

锰氧化菌筛选、特性分析及在环境修复领域的应用

刘梦凡, 王华伟*

青岛理工大学, 环境与市政工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2022年5月9日; 录用日期: 2022年6月21日; 发布日期: 2022年6月30日

摘要

近年来,越来越多的学者发现锰氧化菌在环境修复领域具有较大的应用潜力。锰氧化菌是一类能够将Mn(II)氧化成Mn(III/IV)等难溶性生物氧化锰的微生物,而生物氧化锰的特殊结构决定了其在环境修复中的重要作用。不同锰氧化菌的生存条件和性能均不相同,对污染物的固定效率和降解能力也不相同,因此,研究锰氧化菌及其诱导生物氧化锰的矿物特征对重金属和有机污染环境修复具有重要的科学意义。本研究介绍了锰氧化菌的筛选、特性分析及在环境修复领域的应用,并展望了锰氧化菌在环境修复领域的应用前景和面临的挑战,为后续其在环境修复领域的应用提供参考。

关键词

锰氧化菌, 矿物特征, 生物锰氧化物, 环境修复

Screening and Characterization of Manganese(II)-Oxidizing Bacteria, and Its Application in Environmental Remediation

Mengfan Liu, Huawei Wang*

School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

Received: May 9th, 2022; accepted: Jun. 21st, 2022; published: Jun. 30th, 2022

Abstract

In recent years, more and more scholars have discovered the potential application of Mn(II)-oxidizing
*通讯作者。

bacteria in the field of environmental remediation. Manganese-oxidizing bacteria are a class of microorganisms that can oxidize Mn(II) into insoluble biogenic Mn(III/IV) oxides. The special structure of biogenic Mn oxides determines its important role in environmental remediation. Different Mn(II) oxidizing bacteria have different living conditions and performances, and their immobilization efficiency and degrading ability to pollutants are also different. Therefore, it is important to study the mineral characteristics of Mn(II)-oxidizing bacteria and their induced biogenic Mn oxidation for the remediation of heavy metals and organics pollution. In this study, the screening, characteristic analysis and application of Mn(II)-oxidizing bacteria in the field of environmental remediation were introduced. Finally, the application prospects and challenges of Mn(II)-oxidizing bacteria in the field of environmental remediation were prospected, providing a reference for subsequent applications in the field of environmental remediation.

Keywords

Manganese(II)-Oxidizing Bacteria, Mineral Characteristics, Biogenic Mn Oxides, Environmental Remediation

Copyright © 2022 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

随着我国经济及工业的快速发展, 重金属元素发挥了重要的作用, 同时伴随着资源的利用, 大量重金属元素渗入地下, 严重污染了人居环境。锰是地球上含量丰富的元素之一, 大量地分布于水体、土壤及海洋中。锰氧化物(III/IV)由于其特殊的结构性质, 能够吸附大量的重金属离子, 且锰氧化物是已知的土壤中氧化还原电位最高的天然矿物($E_0(\text{MnO}_2/\text{Mn}^{2+}) = 1.22 \text{ V}$), 能够氧化多种金属及有机物[1]。因此, 现阶段锰氧化物在环境修复领域的应用具有重大科学意义。

锰氧化菌是一类能够将 Mn(II)氧化成锰氧化物的一类微生物, 其诱导产生的锰氧化物, 即生物氧化锰(Biogenic Mn oxides, BMO)具有特殊的空穴结构, 对多种污染物具有良好的吸附固定和降解能力[2]。不仅能够去除水中的 Mn(II), 而且能够有效去除重金属离子, 在水体净化与土壤修复等环境修复方面具有重要意义[3]。锰氧化菌因为其巨大的应用潜力而被人们所重视, 为解决重金属和有机污染问题提供了良好的思路, 但大规模应用还需要更多深入研究, 尤其是锰氧化菌的氧化机制及其对环境的适应能力。基于大量学者的研究, 本研究系统地综述了锰氧化菌的筛选、诱导矿物特征以及在环境修复领域的应用。

2. 锰氧化菌的筛选

锰氧化菌的筛选媒介一般为锰含量丰富的土壤、锰矿样品或生物除锰滤池。常用的富集培养基主要有 PYG 培养基、PYCM 培养基、LB 培养基等, 培养基的 pH 均在 7.0 左右, 各培养基的组成成分有区别: 如 PYG 培养基的成分包含蛋白胨、葡萄糖、酵母浸膏这些细菌生长所需的有机物质, 还包含所需的无机物质如 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [4]; 而 PYCM 培养基(每升)包含 0.8 g 蛋白胨、0.2 g 酵母粉, 无机物质包括 0.1 g K_2HPO_4 , 0.2 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, 0.2 g NaNO_3 , 0.1 g CaCl_2 , 0.1 g $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, 1.0 g 柠檬酸铁铵[5]; LB 培养基(每升)配方为[6]: 酵母膏 10 g, 蛋白胨 5 g, 氯化钠 10 g。为了筛选出能够氧化锰的菌种, 需要在培养基中加入锰离子, 为防止 MnCl_2 在高温灭菌时被氧化, 待已灭菌的无锰培养基冷却至室温后, 再将 MnCl_2 和 HEPES (4-羟乙基哌嗪乙磺酸)缓冲液通过 0.22 μm 微孔膜过滤加入。高浓度的 Mn(II)

能够抑制一些细菌的生长, 因此培养基中对 Mn(II)具有较高耐受性的细菌得以富集, 因而不同 Mn(II)浓度培养基里的微生物群落结构不同[7]。

3. 锰氧化菌的鉴定

锰氧化能力的判断是锰氧化菌鉴定的关键, 主要包括传统的观察法和指示剂法。观察法是利用锰氧化物的颜色鉴别锰氧化菌, 但是这种宏观的观察法存在一定的偏差, 不能确定产生的有色物质是否为锰氧化物。目前常用的指示剂法更为高效, 在多种指示剂法中, Leukoberbelin blue (LBB)试剂能够与锰氧化物发生反应形成 LBB-Mn(III)蓝色络合物, 并且有明显的颜色变化[8], 而且能够排除多种因素的干扰, 是目前较为常用的鉴定方法。另外, 也可通过扫描电镜或透射电镜等观察细菌胞外生物氧化锰的存在状态, 用于辅助判断生物氧化锰的产物特征[9]。

菌种的谱系鉴定通常采用 16S rDNA 序列比对法, 即以菌株的基因组 DNA 作为 PCR 反应的模板, 利用 16S rDNA 的通用引物 27 F 和 1492 R 进行 PCR 片段基因扩增, 将 PCR 产物的 16S rDNA 基因序列在 GenBank 进行 BLAST 同源对比, 结合菌体形态特征和生理生化特征确定该菌种的物种分类学信息。

4. 锰氧化菌的分类

近年来国内外学者对锰氧化菌的特性及其锰氧化机制开展了大量研究。现阶段已经发现的锰氧化菌包括细菌和真菌, 包括异养型锰氧化菌和自养型锰氧化菌。研究较为深入的锰氧化菌属包括: 生盘纤发菌属(*Leptothrix discophora*)包含 SS-1 等, 如张文强等[10]研究证实了生盘纤发菌不仅可以实现锰铁氧化物在胞外菌鞘的沉积, 而且可以控制产物中锰、铁的比例, 实现可控锰铁含量的复合氧化物的生物制造; 节杆菌属(*Arthrobacter*)包含 HW-16 等, 如万文结等[7]实验发现不同 Mn(II)浓度下微生物群落结构不同, 在 PYCM-2000 和 3000 培养基中优势属均为节杆菌属, 该菌主要通过产生锰氧化活性因子和释放碱性产物提高体系 pH 这两种方式来催化氧化 Mn(II); 芽孢杆菌属(*Bacillus*)包含 SG-1、MB-1、CP133 等, 如刘颜军等[11]实验探究了锰氧化菌 MK3-1 的锰氧化特性, 发现产生的锰氧化物均匀地分布在细菌的表面且含量较高, 推测该菌锰氧化物的产生和运输机理很可能与已报道的不同; 假单胞菌属(*Pseudomonas*)包含 MnB1、GB-1 和 QJX-1 等, 如 Caspi 等[12]研究表明, *P. putida* MnB1 的锰氧化功能基因主要为 *ccmE*、*ccmF*、*ccmA* 等; 周娜娜等[4]的实验提取出来的 *Pseudomonas* sp. QJX-1 含有锰氧化的必需成分多铜氧化酶基因 *CumA*, 而且发现在贫营养条件下能更好地进行锰氧化, 地下水处理过程中生物锰氧化速率较快, 具有水处理的潜力; 氨基杆菌属(*Aminobacter*)包含 H1 等, 如 H1 主要是通过产生锰氧化活性因子和碱性代谢产物提高 pH 两个因素共同作用, 通过吸附大量去除培养基中的锰, 然后将吸附的锰氧化成生物氧化锰或作为自身生长所需要的营养元素[5]。随着对于锰氧化菌研究的深入, 新型的锰氧化菌在实验过程中不断被发现, 未来一定会对锰氧化菌有更加明晰的分类和研究。

5. 锰氧化菌诱导生物氧化锰的形成机制和特性分析

目前细菌的锰氧化机制研究表明细菌可以通过分泌某种物质直接催化或者通过改变周围环境因子间接催化氧化锰。许多学者用分子生物学方法对锰氧化菌进行了研究, 发现许多基因参与锰氧化过程中比如 *MofA*、*CumA* 和 *MnxG* 等[13], 但近来研究发现, 锰氧化菌的差异其诱导生物氧化锰的机制也有所不同。Tebo 等[14]综述了 *P. putida* MnB1、*P. putida* GB-1 及 *Bacillus* sp. SG-1 等锰氧化菌基因种类, 菌株不同时其功能基因不同。锰氧化菌对 Mn(II)的氧化主要为单电子转移, 而不是双电子转移(Mn(II)至 Mn(IV)), 即 Mn(II)先转化为 Mn(III), 然后 Mn(III)再转化为 Mn(IV)。晏平等[5]以 *Aminobacter* 为实验菌株, 研究了生物氧化锰的形成机制, 其实验过程中可以捕捉到 Mn(III)中间体, 所以可以推测, 细菌氧化 Mn(II)的过程可能是先氧化成 Mn(III)然后再向高价态氧化, 也有可能是先氧化成 Mn(III)然后通过歧化反应生成

Mn(II)和高价态的锰。另外,也有研究认为,胞外在超氧自由基在 Mn(II)氧化过程中起到重要作用。例如, Learman 等[15]以 *Roseobacter* sp. AzwK 为实验菌株,证实超氧自由基能够直接氧化 Mn(II)为 Mn(III),其中超氧自由基的产生速率为 1.0 $\mu\text{M}/\text{min}$ 。

生物锰氧化物因为其特殊的结构及性质呈现出不同的矿物特征,常用 X-射线衍射(X-ray diffraction, XRD)技术分析物质形态及组成。与化学成因的锰氧化物相比,生物氧化锰具有更差的晶型,新生成的生物氧化锰具有较多的 Mn(IV)空缺,正是由于这种特殊结构使其作为吸附剂能够吸附多种重金属污染物[16]。Tebo 等[17]研究认为,初期形成的生物氧化锰主要以 $\delta\text{-MnO}_2$ 为主,矿物结构以 MnO_6 八面体为基本单元,含有大量氧空穴,比较面积大,带有负电,当 Mn^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 等金属离子注入时,会改变生物锰氧化物的矿物结构,影响其活性。Lefkowitz 等[18]研究发现, Ni^{2+} 主要吸附于 $\delta\text{-MnO}_2$ 的层状空隙点位。基于这种结构,孟佑婷[19]使用具有多级孔隙结构的丝瓜络固定氧化锰,制成植物-微生物复合吸附剂 LIBMOs,并通过实验证明该复合吸附剂具有较强的吸附潜力,提供了污染修复的新思路。

6. 锰氧化菌在环境修复领域的应用

6.1. 吸附固定重金属

生物氧化锰对重金属离子的吸附作用可以有效去除环境中的重金属离子。部分生物氧化锰能够发生结构变化使重金属离子更容易进入结构的空穴,从而增大了吸附效率。生物氧化锰对于常见重金属,如 Cu 等具有较好的吸附容量[20],在较短时间内可以达到平衡,具有良好的实用价值。近来,从陆地土壤铁锰结核及其邻近土壤中分离筛选得到高锰氧化活性的细菌菌株,应用这些菌株合成的生物氧化锰对重金属 Cu、Zn、Cd、As 的吸附能力远大于化学合成锰氧化物的吸附能力[21]。Bai 等[22]以 *Pseudomonas* sp. QJX-1 为实验菌株,其构建的生物反应器对水中 As 具有良好的吸附固定作用。宋宜等[23]研究发现,生物氧化锰对三价砷具有较强的亲和能力,能够快速氧化和固定土壤中的三价砷,将三价砷转化成为不活泼的五价砷,从而降低砷的毒害程度。添加三价铁能够促进土壤中砷由可交换态、专属吸附态向无定型铁锰结合态和结晶型铁锰结合态转变,环境风险由中风险转变为低风险,土壤中砷的化学稳定化增强,其水解过程中产生的水铁矿和四方纤铁矿等次生铁氧化物能够有效吸附固定土壤中的砷,进而显著提高砷的稳定化效率。Wang 等[24]以 *P. putida* MnB1 为供试菌株,其诱导生物锰氧化锰对土壤中砷具有良好的修复效果。此外,相关研究表明,中等风险砷污染原土经生物氧化锰处理后风险指数(RAC)值降至 11.46%,接近低风险[25]。可见,生物氧化锰是一种可用于砷污染土壤修复的环境友好型生物材料。

6.2. 降解有机污染物

生物氧化锰广泛参与到地球生物化学循环中,在多种有机物的降解中发挥着重要作用,对新兴污染物的治理有潜在的应用。目前受关注较多且潜在风险较大的新污染物,包括内分泌干扰物(EDCs)、个人护理产品(PPCPs)、抗生素、雌激素等,如邻苯二甲酸酯类、抗生素类、双酚化合物、植物雌激素等,尽管它们在环境中浓度极小,但是一旦进入人体和动物体内,便可以与特定的激素受体结合,进而诱导产生雌激素,或者进一步与生物体 DNA 特定的片段结合,使 DNA 序列或构象发生变化,干扰内分泌系统的正常功能[26]。

研究表明,生物氧化锰能够有效降解环境中有机污染物。*P. putida* QYS-1 产生的生物锰氧化物能在较短的反应时间下使得绝大部分刚果红和部分甲基橙分子结构被破坏,在偶氮染料废水的脱色方面发挥着作用,但是随着循环利用次数的增加,其自身活性及对偶氮染料的脱色作用显著降低[27]。Li 等[28]研究了 *Pseudomonas* sp. F2 对氧氟沙星的降解效率,其发现该菌株对 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 氧氟沙星的去除率为 100%。Shobnam 等[29]研究了锰氧化菌对双酚 A 的去除机制,其发现生物氧化锰对双酚 A 的降解起主要作用。

翟俊等[30]通过研究自养型锰氧化菌及生物氧化锰对双氯芬酸的降解,证明锰氧化菌经过适当的开发可成为一种新的低成本、低环境风险的去环境中双氯芬酸等新兴污染物的材料。生物氧化锰对环境中 17 β -雌二醇(E2)的氧化降解具有正向的作用[31]。实验证明少量氧四环素能够促进细菌多铜氧化酶基因 *cumA* 的表达,提高了生物氧化锰的生成速率,增强对氧四环素的去除效果[32]。翟俊等[33]研究生物氧化锰对乙炔基雌二醇(EE2)的去除作用,pH 值为 4.0、生物氧化锰投加量为 20 mg/L 时,EE2 的去除率可达 97.7%,其中生物氧化锰的贡献率达到 76.9%。

7. 未来与展望

(一) 锰氧化菌种类丰富,且分布广泛,但是目前对于锰氧化菌的研究还不成体系,对于菌株的种类研究的较少,未来有望形成具有完整分类的锰氧化菌体系。

(二) 细菌参与的锰氧化生理生态机制方面还未探究清楚,仍需进行大量的实验探究过程中的相互作用关系。另外,锰氧化菌对新兴有机污染物的降解有待深入研究。

(三) 锰氧化菌用于实际污染环境修复仍需要大量实验研究,如何原位修复重金属和有机污染土壤环境,如何让生物氧化锰在最佳条件下适应环境存活并修复污染,是未来需要研究并有望实现的。

基金项目

国家自然科学基金(41907111)和青岛理工大学大学生科技创新项目(KJCXXM093)。

参考文献

- [1] 李颖,顾雪元. 土壤中锰氧化物的形态及其化学提取方法综述[J]. 环境化学, 2022, 41(1): 9-21.
- [2] Zhou, H. and Fu, C. (2020) Manganese-Oxidizing Microbes and Biogenic Manganese Oxides: Characterization, Mn(II) Oxidation Mechanism and Environmental Relevance. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **19**, 489-507. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09541-1>
- [3] Han, L., Li, J., Xue, Q., Chen, Z., Zhou, Y. and Poon, C.S. (2020) Bacterial-Induced Mineralization (BIM) for Soil Solidification and Heavy Metal Stabilization: A Critical Review. *Science of the Total Environment*, **746**, Article ID: 140967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140967>
- [4] 周娜娜, 柏耀辉, 梁金松, 罗金明, 刘锐平, 胡承志, 等. *Pseudomonas* sp. QJX-1 的锰氧化特性研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 740-745.
- [5] 宴平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋轶锋. 锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1428-1436.
- [6] 郑洁, 孟佑婷, 方瑶瑶, 杨素玲, 王平. 一株锰氧化细菌的分离、鉴定及其锰氧化特性[J]. 微生物学报, 2016, 56(11): 1699-1708.
- [7] 万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰. 锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 2036-2043.
- [8] 井晓欢, 杨季芳, 陈吉刚. 锰氧化细菌研究进展[J]. 浙江万里学院学报, 2015, 28(6): 61-68.
- [9] Learman, D.R., Wankel, S.D., Webb, S.M., Martinez, N., Madden, A.S. and Hansel, C.M. (2011) Coupled Biotic-Abiotic Mn(II) Oxidation Pathway Mediates the Formation and Structural Evolution of Biogenic Mn Oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **75**, 6048-6063. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.07.026>
- [10] 张文强, 蔡军, 张德远. 基于铁细菌的铁氧体制备及其性能[J]. 科学通报, 2013, 58(4): 392-396. <https://doi.org/10.1360/CSB2013-58-4-392>
- [11] 刘颜军, 周静晓, 王革娇. 锰氧化菌 *Bacillus* sp. MK3-1 的 Mn(II)氧化特性和除锰能力研究[J]. 微生物学通报, 2009, 36(4): 473-478.
- [12] Caspi, R., Tebo, B.M. and Haygood, M.G. (1998) *c*-Type Cytochromes and Manganese Oxidation in *Pseudomonas putida* MnB1. *Applied & Environmental Microbiology*, **64**, 3549-3555. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.10.3549-3555.1998>
- [13] 孟佑婷, 郑袁明, 张丽梅, 贺纪正. 环境中生物氧化锰的形成机制及其与重金属离子的相互作用[J]. 环境科学,

- 2009, 30(2): 574-582.
- [14] Tebo, B.M., Johnson, H.A., Mccarthy, J.K. and Templeton, A.S. (2005) Geomicrobiology of Manganese(II) Oxidation. *Trends in Microbiology*, **13**, 421-428. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2005.07.009>
- [15] Learman, D.R., Voelker, B.M., Vazquez-Rodriguez, A.I. and Hansel, C.M. (2011) Formation of Manganese Oxides by Bacterially Generated Superoxide. *Nature Geoscience*, **4**, 95-98. <https://doi.org/10.1038/ngeo1055>
- [16] 李斐, 吴超, 张弛, 冯一舰, 钟重. 锰氧化微生物及其在土壤环境中的作用[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(10): 1298-1304.
- [17] Tebo, B.M., Bargar, J.R., Clement, B.G., Dick, G.J., Murray, K.J., Parker, D., *et al.* (2004) Biogenic Manganese Oxides: Properties and Mechanisms of Formation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **32**, 287-328. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120213>
- [18] Lefkowitz, J.P. and Elzinga, E.J. (2017) Structural Alteration of Hexagonal Birnessite by Aqueous Mn(II): Impacts on Ni(II) Sorption. *Chemical Geology*, **466**, 524-532. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.07.002>
- [19] 孟佑婷. 丝瓜络固定生物氧化锰吸附重金属离子[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 859-865.
- [20] 易春龙, 叶欣, 李泰来, 肖乃东. 生物锰氧化物对 4 种重金属的吸附特性研究[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(3): 94-98.
- [21] 金圣圣, 贺纪正, 郑袁明, 孟佑婷, 张丽梅. 生物锰氧化矿物对几种重金属的吸附作用[J]. 环境科学学报, 2009, 29(1): 132-139.
- [22] Bai, Y., Yang, T., Liang, J. and Qu, J. (2016) The Role of Biogenic Fe-Mn Oxides Formed *in Situ* for Arsenic Oxidation and Adsorption in Aquatic Ecosystems. *Water Research*, **98**, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.068>
- [23] 宋宜, 王华伟, 吴雅静, 孙英杰, 吕紫娟, 王亚楠, 等. 三价铁促进生物氧化锰稳定土壤砷的效果和机制[J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1460-1466.
- [24] Wang, Y.N., Tsang, Y., Wang, H.W., Sun, Y.J., Song, Y., Pan, X.L., *et al.* (200) Effective Stabilization of Arsenic in Contaminated Soils with Biogenic Manganese Oxide (BMO) Materials. *Environmental Pollution*, **258**, Article ID: 113481. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113481>
- [25] 王华伟, 吴雅静, 徐榕, 孙英杰, 李书鹏, 王亚楠, 等. 生物合成 Bio-MnO_x 对砷污染土壤的稳定化效果分析[J]. 环境工程, 2021, 39(9): 205-210+216.
- [26] 黄俊. 哪些物质属于内分泌干扰物(EDCs) [J]. 安全与环境工程, 2004, 11(3): 7-10.
- [27] 胡杰, 吴伟彤, 陆黎涛, 周博, 张煜琳, 秦松岩. 生物锰氧化物对偶氮染料的脱色作用[J]. 天津理工大学学报, 2018, 34(4): 54-57+64.
- [28] Li, K., Xu, A., Wu, D., Zhao, S., Meng, T. and Zhang, Y. (2021) Degradation of Ofloxacin by a Manganese-Oxidizing Bacterium *Pseudomonas* sp. f2 and Its Biogenic Manganese Oxides. *Bioresource Technology*, **328**, Article ID: 124826. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124826>
- [29] Shobnam, N., Sun, Y., Mahmood, M., Löffler, F.E. and Im, J. (2021) Biologically Mediated Abiotic Degradation (BMAD) of Bisphenol a by Manganese-Oxidizing Bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, **417**, Article ID: 125987. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125987>
- [30] 翟俊, 田雨, 陈佳, 张琨. 自养型锰氧化菌富集及生物氧化锰降解双氯芬酸研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(7): 11-15.
- [31] 张璐, 姜理英, 陈建孟, 何智敏. 生物氧化锰对水体中 17β-雌二醇的氧化降解[J]. 水处理技术, .2012, 38(10): 57-61+74.
- [32] 张星星, 李司令, 齐维晓, 柏耀辉, 周丹丹, 刘会娟. 锰氧化菌 *Pseudomonas* sp. QJX-1 对氧四环素的去除作用与机制[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4494-4500.
- [33] 翟俊, 夏亦寒, 成水平, 田雨, 王泉峰. 锰氧化菌激活及生物氧化锰去除乙炔基雌二醇试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2021, 43(4): 154-161.