聚合物对 Cd^{2+} 去除的作用,通过SEM-EDS表征发现,细胞外不仅存在SRB矿化形成的CdS晶体颗粒,并且有胞外聚合物与CdS结合产生CdS络合物。上述研究表明,SRB与 Cd^{2+} 反应生成的CdS,可通过微环境的变化,钝化为CdS晶体,现存在球型、椭球型、面心立方等晶体结构。对于SRB去除 Cd^{2+} 的机理,已取得阶段性进展,但并不完整,尚有不明确之处。有研究显示SRB在胞内将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ,并将 S^{2-} 排出体外,与周围的金属离子,反应生成金属硫化物^[9]。同时,也有文献显示,SRB通过主动运输将重金属离子运进体内,与 S^{2-} 反应生成金属硫化物排出体外^[6]。由此推测SRB钝化重金属的两种机制(见图1):左侧为重金属离子与 S^{2-} 在胞内反应生成金属硫化物沉淀,然后排出体外;右侧为 S^{2-} 与重金属离子在胞外生成金属硫化物沉淀。通过胞外微环境的变化,金属硫化物沉淀钝化为晶体,该晶体可单独存在体外,也可以与胞外聚合物形成络合物。

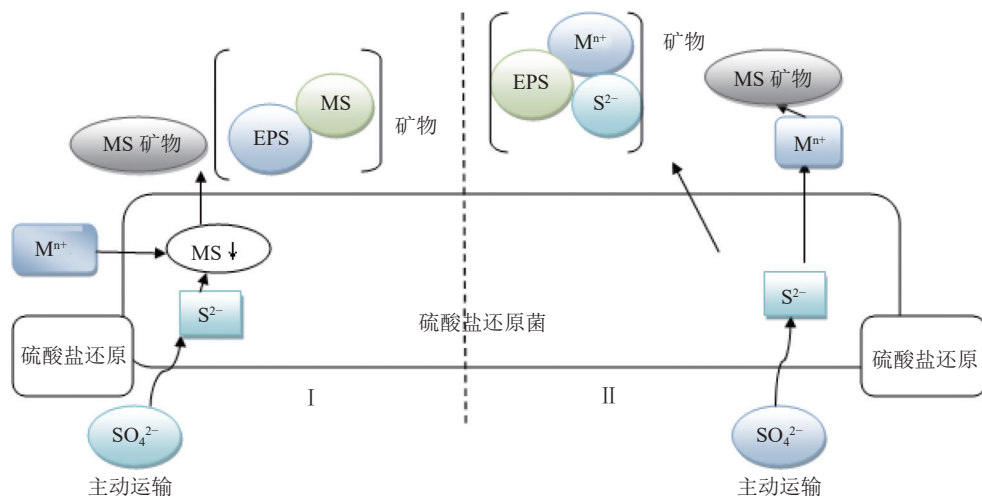


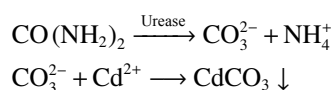
图1 硫酸盐还原菌钝化重金属的两种机制^[6,9]

Fig.1 Two mechanisms of sulfate-reducing bacteria inactivating heavy metals^[6,9]

2 产脲酶菌对镉钝化固定作用

2.1 耐镉产脲酶菌的筛选

微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 技术是镉污染治理的研究热点, 其中, 产脲酶菌是微生物诱导碳酸钙沉淀技术中应用最为广泛的一种菌类。产脲酶菌一般为好氧菌, 在其代谢过程中, 分泌的脲酶可将尿素水解为 CO_3^{2-} 和 NH_4^+ , 从而提高环境的 pH 值, 碱性条件下 Cd^{2+} 可与 CO_3^{2-} 反应生成碳酸镉沉淀, 达到去除有效态镉的目的。主要反应过程如下:



目前, 已发现多种具有良好的耐镉性能的产脲酶菌, 涵盖了假单胞菌、芽孢杆菌等。Zhao 等^[10]研究了碳酸盐矿化菌对 Cd^{2+} 的去除作用, 结果显示 Cd^{2+} 可与 CO_3^{2-} 反应生成 CdCO_3 沉淀, 去除率为 60.72%。王继勇等^[11]分离鉴定出一株高效产脲酶菌株, 该菌株对 10 mg Cd^{2+} /kg 模拟污染土壤的 Cd^{2+} 固化率 67.7%。

2.2 产脲酶菌钝化固定的机理

研究产脲酶菌钝化固定镉污染机理, 对提高镉污染治理水平有重要的意义。目前, 已有文献通过 SEM 和 IR 分析发现, CO_3^{2-} 与产脲酶菌周围的 Cd^{2+} 、 Ca^{2+} 共沉淀, 并矿化为椭球型的共晶体^[11]。其次, *Serratia marcescens* 和 *Enterobacter cloacae* 两种菌株通过 MICP 过程代谢产生的 CO_3^{2-} 与 Cd^{2+} 、 Ca^{2+} 共沉淀, 在一定环境条件下矿化生成哑铃形和球形的晶体^[12]。李哲等^[13]在研究氧化木糖无色杆菌对 Cd^{2+} 的碳酸盐矿化作用时, 发现该菌株发酵液可将 Cd^{2+} 矿化为小颗粒团聚结构的 CdCO_3 晶体。王敏等^[14]研究了两株产脲酶矿化菌对 Cd^{2+} 的钝化固定作用, 结果显示对 Cd^{2+} 去除率分别为 78.15%、80.32%, 混合培养的细菌对 Cd^{2+} 的去除率为 85.50%, 且 CO_3^{2-} 与 Cd^{2+} 、 Ca^{2+} 反应, 生成椭球型共生晶体。经文献综述推测: 产脲酶菌对 Cd^{2+} 的固化分为三个步骤: 脲酶将尿素水解为 CO_3^{2-} 和 NH_4^+ ; 细胞壁或 EPS 中的官能团通过表面络合、静电吸引吸附环境中的 Cd^{2+} 、 Ca^{2+} ; CO_3^{2-} 与 Cd^{2+} 、 Ca^{2+} 发生共沉淀反应, 并以吸附位点作为结晶位点, 在一定的环境下, 形成 CdCO_3 、 CaCO_3 共生晶体^[11, 14]。

3 溶磷菌对镉钝化固定作用

3.1 耐镉溶磷菌的筛选

溶磷菌 (PSB) 是一类重要的植物根际促生菌。土壤中存在大量的溶磷菌, 主要有假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus Cohn*)、克雷伯氏菌属 (*Klebsiella*)、沙门氏菌属 (*Salmonella*)、固氮菌属 (*Azotobacter*)、微球菌属 (*Micrococcus*)、氧化硫硫杆菌 (*Thiobacillus thiooxidans*) 等多种细菌。

溶磷菌产生的磷酸根可以与大部分重金属离子形成磷酸盐沉淀, 达到去除游离重金属的作用, 即微生物诱导磷酸盐沉淀 (MIPP)。目前, MIPP 是一种潜在的重金属污染修复方法。Macaskie 等^[15]发现, 溶磷菌 *Citrobacter* 分泌的磷酸酶反应生成的磷酸氢根离子, 与重金属形成磷酸盐沉淀。Zeng 等^[16]研究了菌株 *Burkholderia sp.* QY14 对镉的钝化作用, 结果表明菌株 QY14 可通过微生物诱导使游离镉生成沉淀。Qian 等^[17]研究了通过 MIPP 法修复镉等重金属, 结果显示矿化效果较好, 对镉的矿化效率达 66%。

3.2 溶磷菌钝化固定的机理

目前, 大部分关于溶磷菌钝化固定重金属机理的研究结果显示, 重金属的沉淀过程主要通过 MIPP 完成, 即: 部分微生物分泌的某些酶类将有机磷酸盐分解为无机磷酸盐, 分解生成的无机磷酸盐与重金属离子在细胞内或细胞外生成磷酸盐沉淀。这些磷酸盐沉淀可以被细胞壁、EPS 或细胞内的官能团吸附, 在一定的环境下, 矿化为晶体, 达到固定效果。Volesky 等^[18]研究了酿酒酵母对重金属镉的生物吸附, 结果显示 Cd^{2+} 并没有沉积在细胞壁中, 而是以磷酸盐沉淀的形式蓄积在细胞内。这可能是由于磷酸酶将 Cd^{2+} 运输进入细胞, 进而在胞内生成磷酸盐沉淀。Katarzyna 等^[19]筛选耐镉菌株, 并研究了镉的去除机理。结果显示, *Pseudomonas sp.* IV-111-16、*Bacillus sp.* ML1-2 可以使 Cd^{2+} 以磷酸盐沉淀的形式蓄集在细胞体内。Michel 等^[20]的研究发现柠檬酸菌中的磷酸酶可将无机磷酸盐从有机磷酸盐中释放出来, 与 Cd^{2+} 结合形成磷酸盐沉淀。

4 铁锰氧化菌对镉固定钝化作用

4.1 耐镉铁锰氧化菌的筛选

铁锰氧化菌是一类可以将低价态铁、锰氧化

成高价态铁、锰的微生物。高价态铁、锰分别形成的水合物或氧化物（俗称铁膜、锰膜）可以有效吸附游离重金属。铁锰氧化菌包括氧化亚铁硫杆菌（*Thiobacillus ferrooxidans*）、纤发菌属（*Leptothrix*）、芽孢杆菌（*Bacillus Cohn*）等多种微生物^[21]。

部分耐镉铁锰氧化菌可显著降低游离镉的浓度^[21]。Dong 等^[22]从重金属污染的稻田土壤中分离得到具有 Fe(II) 和 Mn(II) 氧化能力的菌株 D54 和 TWD-2，经研究发现铁锰氧化菌促进了游离镉在铁膜中的累积，从而降低水稻叶片对游离 Cd 的积累。Wei 等^[23]分离的铁锰氧化菌 *Burkholderia* sp.D416 和 *Pseudomonas* sp. YGL，铁锰氧化菌 *Pseudomonas* sp. YGL 能够显著降低稻米中的 Cd 含量。

4.2 铁锰氧化菌钝化固定的机理

铁氧化菌和锰氧化菌的氧化机制存在差异，现普遍认为亚铁离子的电子是铁氧化菌的能量源，通过自身能量代谢对铁离子进行氧化，或通过铁氧化酶进行氧化；锰氧化菌通过分泌氧化酶对锰离子进行氧化^[21]。铁锰氧化菌生成的氧化物或氢氧化物具有较高的表面积、微孔结构，并具有 -OH 等官能团，能够有效吸附重金属离子。叶文玲等探讨了铁锰氧化菌对砷成矿的机制，铁氧化菌对砷成矿分为两类：第一类是铁氧化菌的产物直接与砷生成矿物，第二类是铁化合物生成的矿物，进一步吸附砷；锰氧化菌生成的氧化锰沉淀将低价砷氧化为高价砷，进而被氧化锰沉淀吸附^[24]。截至目前，大部分学者研究了铁锰氧化菌对游离镉去除效果，但对铁锰氧化菌钝化固定镉的详细过程和机理研究甚少。结合铁锰氧化菌钝化固定重金属砷的机制，本文推测铁锰氧化菌对 Cd²⁺ 的钝化固定作用，类似于铁锰氧化菌对砷成矿的机

制，分为以下两类：铁锰氧化菌氧化生成的铁锰氧化物矿化为矿物，进而吸附 Cd²⁺；铁锰氧化物通过表面结构吸附 Cd²⁺，进一步共同钝化为矿物。

5 微生物及其 EPS 对镉钝化固定作用

除部分特殊微生物通过自身代谢诱导生成 CdS、CdCO₃ 等金属沉淀外，部分微生物细胞表面电荷及有机基团可有效吸附 Cd²⁺，也能以主动运输的方式被微生物吸收^[25]。据相关研究发现，微生物细胞壁、EPS 含有的基团，是吸附重金属的重要结合位点。Liu 等^[26]的研究发现在好氧活性污泥中提取的 EPS 对 Cd²⁺ 等重金属离子具有吸附作用，其中 EPS 具有的羧基、羟基等基团是 Cd²⁺ 的主要吸附位点。邵鑫等^[27]筛选鉴定出 4 株耐镉乳酸菌，通过红外光谱扫描研究推测，Cd²⁺ 与细胞壁的脂肪酸相互作用，结合位点主要是带负电的官能团，包括羟基、羧基、磷酸基、酰胺基等。

Huang 等^[28]通过研究 *Bacillus cereus* RC-1 吸附 Cd²⁺ 的机理，发现细胞表面络合、静电吸引吸附 Cd²⁺。此外，细胞通过主动运输将细胞内的 Cd²⁺ 含量控制在一定范围内，细胞外、细胞内螯合可能是细胞的一种重金属解毒机制，RC-1 生物蓄积 Cd²⁺ 机制见图 2。Yao 等^[29]研究了耐镉乳酸菌对 Cd²⁺ 的吸附作用，通过 SEM-EDS 和 TEM-EDS 表征，发现 Cd²⁺ 主要积累在细胞表面结构中，-OH、-NH₂、COO⁻、CH₃ 等基团对 Cd²⁺ 的吸附起到了重要的作用，且细胞表面被白色晶体包裹，细胞质内及细胞膜附近存在黑色絮状颗粒。Pugazhendhi 等^[30]研究发现 Cd²⁺ 能够与蜡状芽孢杆菌 KTSMBNL 43 细胞表面的 -OH 等官能团螯合，通过 SEM-EDS 和 XRD 表征，发现细菌表面被 Cd²⁺ 覆盖，存在大量的球形晶体。

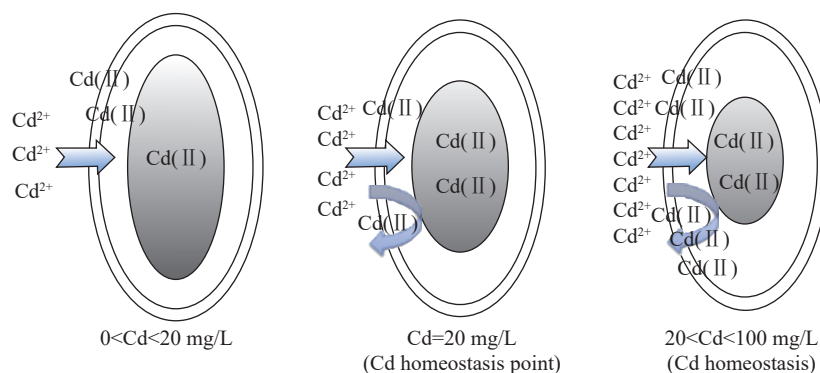


图 2 在不同初始 Cd(II) 浓度下生长蜡状芽孢杆菌 RC-1 的生物蓄积机制^[28]

Fig.2 Schematic of the bioaccumulation mechanism for growing *B. cereus* RC-1 at different initial Cd(II) concentrations^[28]

表 1 为可固定化 Cd^{2+} 的代表微生物。通过文献综述，处于镉污染下的细菌，体内会蓄积一定量的 Cd^{2+} ，细胞为了保护机体不被过量的 Cd^{2+} 毒害，一方面，会通过主动运输使细胞内的 Cd^{2+} 浓度低于毒性阈值；另一方面，细胞外的 Cd^{2+} 与细

胞壁、EPS 中的官能团相互作用，使游离 Cd^{2+} 以络合物的形态沉积在细胞外，在一定环境条件下，可形成晶体结构，达到去除镉的目的。微生物吸附 Cd^{2+} ，形成晶体的过程以及细胞内 Cd^{2+} 存在形态尚不明确，还有待进一步研究。

表 1 可固定钝化 Cd^{2+} 的代表微生物
Table 1 Representative microorganisms that can fix and passivate Cd^{2+}

类别	代表菌株	固定钝化机制	数据来源
硫酸盐还原菌	SRB	SRB 将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ，与 Cd^{2+} 结合成金属沉淀，在一定环境条件下，钝化为晶体	文献[7]
	SRB		文献[8]
脲酶菌	<i>Bacillus</i> sp. GZ-22	产脲酶菌的代谢产物为 CO_3^{2-} 和 NH_4^+ ，且能够提高环境中的 pH 值， Cd^{2+} 与 CO_3^{2-} 作用生 CdCO_3 ，在一定环境条件下，钝化为晶体	文献[10]
	<i>Enterobacter cloacae</i> EMB19		文献[12]
	<i>Achromobacter xylosoxidans</i> LAX2		文献[13]
溶磷菌	<i>Pseudomonas</i> sp. IV-111-16	磷酸酶可将有机磷酸盐水解为无机磷酸盐，进而与 Cd^{2+} 生成磷酸镉沉淀	文献[19]
	<i>Bacillus</i> sp. ML1-2		文献[19]
铁锰氧化菌	<i>Gallionella</i> . Fw	铁锰氧化菌可将低价态铁、锰氧化成高价态铁、锰的微生物。高价态铁、锰分别形成的水合物或氧化物可以有效吸附游离重金属	文献[21]
	<i>Pseudomonas</i> sp. YGL		文献[23]
微生物吸附	<i>Bacillus cereus</i> RC-1	微生物细胞壁及 EPS 中具有羟基、羧基等基团，可通过表面络合等作用吸附重金属离子，生成络合物，在一定环境条件下，钝化为晶体	文献[28]
	<i>Bacillus Cereus</i> KTSMBNL 43		文献[30]

6 微生物矿化作用在环境镉污染治理中的应用

目前，微生物矿化修复环境重金属污染的实际应用并不多，其中，以功能性微生物居多，比如：SRB、产脲酶菌、铁锰氧化菌，且多数为实验室的模拟修复。这也许与微生物修复时间周期较长、微生物环境适应性以及微生物矿化重金属的复杂环境条件有关。对于微生物矿化作用治理重金属引起的环境污染，从文献综述来看，SRB 和产脲酶菌的应用较多。其中，SRB 更多的被用于处理酸性矿山废水，因为酸性矿山废水中 SO_4^{2-} 含量较高，且 SRB 在偏酸性环境中对重金属水污染的处理效果较佳^[31-32]。如：黄志等^[33]在反应器中，用 SRB 菌液处理模拟重金属矿井水中的镉，6 h 后镉的去除率达 80.70%。相较而言，土壤环境较为复杂，菌株接种量、 SO_4^{2-} 含量、pH 值等复杂环境条件对 SRB 修复土壤重金属污染有较大的影响^[34]。产脲酶菌在修复重金属污染的应用中，同样具有很大的潜力，且在修复土壤重金属污染过程中能够更好地固化土壤。同时，有研究表明，其矿化产物在短期内对水淹、酸化、反复冻融都有很强的抗性，矿化产物性质比较稳定^[35-36]。李继勇等^[11]在镉含量为 10 mg/kg 的模拟土壤中，研究

了产脲酶菌对镉的固化去除作用，结果显示去除率达 67.7%。Zhao 等^[37]的研究显示了产脲酶菌对镉污染土壤有良好的修复效果。但是，污染环境中的尿素含量、pH 值、温度等也会对其固化重金属的效果产生影响。与 SRB 和产脲酶菌相比，溶磷菌修复重金属污染的研究较少，这可能与磷酸盐沉淀的生成较为依赖环境中游离磷酸盐的含量，以及碱性环境有关。铁锰氧化菌能够促进铁膜、锰膜的生成，对重金属离子的吸收转运有抑制作用。Wei 等^[23]利用水稻水培和盆栽实验，研究了铁锰氧化菌对镉污染的钝化作用，结果显示铁锰氧化菌可以有效减少水稻对 Cd 的吸收。但目前阶段，对于铁锰氧化菌的工程应用案例较少，因为铁膜、锰膜的生成需要大量的铁锰离子以及氧化环境。相较于功能性菌株，对于微生物及其 ESP 的吸附固定作用，环境因素影响较多（如环境温度、pH 值等），比较适用于污染水体，在土壤修复中较难应用。但功能性菌株在钝化固定重金属离子的过程中，通常情况下会伴随微生物及 ESP 的吸附。

利用微生物修复重金属污染处理成本较低且无二次污染，在环境应用中有很大的前景。进一步研究微生物矿化重金属机理、条件，有助于将微生物矿化技术应用到实际环境中。

7 结 论

(1) 环境中的 SRB、溶磷菌、产脲酶菌、铁锰矿化菌随着自身代谢, 可以与金属离子直接或间接生成金属沉淀, 此过程会改变细菌微环境, 使金属沉淀钝化为晶体颗粒; 并通过与细胞壁、EPS 中的官能团发生表面络合、静电吸引等反应团聚为矿物。

(2) 微生物细胞壁及 EPS 具有丰富的基团, 如羧基、羟基等, 能够为初期的生物成矿提供 Cd^{2+} 的吸附位点和成核位点, 并钝化为晶体矿物; 此外, 细胞通过主动运输将 Cd^{2+} 运至胞内, 并与细胞内的物质形成沉淀并固定, 此反应过程尚不明确, 需进一步研究。

(3) 微生物成矿对修复重金属污染有重要作用, 是一种具有应用潜力的修复技术。目前, 对微生物成矿机制的研究尚不完善, 尤其是铁锰氧化菌、溶磷菌钝化固定 Cd^{2+} 的机制研究较少, 进一步加强微生物成矿场所、胞内外成矿机制、矿化条件、成矿后 Cd 的溶出和迁移规律研究, 对长期有效固定及回收利用重金属有重要作用。此外, 原生微生物治理 Cd 污染, 易受环境条件影响, 可以结合分子生物学、基因工程方法构建环境适应性强、可以同时钝化多个污染物的工程菌。

参考文献:

- [1] 罗妍, 黄艺, 余大明, 等. 东北典型煤矿区重金属环境评价与分析[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):50-58.
- LUO Y, HUANG Y, YU D M, et al. Environmental assessment and analysis of heavy metals in typical coal mining areas in Northeast China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):50-58.
- [2] 韩张雄, 万的军, 胡建平, 等. 土壤中重金属元素的迁移转化规律及其影响因素[J]. *矿产综合利用*, 2017(6):5.
- HAN Z X, WAN D J, HU J P, et al. Migration and transformation law of heavy metal elements in soil and its influencing factors[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2017(6):5.
- [3] 刘青. 土壤重金属污染研究[J]. 卷宗, 2012(11):86.
- LIU Q. Study on heavy metal pollution of soil[J]. *File*, 2012(11):86.
- [4] 邓敏, 程蓉, 舒荣波, 等. 攀西矿区典型重金属污染土壤化学-微生物联合修复技术探索[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):1-9.
- DENG M, CHENG R, SHU R B, et al. Exploration of chemical-microorganism joint remediation technology for typical heavy metal contaminated soil in Panxi mining area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):1-9.
- [5] 周冰玉, 吴迎春, 陈薇, 等. 高耐镉硫酸盐还原菌的筛选及鉴定[J]. *湖南农业科学*, 2015(7):91-93.
- ZHOU B Y, WU Y B, CHEN W, et al. Screening and identification of high cadmium-tolerant sulfate-reducing bacteria[J]. *Hunan Agricultural Science*, 2015(7):91-93.
- [6] Joo J O, Choi J H, Kim I H, et al. Effective bioremediation of cadmium (II), nickel (II), and chromium (VI) in a marine environment by using *Desulfovibrio desulfuricans*[J]. *Biotechnology & Bioprocess Engineering*, 2015, 20(5):937-941.
- [7] 董净, 代群威, 赵玉连, 等. 硫酸盐还原菌的分纯及对 Cd^{2+} 钝化研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(5):34-40.
- DONG J, DAI Q W, ZHAO Y L, et al. Purification of sulfate reducing bacteria and study on Cd^{2+} passivation[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 42(5):34-40.
- [8] 彭书传, 虞艳云, 万正强, 等. 硫酸盐还原菌胞外聚合物 (EPS) 去除重金属离子 Cd^{2+} 过程中的交互作用研究[J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2013, 49(6):61-67.
- PENG S C, YU Y Y, WAN Z Q, et al. Interaction study on the removal of heavy metal ions Cd^{2+} by sulfate-reducing bacteria extracellular polymer (EPS)[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science Edition)*, 2013, 49(6):61-67.
- [9] 田琳奇. 几种环境因素对脱硫弧菌 821 生成 CdS 的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- TIAN L Q. Effects of several environmental factors on the production of CdS by *desulfovibrio* 821[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [10] ZHAO Y, YAO J, YUAN Z M, et al. Bioremediation of Cd by strain GZ-22 isolated from mine soil based on biosorption and microbially induced carbonate precipitation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(1):372-380.
- [11] 王继勇, 杨子陆, 陈加立, 等. 一株产脲酶菌株的分离及其固化土壤中 Cd^{2+} 的研究[J]. *中南民族大学学报 (自然科学版)*, 2017, 36(1):17-20.
- WANG J Y, YANG Z L, CHEN J L, et al. Isolation of a urease-producing strain and its study on Cd^{2+} in immobilized soil[J]. *Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2017, 36(1):17-20.
- [12] Bhattacharya A, Naik S N, Khare S K. Harnessing the biomineralization ability of urease producing *Serratia marcescens* and *Enterobacter cloacae* EMB19 for remediation of heavy metal cadmium (II)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 215:143-152.
- [13] 李哲, 吴迪, 张秀芳, 等. 一株氧化木糖无色杆菌对 Cd 的固定作用[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2018, 46(9):97-104.
- LI Z, WU D, ZHANG X F, et al. Immobilization of Cd by a chlorobacterium xylose oxide[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(9):97-104.
- [14] 王敏, 赵兴青, 汤鼎, 等. 混合菌株诱导碳酸钙沉淀修复 Cd 污染水[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(7):1541-1549.
- WANG M, ZHAO X Q, TANG D, et al. Mixed strains induce calcium carbonate precipitation to remediate Cd-contaminated

- water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(7):1541-1549.
- [15] Macaskie L E, Empson R M, Cheetham A K, et al. Uranium bioaccumulation by a *Citrobacter* sp. as a result of enzymically mediated growth of polycrystalline HUO_2PO_4 [J]. *Science*, 1992, 257(5071):782-784.
- [16] ZENG G Q, QIAO S Y, WANG X T, et al. Immobilization of cadmium by *Burkholderia* sp. QY14 through modified microbially induced phosphate precipitation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021: 125156.
- [17] QIAN C X, ZHAN Q W. Bioremediation of heavy metal Ions by phosphate-mineralization bacteria and its mechanism[J]. *Journal- Chinese Chemical Society Taipei*, 2016.
- [18] Volesky B, May-Phillips H A. Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, 42(5):797-806.
- [19] Hryniewicz K, Złoch M, Kowalkowski T, et al. Strain-specific bioaccumulation and intracellular distribution of Cd^{2+} in bacteria isolated from the rhizosphere, ectomycorrhizae, and fruitbodies of ectomycorrhizal fungi[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(4):3055-3067.
- [20] Michel L J, Macaskie L E, Dean A C. Cadmium accumulation by immobilized cells of a *Citrobacter* sp. using various phosphate donors[J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 2010, 28(9):1358-1365.
- [21] 赵雨涵. 水稻土铁锰氧化菌的筛选及其产物对镉的吸附效应[D]. 扬州: 扬州大学.
- ZHAO Y H. Screening of iron and manganese oxidizing bacteria in paddy soil and their adsorption effect on cadmium[D]. Yangzhou: Yangzhou University.
- [22] DONG M F, FENG R W, WANG R G, et al. Inoculation of Fe/Mn-oxidizing bacteria enhances Fe/Mn plaque formation and reduces Cd and As accumulation in Rice Plant tissues[J]. *Plant & Soil*, 2016, 404(1-2):75-83.
- [23] WEI T, LIU X, DONG M F, et al. Rhizosphere iron and manganese-oxidizing bacteria stimulate root iron plaque formation and regulate Cd uptake of rice plants (*Oryza sativa* L.) - ScienceDirect[J]. *Journal of Environmental Management*, 278.
- [24] 叶文玲, 周于杰, 晏士玮, 等. 微生物成矿技术在环境重金属污染治理中的应用研究进展[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4):1-15.
- YE W L, ZHOU Y J, YAN S W, et al. Research progress of application of microbial mineralization technology in environmental arsenic pollution control[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4):1-15.
- [25] 杨子陆. 产脲酶菌株的筛选鉴定及其在 Cd 污染治理中的应用[D]. 武汉: 武汉理工大学.
- YANG Z L. Screening and identification of urease-producing strains, and that's application in Cd pollution control[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology.
- [26] LIU W, ZHANG J S, JIN Y J, et al. Adsorption of Pb(II) , Cd(II) and Zn(II) by extracellular polymeric substances extracted from aerobic granular sludge: Efficiency of protein[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, 3:1223-1232.
- [27] 邵鑫, 孙凯, 熊婧, 等. 耐镉乳酸菌对重金属镉的吸附机制[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(3):48-53.
- SHAO X, SUN K, XIONG J, et al. Adsorption mechanism of heavy metal cadmium by cadmium-tolerant lactic acid bacteria[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(3):48-53.
- [28] HUANG F, GUO C L, LU G N, et al. Bioaccumulation characterization of cadmium by growing *Bacillus cereus* RC-1 and its mechanism[J]. *Chemosphere*, 2014, 109:134-142.
- [29] SHENG Y, WANG Y, YANG X, et al. Cadmium tolerant characteristic of a newly isolated *Lactococcus Lactis* Subsp. *Lactis*[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2016, 48: 183-190.
- [30] Arivalagan P, Singaraj D, Haridass V. Removal of cadmium from aqueous solution by batch studies using *Bacillus cereus*[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71:728-735.
- [31] 苗慧慧, 祁诗月, 陈吉, 等. 硫酸盐还原菌在酸性矿山废水处理中的应用[J]. *应用化工*, 2021, 50(11):6.
- MIAO Y H, QI S Y, CHEN J, et al. Application of sulfate reducing bacteria in acid mine wastewater treatment[J]. *Applied Chemical*, 2021, 50(11):6.
- [32] 徐曼. 硫酸盐还原菌在酸性矿山废水处理技术中的应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2015.
- XU M. Application of sulfate reducing bacteria in acid mine wastewater treatment[D]. Hohhot: Mongolian University, 2015.
- [33] 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: 自然科学版*, 2013.
- HUANG Z, XU J P, MA C Y, et al. Treatment of heavy metal ions by sulfate-reducing bacteria[J]. *Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science Edition*, 2013.
- [34] 贾莹莹, 范文宏, 姜维. 硫酸盐和细菌量对硫酸盐还原菌修复 Cd 污染土壤的影响[C]. 2011 年环境污染与大众健康学术会议. 2011.
- JIA Y Y, FAN W H, JIANG W. Effects of sulfate and bacterial mass on remediation of Cd-contaminated soil by sulfate-reducing bacteria [C]. 2011 Academic Conference on Environmental Pollution and Public Health. 2011.
- [35] 李哲. 碳酸盐矿化菌的分离鉴定及对重金属的固定作用[D]. 吉林: 吉林农业大学.
- LI Z. Isolation and identification of carbonate mineralizing bacteria and their immobilization on heavy metals [D]. Jilin: Jilin Agricultural University.
- [36] 董彩环. 基于 MICP 技术典型矿区重金属污染土固化/稳定化的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- DONG C H. Experimental study on solidification/stabilization of heavy metal contaminated soil in typical mining areas based on MICP technology [D]. Hohhot: Mongolia Industrial University, 2021.
- [37] Zhao X Q, Wang M, Wang H, et al. Study on the remediation of Cd pollution by the biomineralization of urease-producing bacteria[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(2).

Optimization of the Mathematical Model of Cyclone Separation Performance Based on Response Surface Analysis

CONG Longfei^{1,2}, WANG Shengyu¹, LUO Jiajing¹, ZHOU Changchun²

(1. Weihai Shangpin Mechanical Equipment Technology Co., Ltd., Weihai 264400, Shandong, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. With the increasing application of cyclone in the field of mineral processing, the influence of its operating factors on the separation performance has been paid more and more attention in the production process. At present, various researches on the separation performance of cyclone have been widely reported, but they are generally limited to the structural factors of cyclone, and do not consider the effects of operational factors (inlet pressure P , dispersion concentration C_i) and the interaction between factors on the separation performance. In order to explore the influence of cyclone operating factors on separation performance, response surface analysis was applied to design experiments to optimize the mathematical models of cyclone main diameter D_c and operating factors on cyclone classification efficiency E_f and classifier size D_m , and explore the interaction between them, which can achieve the best separation performance regulation of cyclone. Through the analysis of 17 groups of test results by design expert, the following results are obtained: classification efficiency fitting formula-andgrading granularity fitting formula. The 3D surface response analysis shows that the main diameter, inlet pressure and inlet concentration have a significant effect on the classification efficiency and particle size of $D_c > C_i > P$, and for the classification efficiency and particle size, the interaction between D_c and C_i and between D_c and P is relatively strong, while the interaction between C_i and P is weak.

Keywords: Mining engineering; Response surface analysis; Cyclone; Operational factors; Classification performance; Mathematical model

(上接第 93 页)

Research Progress of Different Types of Microorganisms Passivation and Fixation of Cadmium Contamination

CHEN Ruihong, QIN Yongli, LAI Feng, JIANG Yongrong

(School of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: This is an article in the field of ecological restoration of mines. In recent years, the microbial passivation and fixation has gradually become a hotspot in the field of heavy metal contamination control. Here is a review to summarize the mechanism of microbial passivation and fixation of cadmium based on the passivation and immobilization of typical strains and heavy metal cadmium: (1) Microbial cell walls and extracellular polymers (EPS) have abundant groups, such as carboxyl, hydroxyl, etc., which can effectively adsorb Cd^{2+} , and passivated into crystalline minerals. (2) Sulfate-reducing bacteria, phosphate-dissolving bacteria, urease-producing bacteria in the environment can generate metal precipitates through their own metabolism, and then form crystal minerals through changes in the microenvironment. Fe/Mn oxidizing microorganisms indirectly adsorb heavy metal ions through their own metabolites. To study the reaction mechanism of microbial passivation and immobilization of cadmium and the formation of microenvironment conditions of cadmium-containing crystal minerals, which is of great significance for the remediation of cadmium pollution.

Keywords: Ecological restoration of mines; Microorganism; Cadmium pollution; Passivation fixation; Mechanism