

## 希瓦氏菌对甲基绿的脱色及其机制

鲍巧雨<sup>1,2</sup>, 钱怀丽<sup>1,2</sup>, 郭晶晶<sup>1,2</sup>, 邓国志<sup>1,2</sup>, 武超<sup>1,2\*</sup>

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601; 2. 湿地生态保护与修复安徽省重点实验室(安徽大学), 合肥 230601)

**摘要:** 以希瓦氏菌(*Shewanella oneidensis* MR-1)为染料脱色菌株对甲基绿(methyl green, MG)进行脱色处理, 研究不同碳源、甲基绿浓度、初始菌株浓度和温度对染料脱色的影响。通过紫外-可见吸收光谱(UV-visible)、傅里叶红外光谱(FTIR)以及液相色谱-质谱联用(LC-MS)对甲基绿的脱色产物进行分析研究, 通过杀菌实验去测定甲基绿脱色液的生物毒性, 通过*S. oneidensis* MR-1及其突变菌株对甲基绿的脱色速率推测可能的生物机制。研究表明:*S. oneidensis* MR-1在以甲酸钠为碳源时的脱色率最高; 在不同甲基绿浓度下, 该菌对40 mg·L<sup>-1</sup>甲基绿可在1 h内脱色率达95%以上; 菌株浓度的增加会增强脱色效果; 温度研究显示,*S. oneidensis* MR-1在30 ℃条件时, 对甲基绿的脱色效果更好。产物分析及杀菌实验结果证实*S. oneidensis* MR-1能够对甲基绿进行脱色, 脱色后液体无毒, 脱色产物主要为: 4-(N,N-二甲基氨基)-4'-(N',N'-二甲基氨基)二苯甲酮(DDBP), 4-(N-乙基-N,N-二甲基氨基)-4'-(N'-甲基氨基)二苯甲酮(ED-MBP), 4-(N-乙基-N,N-甲基氨基)-4'-(N',N'-二甲基氨基)二苯甲酮(EM-DBP)和4-(N-乙基-N,N-甲基氨基)-4'-(N'-甲基氨基)二苯甲酮(ED-BP)。

**关键词:** 希瓦氏菌; 甲基绿; 脱色; 产物分析; 毒性; 生物机制

中图分类号: X172

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2021)06-0975-06

### Decolorization of methyl green by *Shewanella oneidensis* MR-1 and its mechanism

BAO Qiaoyu<sup>1,2</sup>, QIAN Huaili<sup>1,2</sup>, GUO Jingjing<sup>1,2</sup>, DENG Guozhi<sup>1,2</sup>, WU Chao<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601;

2. Anhui Province Key Laboratory of Wetland Ecosystem Protection and Restoration (Anhui University), Hefei 230601)

**Abstract:** The present study was conducted using *Shewanella oneidensis* MR-1 for the decolorization of triphenylmethane dye methyl green to evaluate the effects of various parameters (different carbon sources, initial concentrations of methyl green and *S. oneidensis* MR-1 and temperature) on methyl green removal. Decolorizing products of methyl green were analyzed by UV-visible, FTIR analysis and LC-MS analyses. The toxicity of methyl green decolorizing solution was determined by the killing assay. The possible biological mechanism was inferred from the decolorization rate of methyl green by *S. oneidensis* MR-1 wild-type and mutant strains. The results showed that *S. oneidensis* MR-1 had the highest decolorization rate when the carbon source was formic acid. Under different concentrations of methyl green, the decolorization efficiency was up to 95% after 1 h when methyl green concentration was 40 mg·L<sup>-1</sup>. The decolorization efficiency was enhanced with the increase of strain concentration. Temperature experiment showed that the decolorization efficiency of methyl green was better at 30 ℃. The results of product analysis and killing assay confirmed that *S. oneidensis* MR-1 could decolorize methyl green and the decolorizing solution had no obvious toxicity. The decolorizing products of methyl green included 4-(N,N-Dimethylamino)-4'-(N',N'-dimethylamino) benzophenone(DDBP), 4-(N-Ethyl-N,N-dimethylamino)-4'-(N'-methylamino) benzophenone(ED-MBP), 4-(N-Ethyl-N-methylamino)-4'-(N',N'-dimethylamino) benzophenone(EM-DBP) and 4-(N-Ethyl-N-methylamino)-4'-(N'-methylamino) benzophenone(ED-BP).

**Key words:** *Shewanella oneidensis* MR-1; methyl green; decolorization; product analysis; toxicity; biomechanism

收稿日期: 2021-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(31670126)和安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2017YF-03)共同资助。

作者简介: 鲍巧雨, 硕士研究生。E-mail: 2899735953@qq.com

\* 通信作者: 武超, 副教授。E-mail: wuchao@ahu.edu.cn

三苯甲烷类染料是一种多苯环化合物,它广泛应用于纺织业、造纸业、皮革业以及医药业中,是继偶氮染料和蒽醌染料之后使用量第三大染料<sup>[1]</sup>。由于其生物毒性及致癌、致畸、致突变的三致性对人类健康构成威胁,引起了广泛关注<sup>[2]</sup>。甲基绿是三苯甲烷类染料的一种,其人工合成色度高,难以进行生物降解,从而造成甲基绿对水体污染严重<sup>[3]</sup>。因此,在排放含有这些染料的废水之前,对染料进行脱色是必要的<sup>[4]</sup>。

去除废水中染料的方法很多,目前物理和化学方法已经被成熟应用于工业废水中染料的消除,但这些方法自身均存在着一定的局限性,比如价格高昂、对环境不友好、安全性低以及效率低等问题。现有的废水处理程序也由于其色牢度、稳定性和抗降解性而无法从废水中完全去除顽固的三苯甲烷类染料<sup>[5]</sup>。因此利用微生物对染料进行脱色逐渐成为了研究热点<sup>[6-10]</sup>。吴茵等<sup>[11]</sup>利用 *Pleurotus eryngii*-Co007 降解孔雀石绿, Zhou 等<sup>[12]</sup>利用 *Shewanella* sp.RQs-106 降解酸性红 18, Yatome 等<sup>[13]</sup>研究了菌株 *B.subtilis* IFO 13719 对结晶紫的降解。

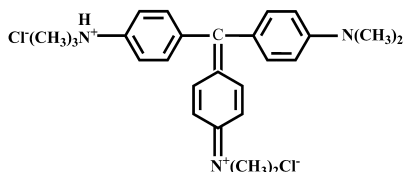
本研究首次尝试以 *S. oneidensis* MR-1 为脱色菌株,对甲基绿进行脱色研究,发现 *S. oneidensis* MR-1 对甲基绿具有较高的脱色效率,脱色后的液体无毒。通过该菌株对甲基绿的脱色条件研究,定性及定量分析,脱色液毒性研究及生物降解途径探索,以期修复甲基绿染料废水生物脱色问题以及微生物降解三苯甲烷类染料的研究提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 菌种** *Shewanella oneidensis* MR-1,由美国南加尼福尼亚大学的 K. H. Nealon 教授提供。突变菌株  $\Delta omcA\Delta mtrC$ 、 $\Delta cymA$ 、 $\Delta fdh$  和  $\Delta hyd$  通过基因敲除等技术获得。

**1.1.2 染料** 甲基绿 (MG, 分子式:  $C_{26}H_{33}Cl_2N_3$ ) 购自上海生物工程股份有限公司,分析纯,最大吸收波长 632 nm。相对分子量为 458.47,结构式如下:



**1.1.3 培养基** LB 富集培养基: 10 g·L<sup>-1</sup> yeast extract, 5 g·L<sup>-1</sup> tryptone, 10 g·L<sup>-1</sup> NaCl, 121 °C 灭菌 20 min, 备用。厌氧脱色培养基: 0.46 g·L<sup>-1</sup> NaCl, 0.255 g·L<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.225 g·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 0.225

g·L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 3.463 8 g·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 1.871 7 g·L<sup>-1</sup> NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0.024 g·L<sup>-1</sup> MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 微量元素储备液 5 mL·L<sup>-1</sup>, pH 7.0, 分装 30 mL 入 50 mL 血清瓶后,通氮气 5 min·个<sup>-1</sup>,用丁基橡胶塞密封并加盖。121 °C 灭菌 20 min, 备用。

**1.1.4 试剂** 本研究中所有试剂均为国产分析纯。

### 1.2 方法

**1.2.1 *S. oneidensis* MR-1 的培养及收集** 菌株 MR-1 接种到含 50 mL LB 培养基的 250 mL 锥形瓶后,30 °C、150 r·min<sup>-1</sup> 培养;16 h 后 6 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 5 min,弃上清,然后用厌氧培养基重悬再离心,重复 3 次以去除菌体表面的 LB 培养基。

**1.2.2 条件对脱色的影响** (1) 碳源对染料脱色的影响。30 °C,150 r·min<sup>-1</sup> 条件下,取培养 16 h 后的菌液,转接 30 mL 厌氧培养基至 OD<sub>600</sub> = 0.4,碳源分别为甲酸钠、丙酮酸钠、乳酸钠和葡萄糖。

(2) 染料浓度对脱色的影响。30 °C,150 r·min<sup>-1</sup> 条件下,取培养 16 h 后的菌液,转接 30 mL 厌氧培养基至 OD<sub>600</sub> = 0.4,甲基绿浓度设置为 40、80、120、160 和 200 mg·L<sup>-1</sup>。

(3) 菌株浓度对脱色的影响。30 °C,150 r·min<sup>-1</sup> 条件下,取培养 16 h 后的菌液以不同初始 OD 转接 30 mL 厌氧培养基,设置菌株终浓度分别为 OD<sub>600</sub> 为 0.05、0.2、0.4、0.6 和 1.2。

(4) 温度对脱色的影响。150 r·min<sup>-1</sup> 条件下,取培养 16 h 后的菌液,转接至 30 mL 厌氧培养基至 OD<sub>600</sub> 为 0.4,温度分别设置为 20、25、30 和 37 °C。每隔 30 min 用移液枪吸取 1 mL 培养液,12 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 10 min,取上清液于 632 nm 处测定吸光度。所有样品 1 式 3 份。

**1.2.3 染料脱色率的测定** 用分光光度法测定波长 632 nm 处的吸光度,染料脱色率  $\eta$  按式 (1) 计算:

$$\eta/\% = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100$$

式中:  $A_0$  为培养液中原染料浓度;  $A_t$  为 t 时间的剩余染料浓度。

**1.2.4 紫外-可见吸收光谱分析** 向含 25 mmol·L<sup>-1</sup> 甲酸的 30 mL 厌氧培养基加入 40 mg·L<sup>-1</sup> 甲基绿,菌株终浓度为 OD<sub>600</sub> 为 0.4,培养 3 h 后取样,10 000 r·min<sup>-1</sup>,2 min 离心取上清液,用紫外-可见光谱仪 (UV-vis Spectrophotometer 美谱达,UV-1100) 在 200~800 nm 范围内进行全波长扫描。

**1.2.5 傅里叶红外光谱分析** 取染料降解前后的菌液离心弃上清,用厌氧培养基清洗菌体,80 °C 烘箱烘干;混合溴化钾研磨碾碎后压制成薄片用傅里叶

红外光谱仪 (FTIR, Vertex 80+Heperi on 2000, China) 检测, 波数  $4\ 000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 。

**1.2.6 液相色谱-质谱联用分析** 在含  $25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  甲酸的  $30\text{ mL}$  厌氧培养基中加入  $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  甲基绿, 菌株浓度为  $OD_{600}$  为  $0.4$ ,  $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  培养。取脱色后的样品利用液相色谱-质谱 (LC-MS Thermo, LTQ Orbitrap XL) 定性分析<sup>[4]</sup>。

**1.2.7 甲基绿脱色液毒性的测定** 用移液枪分别吸取  $0\text{ h}$  与  $3\text{ h}$  的  $1\text{ mL}$  培养液,  $12\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心  $10\text{ min}$ , 取上清液, 转入过夜培养的大肠杆菌 BW25113 至  $OD_{600}=0.1$ ,  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  孵育  $30\text{ min}$  后用厌氧培养基进行洗菌, 梯度稀释以及滴板。将培养皿移入  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  培养基培养  $12\sim 16\text{ h}$ 。

**1.2.8 甲基绿脱色机制的探索**  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  条件下, 取培养  $16\text{ h}$  后的 *S. oneidensis* MR-1 及其突变菌株菌液, 分别转接  $30\text{ mL}$  厌氧培养基至  $OD_{600}$  为  $0.4$ , 甲基绿浓度设置为  $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。每隔  $30\text{ min}$  用移液枪吸取  $1\text{ mL}$  培养液,  $12\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心  $10\text{ min}$ , 取上清液于  $632\text{ nm}$  处测定吸光度。所有样品 1 式 3 份。

## 2 结果与分析

### 2.1 染料脱色率分析

**2.1.1 不同碳源对脱色率的影响** 如图 1(a) 所示, 当以甲酸钠为碳源时, *S. oneidensis* MR-1 对甲基绿的脱色效果最好,  $1\text{ h}$  可达到  $95\%$  以上。随着脱色时间的增加, 其  $3\text{ h}$  脱色率稳定在  $99\%$  以上。对于其余碳源, 染料脱色率  $1\text{ h}$  均仅能达到  $65\%$  左右, 且  $3\text{ h}$  脱色率最终会稳定在  $85\%$  左右, 相对于甲酸钠而言也较低。考虑到实际应用及脱色率, 选择甲酸钠为碳源进行后续脱色实验条件的优化。

**2.1.2 染料浓度对脱色率的影响** 不同甲基绿浓度对脱色率的影响如图 1(b) 所示: 当甲基绿浓度为  $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,  $1\text{ h}$  染料脱色率可达  $95\%$  以上, 染料在  $2\text{ h}$  的时候几乎完全被降解; 而当浓度为  $80\sim 200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,  $1\text{ h}$  左右的脱色率分别为  $80\%$ 、 $70\%$ 、 $65\%$  和  $58\%$  左右。随着脱色时间的增加, 脱色率缓慢增大,  $3\text{ h}$  脱色率均稳定在  $85\%$  以上, 表明逐步提高甲基绿浓度, 脱色率和浓度呈反比<sup>[14]</sup>。推测主要原因为: 染料的毒性作用随着其浓度的升高而增强, 导致细菌的生长和代谢被抑制, 从而影响细菌对染料的脱色, 导致脱色率降低<sup>[15]</sup>。考虑到实际应用及脱色率, 最终选择  $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  甲基绿进行后续脱色实验条件的优化。

**2.1.3 脱色菌株浓度对脱色率的影响** *S. oneidensis*

MR-1 菌株浓度对脱色率的影响如图 1(c) 所示: 当菌株浓度为  $OD_{600}$  为  $1.2$  时,  $0.5\text{ h}$  脱色率高达  $95\%$  以上,  $1\text{ h}$  脱色率就可以稳定在  $99\%$  以上;  $OD_{600}$  为  $0.6$  和  $0.4$  时,  $0.5\text{ h}$  脱色率达  $80\%$ ;  $3\text{ h}$  脱色率才能稳定在  $99\%$  以上;  $OD_{600}$  为  $0.2$  和  $0.05$  时,  $0.5\text{ h}$  脱色率及  $3\text{ h}$  脱色率均远低于其余菌株浓度下的脱色率。可以发现随着脱色菌株浓度的不断增大, 脱色率也不断增大。考虑到实际应用及脱色率, 最终选择菌株浓度  $OD_{600}$  为  $0.4$  进行后续脱色实验条件的优化。

**2.1.4 温度对脱色率的影响** 温度对希瓦氏菌的生长有重要的影响, 因此也会对染料脱色有影响。有研究表明, 染料脱色率会随着温度的升高而升高, 这是因为较高的温度会使菌的生长代谢速率加快, 各类酶的活性提高, 从而导致细菌对染料脱色能力的提高。然而当温度升高到一定程度时, 脱色率开始降低, 这是因为高温会导致酶失活<sup>[15]</sup>。本研究在  $20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内 *S. oneidensis* MR-1 对染料的脱色能力如图 1(d) 所示: 当温度为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, *S. oneidensis* MR-1 对甲基绿的脱色效果最佳,  $0.5\text{ h}$  脱色率可达  $80\%$ ; 温度低于或者高于  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 脱色率均有所降低。当温度为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 脱色率低可能是由于温度降低导致酶的活性不高, 从而影响菌株对染料的脱色。从整体来看,  $20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内  $3\text{ h}$  脱色率均在  $80\%$  以上。说明 *S. oneidensis* MR-1 在较大的温度范围内, 对甲基绿有较好的脱色效果, 在染料工业废水处理中具有广阔的应用前景。希瓦氏菌的最适生长温度为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 与本实验结果相符。因此后续研究选取  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  为脱色降解实验的温度。

### 2.2 紫外-可见吸收光谱分析

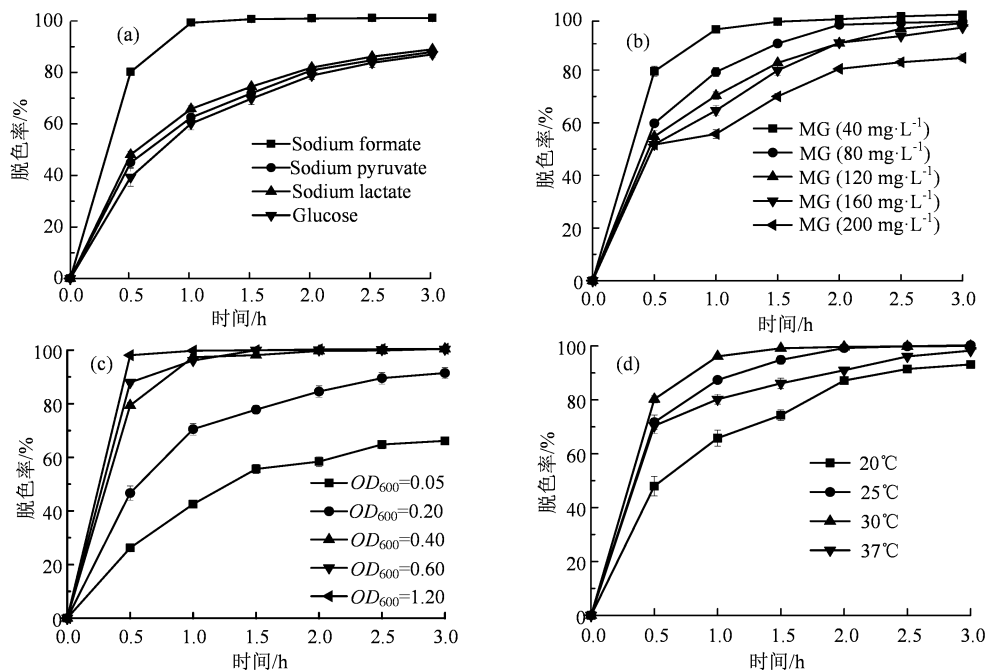
脱色前后的紫外-可见吸收光谱对比结果(图 2) 显示: 脱色后溶液在  $373\text{ nm}$  处出现了一个新的吸收峰, 推测可能产生了某种新产物<sup>[4]</sup>。有研究表明, 如果脱色前后吸收峰成比例降低, 则染料脱色主要依赖于吸附作用; 如果吸收峰在一处波长消失的同时, 有新的吸收峰在其他波长处产生, 则染料脱色主要依赖于酶解作用<sup>[15]</sup>。由此推测 *S. oneidensis* MR-1 对甲基绿的脱色可能是以酶解为主, 而不是吸附。

### 2.3 傅里叶红外光谱分析

降解前后的 FTIR (图 3) 显示: 对于原液本身,  $1\ 650.01\text{ cm}^{-1}$  处为苯环的骨架振动,  $1\ 500.53\text{ cm}^{-1}$  处为  $\text{C}=\text{C}$  伸缩振动,  $1\ 079.11\text{ cm}^{-1}$  处为芳香化合物的  $\text{C}-\text{N}$  伸缩振动。对于甲基绿的降解液,  $1\ 649.05\text{ cm}^{-1}$  处为  $\text{N}-\text{H}$  变形振动,  $1\ 541.04\text{ cm}^{-1}$  处为与芳环

连接的 C=O 伸缩振动,  $1\ 082.97\ \text{cm}^{-1}$  处为 C-H 面内弯曲振动,  $528.846\ \text{cm}^{-1}$  处为 N-H 面外弯曲振动, 由此推断甲基绿的降解产物含有官能团 C=O, -NH。

综上所述, 推测甲基绿脱色过程中有羰基和亚氨基等官能团的参与。



(a) 不同碳源; (b) 甲基绿浓度; (c) *S. oneidensis* MR-1 菌株浓度; (d) 温度。

图 1 不同因素对脱色效率的影响

Figure 1 Effect of different factors on decolorization efficiency

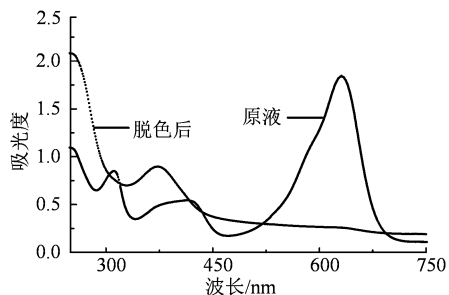


图 2 降解前后甲基绿的紫外-可见吸收光谱

Figure 2 UV-visible absorption spectra of methyl green before and after degradation

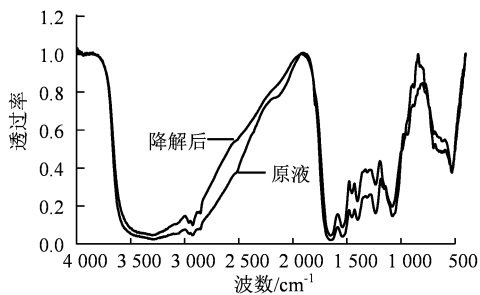


图 3 降解前后甲基绿的傅里叶红外光谱图

Figure 3 The FTIR spectra of methyl green before and after degradation

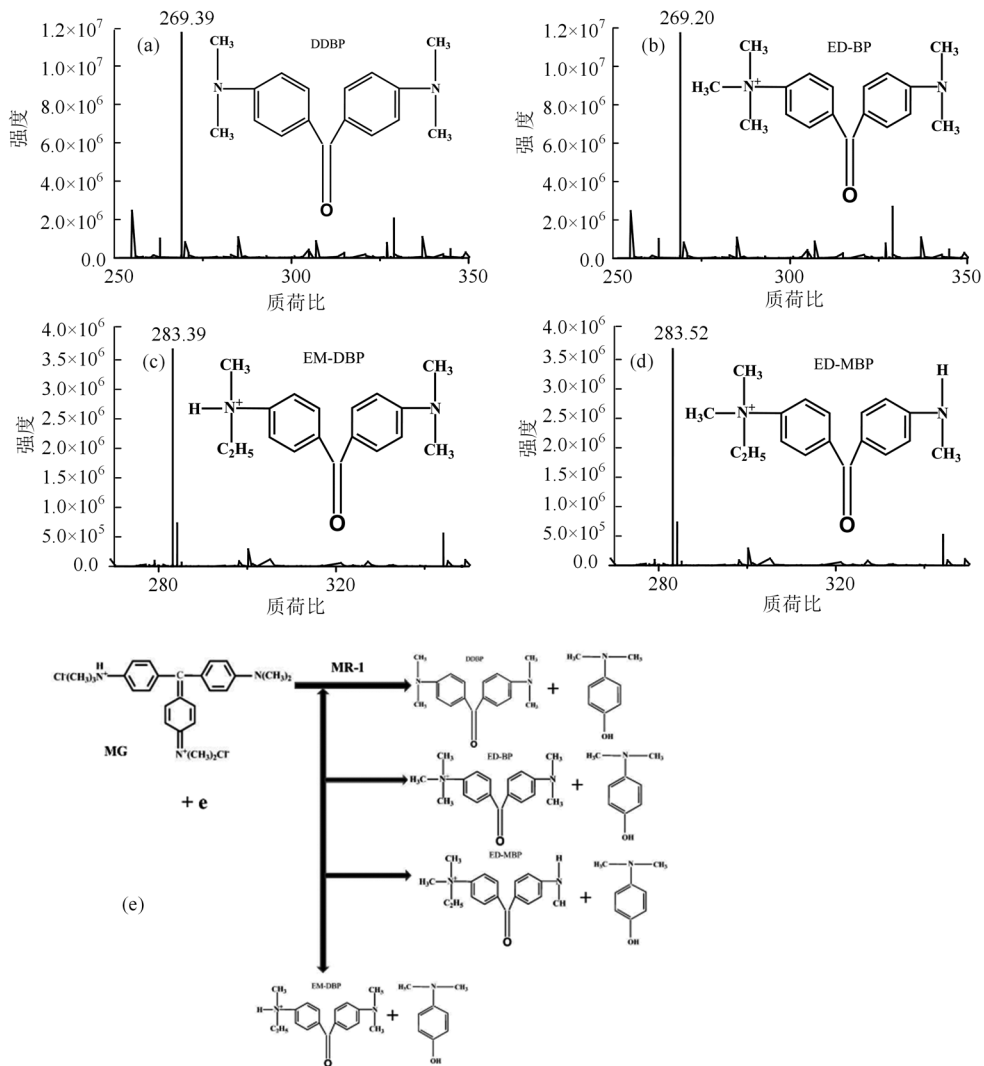
## 2.4 液相色谱-质谱分析

取脱色后的培养液进行液相色谱-质谱分析<sup>[4]</sup>, 推测可能的脱色产物如图 4 (a) 至 4 (d) 所示: 即 4-(N, N-二甲基氨基)-4'-(N', N'-二甲基氨基)二苯甲酮 (DDBP), 4-(N-乙基-N, N-二甲基氨基)-4'-(N'-甲基氨基)二苯甲酮 (ED-MBP), 4-(N-乙基-N, N-甲基氨基)-4'-(N', N'-二甲基氨基)二苯甲酮 (EM-DBP) 和 4-(N-乙基-N, N-甲基氨基)-4'-(N'-甲基氨基)二苯甲酮 (ED-BP)<sup>[16]</sup>。由此推测一条甲基绿脱色的可能途径如图 4 (e) 所示。

## 2.5 脱色液毒性实验

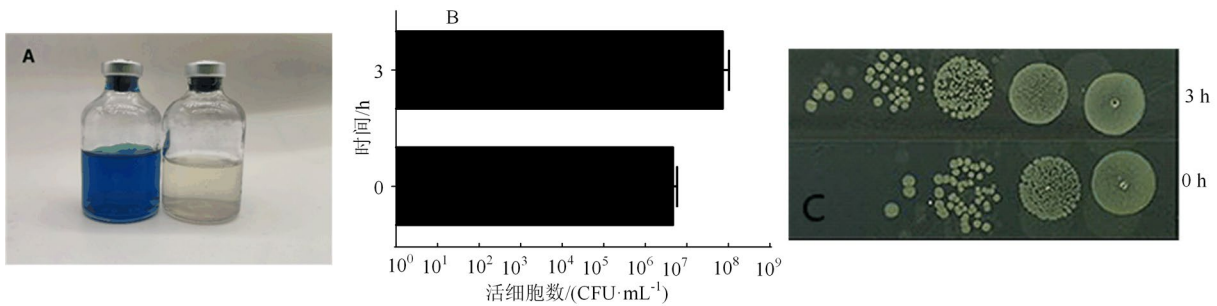
甲基绿具有较强的毒性, 因此必须先将染料去

除后才可将污水释放到水体。一般来说, 染料脱色后是低毒或无毒的, 但是也不排除脱色液比染料本身毒性更强的情况。为了评估甲基绿降解产物的毒性, 用甲基绿脱色产物处理大肠杆菌, 并检测大肠杆菌的存活率。甲基绿溶液经 *S. oneidensis* MR-1 还原后, 由蓝色变成无色透明, 表明染料已经完全脱色 (图 5A)。用甲基绿溶液及其脱色后溶液处理大肠杆菌 BW25113 菌株 3 h 后, 滴板测定活细胞数目, 结果显示  $40\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  甲基绿溶液在脱色前后对大肠杆菌的毒性略有下降 (图 5B 和 5C)。因此, *S. oneidensis* MR-1 菌株在染料工业废水的治理方面具有较好的应用前景。



(a) DDBP; (b) ED-BP; (c) EM-DBP; (d) ED-MBP; (e) 甲基绿脱色途径。  
图 4 甲基绿降解产物质谱图

Figure 4 The MS spectrum of methyl green degrading productions



(A) 颜色变化; (B) 大肠杆菌 BW25113 活细胞数; (C) 滴板图片。  
图 5 菌株 MR-1 引起的甲基绿脱色前后变化

Figure 5 The change before and after decolorization of methyl green by strain MR-1

### 2.6 生物脱色机制的探索

甲酸在 *S. oneidensis* MR-1 中会经甲酸脱氢酶 FDH 氧化, 电子可传递给氢酶 Hyd, 或经醌还原酶 Cym 传递给外膜电子传递复合物 OmcA/MtrA<sup>[17]</sup>。因此, 检验了上述蛋白在 *S. oneidensis* MR-1 还原甲基绿过程中的作用。结果 (图 6) 显示: 甲酸脱氢

酶  $\Delta fdh$  突变株的甲基绿还原速率明显弱于野生型菌株, 确定了甲酸氧化在还原中的作用。  $\Delta hyd$  和  $\Delta omcA\Delta mtrC$  的甲基绿还原能力并未减弱, 甚至  $\Delta omcA\Delta mtrC$  的还原速率略有上升。这一结果暗示, 在甲酸脱氢酶下游存在其他电子传递蛋白, 参与甲基绿的还原。进一步的研究正在进行中。

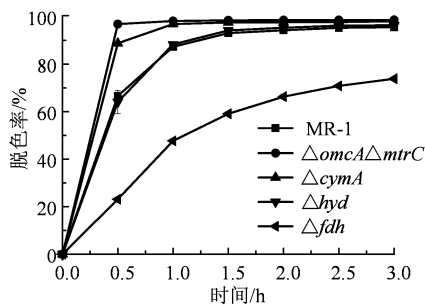


图 6 *S. oneidensis* MR-1 及其突变菌株对脱色率的影响

Figure 6 Effect of *S. oneidensis* MR-1 and its mutant strains on decolorization efficiency

### 3 结论

*S. oneidensis* MR-1 是革兰氏阴性兼性厌氧菌的一种, 具有多样且灵活的代谢方式, 是研究生物修复的模式菌株之一<sup>[18]</sup>。目前尚无 *S. oneidensis* MR-1 脱色甲基绿报道。本研究显示 *S. oneidensis* MR-1 能够高效还原并脱色甲基绿, 主要有 4 种脱色产物; 脱色产物的毒性较甲基绿略有降低; 甲酸氧化是甲基绿还原的电子来源, 但具体的终端还原酶有待解析。

### 参考文献:

- [1] 吴永利, 王莉, 范子睿, 等. 孔雀石绿高效脱色菌的鉴定及降解特性研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2017, 25(1): 38-43.
- [2] 张培培, 任随周, 许玫英, 等. 微生物对三苯甲烷类染料脱色的研究进展[J]. 微生物学通报, 2009, 36(9): 1410-1417.
- [3] 产丹丹, 熊晶晶, 张家胜, 等. 一株嗜盐菌的分离鉴定及其降解甲基绿的实验[J]. 环境工程, 2019, 37(9): 81-85, 90.
- [4] 钱怀丽, 熊晶晶, 邓国志, 等. 腐生葡萄球菌合成纳米钯及其原位催化甲基绿还原[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(2): 283-287.
- [5] SARATALE R G, SARATALE G D, CHANG J S, et al. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: a review[J]. J Taiwan Inst Chem Eng, 2011, 42(1): 138-157.
- [6] 张晓华, 赵保卫, 任学昌, 等. 一种三苯甲烷类染料脱色菌液的制备及其脱色性能[J]. 中国给水排水, 2016, 32(9): 98-102.
- [7] AYED L, CHAIEB K, CHEREF A, et al. Biodegradation of triphenylmethane dye Malachite Green by *Sphingomonas paucimobilis*[J]. World J Microbiol Biotechnol, 2008, 25(4): 705-711.
- [8] JP S. Biological degradation of reactive dyes by using bacteria isolated from dye effluent contaminated soil[J]. Middle East J Sci Res, 2013, 17(12): 1695-1700.
- [9] REN S, GUO J, ZENG G, et al. Decolorization of triphenylmethane, azo, and anthraquinone dyes by a newly isolated *Aeromonas hydrophila* strain[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2006, 72(6): 1316-1321.
- [10] 肖旭倩, 胡正龙, 邵广晴. 细菌降解三苯甲烷类染料废水的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(7): 83-85.
- [11] 吴茵, 陈敏, 刘洁. 刺芹侧耳对孔雀石绿的脱色降解及其产物分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2844-2851.
- [12] ZHOU Y, LU H, WANG J, et al. Catalytic performance of quinone and graphene-modified polyurethane foam on the decolorization of azo dye Acid Red 18 by *Shewanella* sp. RQs-106[J]. J Hazard Mater, 2018, 356: 82-90.
- [13] YATOME C, OGAWA T, MATSUI M. Degradation of crystal violet by *Bacillus subtilis*[J]. J Environ Sci Heal Part A: Environ Sci Eng Toxicol, 1991, 26(1): 75-87.
- [14] SANI R K, BANERJEE U C. Decolorization of triphenylmethane dyes and textile and dye-stuff effluent by *Kurthia* sp.[J]. Enzym Microb Technol, 1999, 24(7): 433-437.
- [15] HADIBARATA T, ADNAN L A, YUSOFF A R M, et al. Microbial decolorization of an azo dye reactive black 5 using white-rot fungus *Pleurotus eryngii* F032[J]. Water Air Soil Pollut, 2013, 224(6): 1-9.
- [16] MAI F D, CHEN C C, CHEN J L, et al. Photodegradation of methyl green using visible irradiation in ZnO suspensions: determination of the reaction pathway and identification of intermediates by a high-performance liquid chromatography-photodiode array-electrospray ionization-mass spectrometry method[J]. J Chromatogr A, 2008, 1189(1/2): 355-365.
- [17] XIONG J, CHAN D, GUO X, et al. Hydrogen production driven by formate oxidation in *Shewanella oneidensis* MR-1[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2020, 104(12): 5579-5591.
- [18] WATTS M P, COKER V S, PARRY S A, et al. Effective treatment of alkaline Cr(VI) contaminated leachate using a novel Pd-bionanocatalyst: Impact of electron donor and aqueous geochemistry[J]. Appl Catal B: Environ, 2015, 170/171: 162-172.
- [19] ASAD S, AMOOZEGAR M A, POURBABAE A A, et al. Decolorization of textile azo dyes by newly isolated halophilic and halotolerant bacteria[J]. Bioresour Technol, 2007, 98(11): 2082-2088.
- [20] DU L N, ZHAO M, LI G, et al. Biodegradation of malachite green by *Micrococcus* sp. strain BD15: Biodegradation pathway and enzyme analysis[J]. Int Biodeterior Biodegrad, 2013, 78: 108-116.