

# 一株土壤锰氧化真菌对 $Mn^{2+}$ 的氧化特性

郑良珣, 张钰, 唐明\*

华南农业大学林学与风景园林学院 广东 广州 510642

**摘要:** 从锰矿区土壤中分离筛选得到 1 株具有锰氧化能力的真菌菌株 ZL8-1。基于形态特征和分子系统学方法, 鉴定该菌株为黄柄曲霉 *Aspergillus flavipes*。经真菌生长速率、耐锰能力和锰去除率测定, 结果表明菌株 *A. flavipes* ZL8-1 生长速率较快, 7 d 在 AY 培养基上菌落直径为 5.44 cm; 能耐受 8 mmol/L  $Mn^{2+}$  浓度, 且在 1–4 mmol/L 受锰浓度影响较小; 在 1 mmol/L  $Mn^{2+}$  浓度下, 22 d 锰去除率达到最大, 为 77.50%。本研究为微生物除锰提供了良好的菌种资源。

**关键词:** 锰氧化真菌; 曲霉; 锰氧化; 锰去除

## [引用本文]

郑良珣, 张钰, 唐明, 2026. 一株土壤锰氧化真菌对  $Mn^{2+}$  的氧化特性. 菌物学报, 45(2): 250146

Zheng LX, Zhang Y, Tang M, 2026.  $Mn^{2+}$  oxidation characteristics of a soil manganese-oxidizing fungus. Mycosystema, 45(2): 250146

## $Mn^{2+}$ oxidation characteristics of a soil manganese-oxidizing fungus

ZHENG Liangxun, ZHANG Yu, TANG Ming\*

College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China

**Abstract:** A manganese-oxidizing fungal strain designated as ZL8-1 was isolated from the soil in a manganese mining area and identified as *Aspergillus flavipes* based on morphological characteristics and molecular phylogenetic method. The strain exhibited rapid growth, reaching colony diameter of 5.44 cm on AY medium in 7 days of incubation. *A. flavipes* ZL8-1 demonstrated strong manganese tolerance, withstanding concentrations up to 8 mmol/L, and showed minimal growth inhibition at 1–4 mmol/L  $Mn^{2+}$ . The highest manganese removal efficiency of 77.50% was achieved at concentration of 1 mmol/L over 22-day period. *A. flavipes* ZL8-1 could be regarded as a promising microbial resource for manganese bioremediation.

**Keywords:** manganese-oxidizing fungus; *Aspergillus*;  $Mn^{2+}$  oxidation;  $Mn^{2+}$  removal

资助项目: 国家自然科学基金(32071639)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (32071639).

\*Corresponding author. E-mail: tangmingyl@163.com

Received: 2025-05-13; Accepted: 2025-05-27

锰是植物和微生物生长发育的一种必需微量元素(胡越等 2019; Alejandro *et al.* 2020), 但过量的锰流入土壤, 不仅会导致植物生长迟缓, 而且造成严重的锰毒害。在亚热带和热带酸性土壤地区, 锰毒害仅次于铝毒害, 是影响植物生长最主要的限制因素(Zhao *et al.* 2017)。锰氧化微生物能够将可溶的 Mn<sup>2+</sup>氧化为不溶的锰氧化物沉淀, 降低锰的毒性(Mandernack *et al.* 1995; Huang *et al.* 2023)。目前, 有关锰氧化微生物的研究多集中在细菌, 包括锰氧化细菌资源(杨伟红等 2012)、锰氧化速率(Emerson *et al.* 1982)、锰氧化细菌的分离鉴定及锰氧化特性(张璐等 2011; 廖凤凤等 2023)、锰氧化细菌在含锰环境中对锰的去除效果(金圣圣等 2009)、细菌之间相互作用对锰氧化的影响(Liang *et al.* 2017)。

相对于锰氧化细菌, 锰氧化真菌的研究较少, 主要涉及锰氧化真菌的筛选和生长特性, 研究的种类主要集中在担子菌门 Basidiomycota 和子囊菌门 Ascomycota, 例如直立枝顶孢 *Acremonium strictum*、伏克盾壳霉 *Coniothyrium fuckelli*、球状茎点霉 *Phoma glomerata*、癣囊腔菌 *Plectosphaerella cucumerina*、黄孢原毛平革菌 *Phanerochaete chrysosporium*、耐盐枝孢 *Cladosporium halotolerans*、红褐肉座菌 *Hypocrea jecorina*、黑曲霉 *Aspergillus niger*、桔青霉 *Penicillium citrinum*、*Neorousoella solani* 等(Glenn *et al.* 1986; Acharya *et al.* 2003; Miyata *et al.* 2004; Takano *et al.* 2006; Mehta *et al.* 2010; Santelli *et al.* 2011; Wang *et al.* 2022; Wei *et al.* 2023)。与锰氧化细菌相比, 锰氧化真菌细胞壁机械强度高, 可以形成菌丝球, 增大自身体积和表面积, 对金属有更强的吸附能力, 可有效去除水体和土壤中的重金属和有毒物质, 在环境修复中具有极大的潜力(Nelson *et al.* 1999; 王鑫浩等 2018; Huang *et al.* 2023)。因此, 筛选和挖掘锰氧化真菌资源对锰氧化真菌的研究和应用具有重要意义。本研究通过分离筛选具有锰氧化能力的真菌, 分析其生长特性和锰去除能力, 为锰氧化真菌在锰污染修复的理论研究和应用技术提供可能的优良菌种资源。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料采集

供试土壤采集自重庆市秀山锰矿区(108°43'6"E-109°18'58"E, 28°9'43"N-28°53'5"N), 位于重庆市东南部, 武陵山脉中段, 四川盆地东南缘外侧, 属亚热带山地气候(李惠敏等 2022)。在采矿区、废弃矿渣区设置 2 个样地(1 m × 1 m), 每个样地设置 3 个采样点, 采集 10–20 cm 土壤样品, 置于密封塑料袋中, 4 °C 保存。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 锰氧化真菌的分离

称取 10.00 g 野外采集的新鲜土样, 装入含有 90 mL 无菌水的三角瓶中, 用玻璃珠打散, 振荡均匀, 用无菌水梯度稀释至 10<sup>-1</sup>、10<sup>-2</sup>、10<sup>-3</sup>、10<sup>-4</sup> 和 10<sup>-5</sup>, 用无菌移液枪从每个梯度分别吸取 150 μL 稀释液均匀涂布在高盐察氏培养基(蔗糖 30 g, NaNO<sub>3</sub> 2 g, KCl 0.5 g, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.5 g, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.01 g, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 1 g, NaCl 60 g, ZnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.2 g, 琼脂 15 g, H<sub>2</sub>O 1L, pH 7.0–7.2) 上, 置于 28 °C 恒温箱避光培养 7 d 至菌落出现, 根据菌落特征挑取不同真菌转接于 PDA 培养基中, 28 °C 恒温箱避光培养 14 d, 长出菌落的直径约为 7.35 cm, 保存备用(张璐等 2011)。

#### 1.2.2 锰氧化真菌的筛选

将以上分离到的真菌分别接种在不含有 Mn<sup>2+</sup> 和含有 Mn<sup>2+</sup> (1 mmol/L) 的 AY 培养基(CH<sub>3</sub>COONa 0.25 g, 酵母粉 0.15 g, MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.2 g, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 10 mg, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 44 mg, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 20 mg, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 13 mg, 琼脂 15 g, H<sub>2</sub>O 1L, pH 7.0–7.2) 上, 在 28 °C 恒温箱避光培养 7 d。通过对比同一真菌在不含有 Mn<sup>2+</sup> 和含有 Mn<sup>2+</sup> 的培养基上生长情况和菌落颜色, 并根据锰发生氧化反应出现褐色菌落的深浅, 初步判断该菌株的锰氧化能力(王文秀等 2015)。

#### 1.2.3 锰氧化真菌的复筛

将上述筛选的真菌菌株接种到 AY 培养基上, 28 °C 恒温箱避光培养 7 d, 用无菌水冲洗平板上的菌丝和孢子, 收集孢子悬液于 2 mL 试管中, 振荡摇匀后, 分别取 150 μL 孢子悬液, 加

入到不含有  $Mn^{2+}$  和含有  $Mn^{2+}$  (1 mmol/L) 的 AY 液体培养基中, 28 °C 恒温箱避光培养 4 d。吸取培养后的菌液到 2 mL 离心管中, 加入白贝林蓝 (Leucoberbelin blue, LBB, 0.04 g 粉末溶解于 0.25 mL 的 45 mmol/L 冰乙酸溶液后定容至 100 mL), 以 1:1 (菌液:LBB) 暗反应 5 min, 观察颜色反应, 进行锰氧化真菌复筛 (Tebo *et al.* 2007)。

#### 1.2.4 锰氧化真菌的鉴定

观察锰氧化真菌纯培养的菌株在固体培养基上生长的形态特征, 包括菌落形态、大小、色泽、表面纹饰、是否有菌丝, 以及表面是否毛状和边缘特征等 (廖凤凤等 2023), 根据《真菌鉴定手册》进行鉴定。将筛选得到的锰氧化真菌在高盐察氏培养基上培养长出菌落, 从菌落边缘刮取约 100 mg 菌丝于 2 mL 离心管中, 再加入液氮, 用玻棒将其研磨成粉末。使用快速真菌基因组 DNA 分离试剂盒 (Omega Bio-Tek, Code No. D3390-1) 提取菌丝 DNA。采用聚合酶链式反应 (polymerase chain reaction, PCR) 扩增。引物为真菌通用引物 ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') 和 ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATG C-3')。PCR 反应体系 (50  $\mu$ L): 2 $\times$ Phanta Max Mix 25  $\mu$ L, ITS1/ITS4 (4  $\mu$ mol/L) 2  $\mu$ L, 酶 1  $\mu$ L, dNTP

mix 1  $\mu$ L, DNA 模板 1  $\mu$ L, ddH<sub>2</sub>O 18  $\mu$ L。扩增程序: 预变性 95 °C 5 min; 95 °C 变性 1 min, 55 °C 退火 1 min, 72 °C 延伸 1 min, 35 个循环; 最后 72 °C 彻底延伸 10 min, 冷却至 10 °C (王文秀等 2015)。PCR 扩增产物经 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测, 确定单一条带后, 将扩增产物送北京擎科生物科技 (广州) 股份有限公司进行测序。测序得到的序列, 使用 Mega11 软件采用 Neighbor-Joining 构建真菌系统发育树 (表 1)。

#### 1.2.5 锰氧化真菌的功能研究

Mn 处理采用  $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ , 配制 5 个浓度 (0、1、2、4 和 8 mmol/L), 各浓度 3 个重复。选取生长旺盛的菌株, 用灭菌牙签在菌落边缘挑取菌丝, 接种在含不同  $Mn^{2+}$  浓度培养基中 (培养皿  $\phi=9$  cm), 28 °C 黑暗倒置培养。14 d 后, 采用十字交叉法测量菌落直径, 每隔 3 d 测定 1 次, 记录其生长速率和生长情况 (廖凤凤等 2023)。

取筛选得到的菌株, 用无菌水冲洗平板上的菌丝和孢子, 收集孢子悬液, 振荡摇匀后, 取 150  $\mu$ L 孢子悬液, 加入到 PDB 培养基中, 于 180 r/min, 28 °C 摇床培养 3 d。10 000 r/min 离心 10 min 收集菌丝球。称取湿重 2 g 的菌丝球加入含有锰的 AY 液体培养基, 以接触时间和锰浓度 (初始锰浓度为 1、2、4 和 8 mmol/L)

表 1 曲霉菌相关系列的系统发育分析

Table 1 Phylogenetic analysis of related series of *Aspergillus* spp.

物种 Species	ITS	BLAST 参数 BLAST parameters					国家 Country	来源文献 References
		分数 Score	E 值 Expect value	一致性 Identities (%)	覆盖度 Coverage (%)	空位 Gaps (%)		
<i>Aspergillus flavipes</i>	ON127870.1	979/530	0.0	100.00	94	0	China	Unpublished
<i>Aspergillus</i> sp.	LT899487.1	944/511	0.0	98.52	94	1	Spain	Unpublished
<i>Aspergillus urmiensis</i>	KP987073.1	942/510	0.0	98.51	95	1	Netherlands	Arzanlou <i>et al.</i> 2016
<i>Aspergillus iizukae</i>	EF669597.1	915/495	0.0	97.42	95	1	USA	Peterson 2008
<i>Aspergillus capensis</i>	KJ775550.1	843/456	0.0	96.52	90	2	Netherlands	Visagie <i>et al.</i> 2014
<i>Aspergillus caelatus</i>	AF004930.1	608/329	$3e^{-177}$	88.01	92	4	USA	Ito <i>et al.</i> 2001
<i>Aspergillus</i> sp.	JF412767.1	593/321	$7e^{-173}$	87.64	92	5	USA	Soares <i>et al.</i> 2017
<i>Aspergillus arachidicola</i>	MF668184.1	593/321	$7e^{-173}$	87.62	92	5	France	Carvajal-Campos <i>et al.</i> 2017
<i>Aspergillus krugeri</i>	MK450655.1	590/319	$1e^{-171}$	87.59	92	5	South Africa	Visagie & Houbraken 2020
<i>Aspergillus glaucus</i>	EF652052.1	460/249	$8e^{-133}$	89.73	64	3	USA	Peterson 2008

为变量开展试验。条件如下：接触时间为 28 d，从第 4 天起，每隔 6 d 取一次上清液，并过 0.22 μm 滤膜，过滤液于 4 °C 保存，待上清液收集完成后采用电感耦合等离子体发射仪 (ICP-OES) 测定。根据测得的初始质量浓度和清液中残余的质量浓度计算 Mn<sup>2+</sup> 的去除率。计算公式如下：

$$\text{去除率} = \frac{C_0 - C_c}{C_0} \times 100\%$$

式中：C<sub>0</sub> 表示溶液的初始质量浓度 (mg/L)；C<sub>c</sub> 表示上清液中残余的质量浓度 (mg/L)。

## 2 结果与分析

### 2.1 锰氧化真菌的分离和筛选

#### 2.1.1 锰氧化真菌初筛

从锰矿区土壤中筛选出 1 株菌株，将其编号为 ZL8-1。菌株在不含有 Mn<sup>2+</sup> 和含有 Mn<sup>2+</sup> (1 mmol/L) 的 AY 培养基上 28 °C 培养 7 d (图 1)，与不含有 Mn<sup>2+</sup> (图 1A) 的菌落相比，含有 Mn<sup>2+</sup> 培养基平板上的菌落背面呈现较为明显的褐色 (图 1B)，说明菌株 ZL8-1 能够耐受锰，可能具有氧化锰的功能。

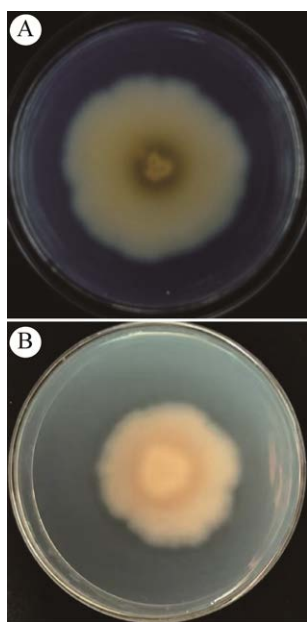


图 1 锰氧化真菌初筛结果  
Fig. 1 Preliminary screening results of fungal strains with manganese oxidation activity. A: 0 mmol/L manganese (Mn<sup>2+</sup>); B: 1 mmol/L manganese (Mn<sup>2+</sup>).

#### 2.1.2 锰氧化真菌复筛

将初筛得到的菌株 ZL8-1 在不含有 Mn<sup>2+</sup> 和含有 Mn<sup>2+</sup> (1 mmol/L) 的 AY 液体培养基中培养 4 d，吸取菌液滴加 0.04% 的 LBB 醋酸溶液，检测发现含有 Mn<sup>2+</sup> (1 mmol/L) 的菌液出现蓝色，而对照 (0 mmol/L) 菌液的溶液无颜色变化 (图 2)，说明菌株 ZL8-1 对锰发生了氧化作用。



图 2 锰氧化产物的 LBB 检测结果  
Fig. 2 LBB analysis of biogenic Mn<sup>2+</sup> oxides.

### 2.2 锰氧化真菌的鉴定

#### 2.2.1 锰氧化真菌形态鉴定

将菌株 ZL8-1 接种于 AY 培养基上，28 °C 培养 7 d 菌落直径为 5.44 cm，且长出了大量致密的气生菌丝。菌落近圆形，正面内部淡黄色，边缘白色，质地丝绒或絮状，有同心轮纹，中间 1/3 略微向上凸起，生长后期有黄色渗出液 (图 3A)；菌落背面内部深棕色，中间淡黄色，边缘白色 (图 3B)。在光学显微镜下观察菌株 ZL8-1 的菌丝有隔，呈现不规则的树枝状，分生孢子梗光滑无隔，梗顶端膨大呈圆形或疏松柱形，分生孢子球形，透明。初步鉴定为黄曲霉属 *Aspergillus* 的真菌 (图 3C, 3D)。

#### 2.2.2 锰氧化真菌分子鉴定

将菌株 ZL8-1 ITS rDNA 基因 PCR 扩增后的产物送至北京擎科生物科技 (广州) 股份有限公司进行 ITS 测序，得到 565 bp 的序列。将获得的序列与 NCBI 数据库进行 BLAST 同源性比对，结果表明 ZL8-1 菌株与黄柄曲霉 *Aspergillus*

*flavipes* 具有最高相似性。3 种相似性最高的真菌 *A. flavipes* (ON127870.1、MT529852.1、ON149699.1), E 值为 0, 相似性范围为 99.63%–100%。菌株 ZL8-1 以 91%的支持率与 *A. flavipes* ON127870.1 聚在同一分支(图 4), 两者亲缘关系相近, 结合形态特征鉴定结果, 将该菌株鉴定为 *A. flavipes* ZL8-1。

### 2.3 锰氧化真菌的功能验证

#### 2.3.1 不同 $Mn^{2+}$ 浓度下锰氧化真菌生长速率

不同  $Mn^{2+}$  浓度对菌株 *A. flavipes* ZL8-1 生长速率的影响见图 5, 该菌株可以耐一定浓度的  $Mn^{2+}$ , 在 1、2、4 mmol/L 锰浓度下生长虽受到锰浓度的抑制, 但细胞仍有活性, 吸附了锰离子的菌丝在固体条件下仍能以相对较快的速度完

成正常的生长发育。但在  $Mn^{2+}$  浓度为 8 mmol/L 时, 菌株 *A. flavipes* ZL8-1 的生长速率明显小于其他 4 组菌株。随着培养时间增加, 锰浓度对菌株 ZL8-1 的抑制效果逐渐减缓, 说明该菌株能耐受 8 mmol/L 的  $Mn^{2+}$  浓度。

#### 2.3.2 不同 $Mn^{2+}$ 浓度下菌株 ZL8-1 对锰去除效果

菌株 ZL8-1 在不同锰浓度下表现出不同的去除效果(图 6)。在 1 mmol/L 和 2 mmol/L 锰浓度下, 菌株 ZL8-1 对锰的去除率呈先增大后减小的趋势, 分别在 22 d 和 16 d 达到最大, 为 77.50%和 47.34%。在 4 mmol/L 和 8 mmol/L 锰浓度下, 菌株 ZL8-1 在培养过程中对锰的去除率随时间变化不显著, 分别为 13.32%–22.60%和 3.61%–10.02%。

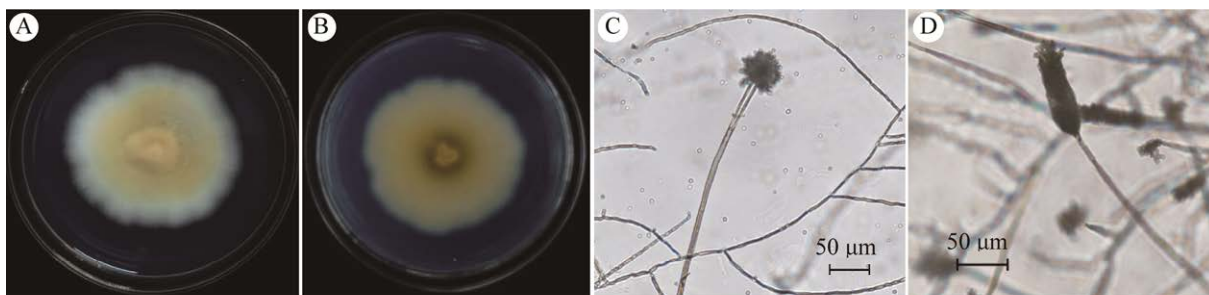


图 3 菌株 ZL8-1 形态学特征 A: 菌落正面; B: 菌落背面; C, D: 菌株的产孢结构

Fig. 3 Morphological characteristics of *Aspergillus flavipes* ZL8-1. A: Colony obverse side; B: Colony reverse side; C, D: Conidiogenous structures of the strain.

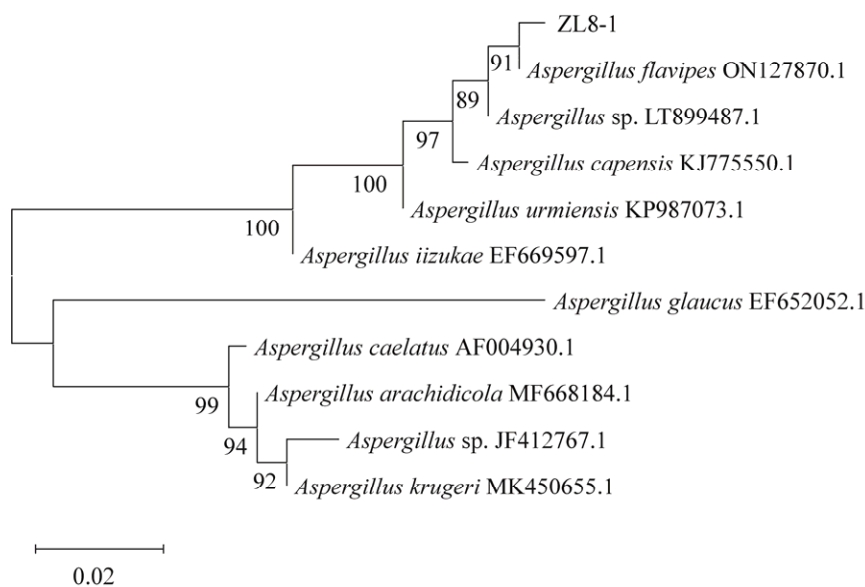


图 4 基于菌株 ZL8-1 的 ITS 序列构建的系统发育树

Fig. 4 Phylogenetic tree constructed based on the ITS sequence of *Aspergillus flavipes* ZL8-1.

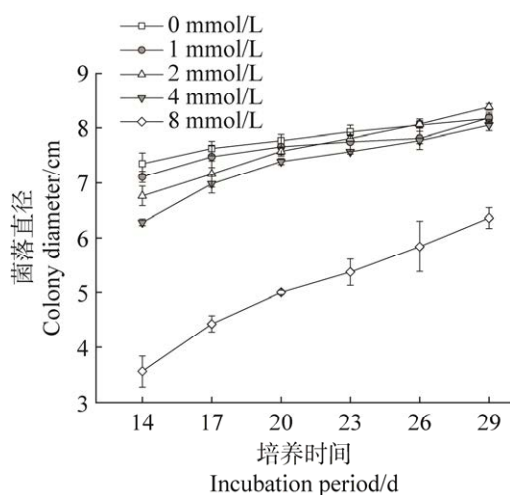


图5 不同锰浓度下菌株 ZL8-1 的生长速率  
Fig. 5 Growth rate of *Aspergillus flavipes* ZL8-1 under different manganese concentrations.

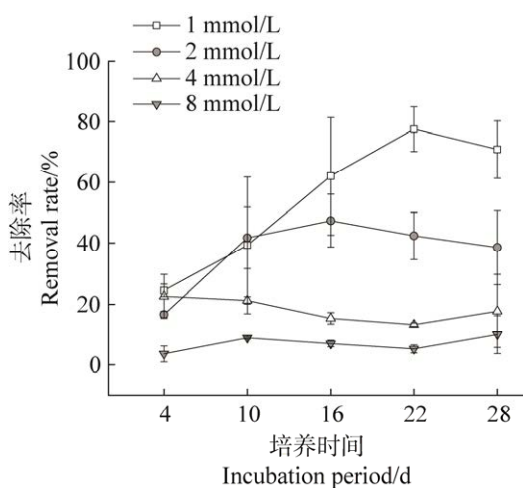


图6 菌株 ZL8-1 对不同锰浓度的去除能力  
Fig. 6 Manganese removal capacity of *Aspergillus flavipes* ZL8-1 under varying manganese concentrations.

### 3 讨论

在逆境条件下,生物的生长状况是反映其抗性的最重要指标(黄志基等 2006)。通过对不同锰浓度下真菌生长速率的测定,筛选耐锰菌株并研究其去除锰能力对降低环境中锰污染具有重要的意义。目前,已筛选出多种耐锰真菌,且具备良好的耐锰和去除锰的能力。梯棱羊肚菌 *Morchella importuna* 对 Mn<sup>2+</sup>浓度具有较强的耐受性,在 100.0 mg/L Mn<sup>2+</sup>浓度时仍是促进生长(张能等 2017)。孙璐等(2013)从含锰土壤中筛选出 4 株耐受 Mn<sup>2+</sup>的真菌,在 15 mmol/L Mn<sup>2+</sup>浓

度时仍能正常生长。王文秀等(2015)从北戴河海洋沉积物筛选到 1 株锰氧化能力较强的菌株 PSA-107h,在 Mn<sup>2+</sup>浓度为 0.5–4.0 mmol/L 范围内,菌落直径受锰浓度影响不大,7 d 对 1 mmol/L Mn<sup>2+</sup>的去除效率可达 88.6%。韦天慧等(2023)发现哈茨木霉 *Trichoderma harzianum*、深绿木霉 *T. atroviride* 和棘孢木霉 *T. asperellum* 对锰耐受浓度分别达到 1 600、1 800 和 2 000 mg/L,在最佳吸附条件下(pH 7,吸附时间 80 h,温度 28 °C),吸附率可达 23.7%。本研究中,锰浓度为 0–4 mmol/L 时,黄柄曲霉 *A. flavipes* ZL8-1 的生长受锰浓度影响不大,且以较快的速度生长,在 1 mmol/L 锰浓度下,对锰的去除在 22 d 达到 77.50%。

锰氧化真菌形成的锰氧化物具有特殊的结构和性质,能够吸附、氧化水体和土壤中的重金属,在锰污染治理中具有应用潜力(Tekerlekopoulou *et al.* 2008; 崔喜晴等 2024),为水体和土壤污染修复提供了新的思路。后续研究可以通过锰氧化真菌与富集植物结合展开,探究一种高效的污染修复体系。

### 4 结论

本研究从锰矿区土壤中分离筛选得到 1 株具有锰氧化能力的菌株黄柄曲霉 *A. flavipes* ZL8-1。该菌株能耐受 8 mmol/L 的 Mn<sup>2+</sup>浓度,在 1 mmol/L 的 Mn<sup>2+</sup>浓度下,锰去除率效果最好,具有潜在的应用价值,有必要进行野外试验研究锰氧化真菌的实际修复效果,为生物修复锰污染技术提供新的菌种资源。

### 作者贡献

郑良珣: 实验、数据分析、论文撰写; 张钰: 实验监督与指导、论文审核与编辑; 唐明: 实验设计、论文审阅修订。

### 利益冲突声明

该研究不存在任何潜在利益冲突的商业或财务关系。

## [REFERENCES]

- Acharya C, Kar RN, Sukla LB, 2003. Studies on reaction mechanism of bioleaching of manganese ore. *Minerals Engineering*, 16(10): 1027-1030
- Alejandro S, Höller S, Meier B, Peiter E, 2020. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. *Frontiers in Plant Science*, 11: 300
- Arzanlou M, Samadi R, Frisvad JC, Houbraken J, Ghosta Y, 2016. Two novel *Aspergillus* species from hypersaline soils of the national park of lake Urmia, Iran. *Mycological Progress*, 15: 1081-1092
- Carvajal-Campos A, Manizan AL, Tadrist S, Akaki DK, Koffi-Nevry R, Moore GG, Fapohunda SO, Bailly S, Montet D, Oswald IP, Lorber S, Brabet C, Puel O, 2017. *Aspergillus korhogoensis*, a novel aflatoxin producing species from the Côte d'Ivoire. *Toxins*, 9(11): 353
- Cui XQ, Wang XQ, Yang ZB, Gao Y, Wang HW, 2024. Classification and mechanism of manganese oxidizing bacteria and research progress in removing organic pollutants. *Advances in Microbiology*, 13(4): 247-259 (in Chinese)
- Emerson S, Kalthorn S, Jacobs L, Tebo BM, Nealson KH, Rosson RA, 1982. Environmental oxidation rate of manganese(II): bacterial catalysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(6): 1073-1079
- Glenn JK, Akileswaran L, Gold MH, 1986. Mn(II) oxidation is the principal function of the extracellular Mn-peroxidase from *Phanerochaete chrysosporium*. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 251(2): 688-696
- Hu Y, An YP, Guo H, Ni ZY, Shen JW, Qi YC, Wen Q, 2019. Effects of manganese ion [Mn(II)] on the lignin-degrading enzymes' activities and primordium formation of *Pleurotus ostreatus*. *Mycosystema*, 38(1): 98-106 (in Chinese)
- Huang YH, Huangfu XL, Ma CX, Liu ZQ, 2023. Sequestration and oxidation of heavy metals mediated by Mn(II) oxidizing microorganisms in the aquatic environment. *Chemosphere*, 329: 138594
- Huang ZJ, Huang Y, Peng B, 2006. Influence of copper, cadmium on growth and cation exchange capacity of two kinds of ectomycorrhizal funguses. *Environmental Science*, 27(8): 1654-1658 (in Chinese)
- Ito Y, Peterson SW, Wicklow DT, Goto T, 2001. *Aspergillus pseudotamarii*, a new aflatoxin producing species in *Aspergillus* section *Flavi*. *Mycological Research*, 105(2): 233-239
- Jin SS, He JZ, Zheng YM, Meng YT, Zhang LM, 2009. Adsorption of heavy metals by biogenic manganese oxides. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(1): 132-139 (in Chinese)
- Li HM, Zhou C, Liang RY, 2022. A risk assessment of soil heavy metal pollution in Xiushan manganese mine-affected area in Chongqing. *China Manganese Industry*, 40(2): 11-14 (in Chinese)
- Liang JS, Bai YH, Men YJ, Qu JH, 2017. Microbe-microbe interactions trigger Mn(II)-oxidizing gene expression. *The ISME Journal*, 11(1): 67-77
- Liao FF, Shan ML, Mou QL, Chen S, Li ZP, Li D, 2023. Isolation, identification, and characterization of an Mn(II) oxidizing bacterium *Pseudomonas aeruginosa* L3. *Microbiology China*, 50(5): 1787-1800 (in Chinese)
- Mandernack KW, Post J, Tebo BM, 1995. Manganese mineral formation by bacterial spores of the marine *Bacillus*, strain SG-1: evidence for the direct oxidation of Mn(II) to Mn(IV). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(21): 4393-4408
- Mehta KD, Das C, Pandey BD, 2010. Leaching of copper, nickel and cobalt from Indian Ocean manganese nodules by *Aspergillus niger*. *Hydrometallurgy*, 105(1-2): 89-95
- Miyata N, Tani Y, Iwahori K, Soma M, 2004. Enzymatic formation of manganese oxides by an *Acremonium*-like hyphomycete fungus, strain KR21-2. *FEMS Microbiology Ecology*, 47(1): 101-109
- Nelson YM, Lion LW, Shuler ML, Ghiorse WC, 1999. Lead binding to metal oxide and organic phases of natural aquatic biofilms. *Limnology and Oceanography*, 44(7): 1715-1729
- Peterson SW, 2008. Phylogenetic analysis of *Aspergillus* species using DNA sequences from four loci. *Mycologia*, 100(2): 205-226
- Santelli CM, Webb SM, Dohnalkova AC, Hansel CM, 2011. Diversity of Mn oxides produced by Mn(II)-oxidizing fungi. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(10): 2762-2776
- Soares C, Rodrigues P, Peterson SW, Lima N, Venancio A, 2017. Three new species of *Aspergillus* section *Flavi* isolated from almonds and maize in Portugal. *Mycologia*, 104(3): 682-697
- Sun L, Zhu T, Song BH, Zhang MH, Yao YF, Li Y, 2013. Studies on Mn(II)-tolerant fungi: their isolation from soil and manganese-oxidizing characteristics. *Environmental Science and Technology*, 36(11): 84-88 (in Chinese)
- Takano K, Itoh Y, Ogino T, Kurosawa K, Sasaki K, 2006. Phylogenetic analysis of manganese-oxidizing fungi isolated from manganese-rich aquatic environments in Hokkaido, Japan. *Limnology*, 7(3): 219-223
- Tebo BM, Clement BG, Dick GJ, 2007. Biotransformations of manganese. In: Hurst CJ, Crawford RL, Garland JL, Lipson DA, Mills AL, Stetzenbach LD (eds.) *Molecular methods in microbial ecology*. 3rd ed. ASM Press,

- Washington, DC. 1223-1238
- Tekerlekopoulou AG, Vasiliadou IA, Vayenas DV, 2008. Biological manganese removal from potable water using trickling filters. *Biochemical Engineering Journal*, 38(3): 292-301
- Visagie CM, Houbraeken J, 2020. Updating the taxonomy of *Aspergillus* in South Africa. *Studies in Mycology*, 95(1): 253-292
- Visagie CM, Houbraeken J, Frisvad JC, Hong SB, Klaassen CHW, Perrone G, Seifert KA, Varga J, Yaguchi T, Samson RA, 2014. Identification and nomenclature of the genus *Penicillium*. *Studies in Mycology*, 78(1): 343-371
- Wang M, Xu ZX, Dong B, Zeng YF, Chen SS, Zhang YH, Huang YR, Pei XJ, 2022. An efficient manganese-oxidizing fungus *Cladosporium halotolerans* strain XM01: Mn(II) oxidization and Cd adsorption behavior. *Chemosphere*, 287: 132026
- Wang WX, Ma JY, Zhu YJ, Cui HP, Wei SP, 2015. Identification of a manganese-oxidizing fungus isolated from marine sediment and its Mn(II) oxidation characteristics. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 21(6): 1032-1036 (in Chinese)
- Wang XH, Fan F, Zhang LH, Qi JY, 2018. Research progress on adsorption of heavy metals by manganese oxides and its influencing factors. *Applied Chemistry Industry*, 47(1): 155-164 (in Chinese)
- Wei SP, Wang WX, Xiao FR, 2023. Biological oxidation of manganese mediated by the fungus *Neorousoella solani* MnF107. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(23): 17093
- Wei TH, Song JZ, Liu SY, Gong DL, Wang Q, Sun Y, 2023. Tolerance of three fungal species to heavy metal manganese and the adsorption of the metal. *Acta Microbiologica Sinica*, 63(3): 1023-1034 (in Chinese)
- Yang WH, Zhang Z, Li L, Zhang ZM, Liu F, 2012. Identification of Mn(II)-oxidizing bacteria and novel genera from stratified Fe-Mn nodule forming soils. *Soils*, 44(4): 606-612 (in Chinese)
- Zhang L, Li TT, Wang F, Xu XP, 2011. Isolation and identification of manganese-oxidizing bacterium and its manganese oxidation characteristics. *Microbiology China*, 38(3): 328-332 (in Chinese)
- Zhang N, Zhao M, Xie JY, Wang Y, Wen XM, He XS, 2017. Tolerance of *Morchella importuna* towards heavy metals. *Mycosystema*, 36(3): 367-375 (in Chinese)
- Zhao J, Wang W, Zhou H, Wang R, Zhang P, Wang H, Pan X, Xu J, 2017. Manganese toxicity inhibited root growth by disrupting auxin biosynthesis and transport in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science*, 8: 272

### [附中文参考文献]

- 崔喜晴, 王雪琴, 杨志博, 高莹, 王华伟, 2024. 锰氧化菌的分类及作用机制和去除有机污染物的研究进展. *微生物前沿*, 13(4): 247-259
- 胡越, 安运平, 郭恒, 尼振原, 申进文, 戚元成, 文晴, 2019. 锰离子 Mn(II)对糙皮侧耳木质素降解酶活性和原基形成的影响. *菌物学报*, 38(1): 98-106
- 黄志基, 黄艺, 彭博, 2006. 铜镉胁迫对 2 种菌根真菌生长和细胞壁离子交换量的影响. *环境科学*, 27(8): 1654-1658
- 金圣圣, 贺纪正, 郑袁明, 孟佑婷, 张丽梅, 2009. 生物氧化锰矿物对几种重金属的吸附作用. *环境科学学报*, 29(1): 132-139
- 李惠敏, 周川, 梁睿雨, 2022. 重庆秀山锰矿影响区土壤重金属污染风险评价. *中国锰业*, 40(2): 11-14
- 廖凤凤, 单美丽, 牟琼丽, 陈莎, 李宗培, 李丁, 2023. Mn(II)氧化细菌 *Pseudomonas aeruginosa* L3 分离、鉴定及氧化特性. *微生物学通报*, 50(5): 1787-1800
- 孙璐, 朱彤, 宋宝华, 张梅华, 姚一夫, 李雨, 2013. 土壤中耐受 Mn(II)真菌菌株的分离及氧化 Mn(II)特性研究. *环境科学与技术*, 36(11): 84-88
- 王文秀, 马靖宇, 朱伟捷, 崔鸿鹏, 魏士平, 2015. 一株海洋锰氧化真菌的分离、鉴定及其对 Mn(II)的氧化特性. *应用与环境生物学报*, 21(6): 1032-1036
- 王鑫浩, 范芳, 张洛红, 齐剑英, 2018. 锰氧化物对环境中重金属吸附及影响因素研究进展. *应用化工*, 47(1): 155-164
- 韦天慧, 宋金柱, 刘诗宇, 宫殿良, 王棋, 孙瑶, 2023. 三株真菌对重金属锰的耐受性和吸附特性研究. *微生物学报*, 63(3): 1023-1034
- 杨伟红, 张震, 李林, 张忠明, 刘凡, 2012. 铁锰结核土壤锰氧化细菌多样性及新菌属分析. *土壤*, 44(4): 606-612
- 张璐, 李婷婷, 王芳, 许旭萍, 2011. 锰氧化细菌的分离鉴定及其锰氧化特性的分析. *微生物学通报*, 38(3): 328-332
- 张能, 赵苗, 谢敬宜, 王银, 文晓梅, 贺新生, 2017. 梯棱羊肚菌 *Morchella importuna* 对重金属离子的耐受性研究. *菌物学报*, 36(3): 367-375