

# 一株嗜水气单胞菌 HS01 的偶氮还原脱色特性

武春媛<sup>1,2</sup> 李勤奋<sup>1,2</sup> 周顺桂<sup>3\*</sup> 李芳柏<sup>3\*</sup>

(1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所 海南 海口 571101)

(2. 农业部儋州农业环境科学观测实验站 海南 儋州 571737)

(3. 广东省生态环境与土壤研究所 广东 广州 510650)

**摘要:** 【目的】研究嗜水气单胞菌 HS01 的偶氮染料还原脱色特性。【方法】建立 HS01/偶氮染料/电子供体序批式厌氧反应体系, 研究 Fe(III)/腐殖质还原菌 HS01 以偶氮染料为电子受体的厌氧呼吸特性及影响因素; 并构建 HS01/偶氮染料/电子供体/铁氧化物体系, 探讨铁氧化物对 HS01 偶氮还原的影响。【结果】HS01 可将金橙 I 迅速还原, 菌体增殖; 柠檬酸、丙三醇、蔗糖和葡萄糖体系中, 16 h 金橙 I 的脱色率分别达 87%、85%、88%、90%; 不同 pH 和金橙 I 初始浓度条件下的脱色率不同; 在反应体系中加入  $\alpha$ -FeOOH, 脱色率从 90% 增加至 95%, Fe(II) 生成量与无染料对照体系相当。【结论】HS01 能以葡萄糖为电子供体, 金橙 I 为唯一电子受体, 进行厌氧呼吸; 蔗糖、柠檬酸、丙三醇也可作为有效的电子供体, 脱色率依次递减; 甲酸、乙酸、乳酸、乙醇及丙酸不能作为 HS01 厌氧呼吸的电子供体。金橙 I 脱色的最佳 pH 范围为 6.0–8.0; 高浓度 (2.0 mmol/L) 金橙 I 负荷下, HS01 仍保持高脱色率 (>85%)。在 HS01/ $\alpha$ -FeOOH/金橙 I 体系中, 异化铁还原作用与偶氮呼吸作用同时发生, 异化铁还原能促进偶氮脱色, 而脱色对 Fe(III) 还原没有明显影响。这可为铁/腐殖质还原菌在环境修复和废水处理等领域的应用提供研究积累。

**关键词:** Fe(III)/腐殖质还原菌, 嗜水气单胞菌, 厌氧呼吸, 偶氮还原, 铁氧化物

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41101477)

\*通讯作者: 李芳柏: Tel: 86-20-87024721; 信箱: cefbli@soil.gd.cn

周顺桂: Tel: 86-20-87025180; 信箱: sgzhou@soil.gd.cn

收稿日期: 2012-07-27; 接受日期: 2012-10-24

# Characterization of azo reduction activity in the strain *Aeromonas hydrophila* HS01

WU Chun-Yuan<sup>1,2</sup> LI Qin-Fen<sup>1,2</sup> ZHOU Shun-Gui<sup>3\*</sup> LI Fang-Bai<sup>3\*</sup>

(1. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China)

(2. Danzhou Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Danzhou, Hainan 571737, China)

(3. Guangdong Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangzhou, Guangdong 510650, China)

**Abstract: [Objective]** The purpose was to study azo reduction activity in the strain *Aeromonas hydrophila* HS01 under anaerobic conditions. **[Methods]** We established the anaerobic system of HS01/electron donor/azo dye to investigate the ability of strain HS01 to obtain energy for growth by coupling the oxidation of electron donors to azo reduction, and further explore the enhanced azo microbial reduction by the presence of Fe(III) oxides. **[Results]** Within 30 h, HS01 could reduce 0.45 mmol/L orange I at the expense of 4.35 mmol/L glucose, and the active cells increased by 27 times in the treatments of HS01/glucose/orange I. The decolorization rate of orange I reached 87%, 85%, 88%, and 90%, respectively, when citrate, glycerol, sucrose or glucose served as the electron donor. It showed different decolorization rate by pH of 5–10 and 0.5–5.0 mmol/L of initial concentrations of orange I. In the system of HS01/glucose/orange with  $\alpha$ -FeOOH, decolorization rate increased from 90% to 95%. **[Conclusion]** HS01 was capable of anaerobic respiration on orange I as the sole terminal electron acceptor with glucose as the electron donor. The decolorization rate depended on the types of electron donor, pH and initial concentrations of azo: citrate, glycerol, sucrose or glucose could serve as an effective electron donor for dissimilatory azo reduction, whereas formate, acetate, propionate, lactate and ethanol do the opposite; pH of 6.0–8.0 was optimum for azo reduction by HS01. Dissimilatory Fe(III) reduction and azo reduction by strain HS01 occurred simultaneously, and the presence of Fe(III) oxides would enhance orange I decolorization.

**Keywords:** Fe(III)/humus-reducing microorganisms, *Aeromonas hydrophila*, Anaerobic respiration, Azo reduction, Iron oxide

偶氮染料是印染行业广泛使用的一类人工合成化合物,含有一个或多个偶氮键发色基团。由于使用量大和环境有害性,偶氮染料的脱色及脱毒成为化工与环境领域研究热点。目前,利用微生物处理偶氮染料废水脱色的研究报道较多,这类脱色微生物主要分布在气单胞菌属、假

单胞菌属、芽孢杆菌属、红球菌属、志贺菌属、克雷伯氏菌属、棒杆菌属、肠杆菌属以及希瓦氏菌属<sup>[1-2]</sup>。

Fe(III)/腐殖质还原菌是一类重要的环境功能菌,参与多种物质的生物地球化学循环及有机污染物降解脱毒<sup>[3-5]</sup>。近年研究发现,这类菌株促进

偶氮染料还原脱色有两种途径: (1) 直接还原脱色: Fe(III)/腐殖质还原菌氧化胞内电子供体, 产生的电子传递到胞外大分子偶氮染料, 使其还原脱色。如, Hong 等(2007)报道, *Shewanella decolorationis* S12 能以 H<sub>2</sub>、丙酮酸、乳酸为电子供体, 还原苋菜红、金橙 II、酸性红等偶氮染料, 并且在偶氮还原的过程中产生能量, 使菌体增殖, 属于菌株厌氧呼吸的一种方式<sup>[6]</sup>。(2) 腐殖质介导脱色: 腐殖质在还原菌和偶氮染料之间充当电子穿梭体, 即腐殖质首先获得来自菌体内部的电子而被还原, 还原态的腐殖质与偶氮键发生氧化还原反应, 使偶氮键断裂, 实现脱色, 该过程可显著提高偶氮还原脱色效率<sup>[7]</sup>。对促进偶氮染料还原的电子穿梭体的深入研究表明, 氧化还原电势(E<sub>0</sub>)在-320 mV 到-50 mV 之间的氧化还原介体通常在偶氮染料厌氧微生物还原中发挥作用, 究其原因, 与微生物细胞外膜辅酶 NAD(P)H 与偶氮染料之间的电势差(-180-430 mV)有关<sup>[8]</sup>。按照氧化还原电势理论, Fe(III)氧化物也可在还原菌与偶氮染料之间充当电子穿梭体, 促进偶氮键断裂。Fe(III)氧化物在还原菌和 DDT、四氯化碳、五氯酚等有机氯污染物之间充当电子穿梭体, 促进这类物质还原脱色<sup>[3,9-10]</sup>。但关于铁氧化物在偶氮还原中的作用少见报道。

本文以嗜水气单胞菌 HS01 作为 Fe(III)/腐殖质还原模式菌, 研究 HS01 以偶氮染料金橙 I 为电子受体进行厌氧呼吸特性及影响因素, 并构建 HS01/偶氮染料/电子供体/铁氧化物体系, 探讨异化铁还原与偶氮染料的微生物还原脱色之间的相互作用。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

**1.1.1 偶氮染料:** 金橙 I (Orange I, 1-萘酚偶氮对苯磺酸钠)购自上海试剂公司(化学纯), 分子式为

C<sub>16</sub>H<sub>12</sub>N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>SNa, 分子量为 328.34, 化学结构式如图 1 所示。

**1.1.2 铁氧化物:** 针铁矿( $\alpha$ -FeOOH)合成方法参照文献[11]。

**1.1.3 供试菌株:** 菌株 HS01 分离于广东省四会地下古森林沉积物, 具有异化铁/腐殖质还原特性, 保藏于中国典型培养物保藏中心(保藏号为 CCTCC AB 209165), 命名为嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*) HS01<sup>[12]</sup>。

**1.1.4 基础培养基(BAS):** 每升含 NaHCO<sub>3</sub> 2.5 g, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.25 g, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.6 g, KCl 0.1 g, 酵母浸提物 0.2 g, 少量维生素储备液和微量元素。

**1.1.5 菌悬液:** 用牛肉膏蛋白胨固体培养基活化菌株, 挑取单菌落接种到牛肉膏蛋白胨液体培养基中, 置摇床中 30 °C 培养(180 r/min), 菌数达到对数生长期(约 18 h)时, 将培养基 4 °C 冷冻离心 10 min (8 000 r/min), 倾去上清液, 用已灭菌的 BAS 洗涤菌体, 再次离心, 重复 3 次, 最后用等体积 BAS 重新悬浮菌体, 制成菌悬液(3×10<sup>8</sup> CFU/mL)备用。

### 1.2 方 法

**1.2.1 厌氧培养操作:** 在装有反应溶液的西林瓶中充入 80:20 (V/V)的 N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合气 15 min 排氧, 盖橡胶塞, 并迅速压铝盖密封, 置于厌氧工作站 30 °C 避光静置培养。以下实验均采用严格的无菌和厌氧培养操作, 每个处理设置 3 个重复。

**1.2.2 偶氮还原实验:** 依次将葡萄糖、金橙 I、菌悬液加入 BAS 培养基中, 终浓度分别为

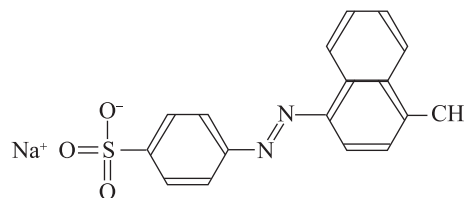


图 1 金橙 I 的化学结构式

Fig. 1 Chemical structure of orange I

5.0 mmol/L、0.5 mmol/L、 $1.5 \times 10^7$  CFU/mL。为稳定反应体系的 pH, 使用 10 mmol/L 磷酸二氢钠/磷酸氢二钠溶液缓冲体系(pH 7.0)。以不加菌悬液和不加葡萄糖的处理作为对照, 测定各处理中活菌数、金橙 I 和葡萄糖浓度变化。

**1.2.3 电子供体实验:** 考察 HS01 偶氮脱色可以利用的电子供体类型。依次将不同电子供体、金橙 I、菌悬液加入到 BAS 培养基中, 终浓度和缓冲体系同偶氮还原实验。选用的电子供体为: 甲酸、乙酸、丙酸、乳酸、柠檬酸、乙醇、丙三醇、葡萄糖和蔗糖。以不加菌悬液和不加电子供体的处理作为对照, 测定各处理中金橙 I 浓度变化。

**1.2.4 pH 对脱色的影响:** 考察不同 pH 对 HS01 偶氮脱色的影响。在偶氮还原实验基础上, 用 1 mmol/L 的 NaOH 或 HCl 溶液调节体系的 pH 为 5–10。用缓冲溶液控制体系 pH, pH 5–8 时用磷酸二氢钠/磷酸氢二钠缓冲体系; pH 9–10 用碳酸钠/碳酸氢钠缓冲体系。测定各处理中金橙 I 浓度变化。

**1.2.5 金橙 I 初始浓度对脱色的影响:** 考察金橙 I 初始浓度对 HS01 偶氮脱色的影响。将葡萄糖、不同浓度金橙 I、菌悬液加入到 BAS 培养基中, 金橙 I 初始浓度为 0.5、1.0、2.0、5.0 mmol/L, 其他条件同偶氮还原实验。

**1.2.6 HS01/ $\alpha$ -FeOOH 体系中脱色实验:** 设计 5 个处理: (1) 主反应: BAS+金橙 I+ $\alpha$ -FeOOH+葡萄糖+HS01; (2) 非生物对照: BAS+金橙 I+ $\alpha$ -FeOOH+葡萄糖; (3) 生物对照: BAS+金橙 I+ $\alpha$ -FeOOH+HS01; (4) 异化铁还原: BAS+ $\alpha$ -FeOOH+葡萄糖+HS01; (5) 偶氮脱色: BAS+金橙 I+葡萄糖+HS01。 $\alpha$ -FeOOH 终浓度为 1 mmol/L, 其他物质浓度与缓冲体系同偶氮还原实验。测定体系中金橙 I 和生成的总 Fe(II) 浓度。

**1.2.7 分析方法:** 总 Fe(II) 与葡萄糖测定方法参照文献[13]; 平板稀释涂布直接计数法测定活菌数变化; 紫外可见分光光度法测定金橙 I 浓度,

先将样品于 4 000 r/min 离心 15 min, 在波长为 200–600 nm 范围内测上清液(或稀释后)的吸收光谱曲线, 确定金橙 I 的偶氮键的特征波长  $\lambda_{\max}=480$  nm。用脱色率表征金橙 I 脱色强度, 脱色率(D)计算公式为:  $D=(C_0-C_t)/C_0 \times 100\%$ ,  $C_0$  为金橙 I 初始浓度,  $C_t$  为金橙 I 在反应 t 时间的浓度。

## 2 结果

### 2.1 HS01 的偶氮还原特性

**2.1.1 金橙 I 脱色与菌体增殖:** 在“葡萄糖+HS01”处理中, 培养液的颜色由橙黄色变为浅黄色直至无色, 同时, 检测结果显示, “葡萄糖+HS01”处理中, 金橙 I 浓度迅速降低, 18 h 时减少量达 0.46 mmol/L, 之后趋于稳定(图 2A), 葡萄糖浓度也相应降低, 由 5 mmol/L 降至 0.65 mmol/L, 未加葡萄糖或 HS01 的对照处理, 各物质浓度无变化; 金橙 I 和葡萄糖浓度减少的同时, 活菌数 30 h 内增殖 27 倍, 而未加电子供体葡萄糖或金橙 I 的对照处理中, 活菌数与起始浓度接近(图 2B)。以上结果表明, 只有葡萄糖存在时, HS01 才进行偶氮厌氧脱色, 该过程为微生物的生物化学反应; 在脱色过程中, 菌株能够获得能量进行生长,

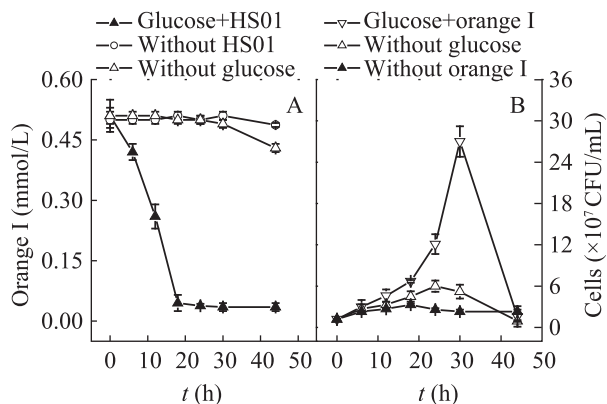


图2 HS01/金橙 I/葡萄糖体系中金橙 I 浓度(A)和活菌数(B)变化曲线

Fig. 2 Dynamic curves of active orange I (A) and cells number (B) in the HS01/orange I/glucose system

使菌体增殖, 表明偶氮脱色也是 HS01 厌氧呼吸代谢形式之一。30 h 后活菌数的迅速减少可能是由于脱色产物的毒性所致。

**2.1.2 脱色产物:** 分别在反应零点和 16 h 时, 对“葡萄糖+HS01”处理中的金橙 I 进行紫外-可见吸收光谱扫描, 结果见图 3。金橙 I 有 3 个特征吸收峰段, 分别为 230 nm、300 nm 附近和 480 nm 处。通过偶氮键而形成大的共轭体系的吸收在可见区(>400 nm), 萘环结构与苯环结构在紫外区, 且萘环结构的吸收峰较苯环结构有所红移, 因此, 3 个特征峰分别对应的是苯环、萘环和偶氮键。培养 16 h 后, 萘环与偶氮键吸光值均较零点下降明显, 在偶氮键特征峰 480 nm 处下降最快, 几乎降为 0。同时, 在 230 nm 处有新峰生成, 可能是受附近基团的影响苯环结构有所偏移所致。230 nm 处的吸光值明显高于零点苯环结构的吸光值, 表明脱色过程中生成新的苯环结构, 偶氮键断裂, 可能生成对氨基苯磺酸和对氨基萘酚。

## 2.2 HS01 偶氮还原脱色的影响因素

**2.2.1 电子供体种类:** 分别以甲酸、乙酸、丙酸、

柠檬酸、乳酸、丙三醇、乙醇、葡萄糖和蔗糖为电子供体, 研究不同电子供体对脱色的影响。图 4 为反应 30 h 时金橙 I 的脱色率: 含有柠檬酸、丙三醇、蔗糖和葡萄糖的反应体系, 脱色率达到 80%–90%; 含有乳酸和乙醇的体系, 金橙 I 浓度没有降低; 甲酸、乙酸、丙酸的体系中也未见脱色现象(数据未列出); 不加电子供体或 HS01 的对照, 均未见有脱色现象。以上结果表明, 菌株

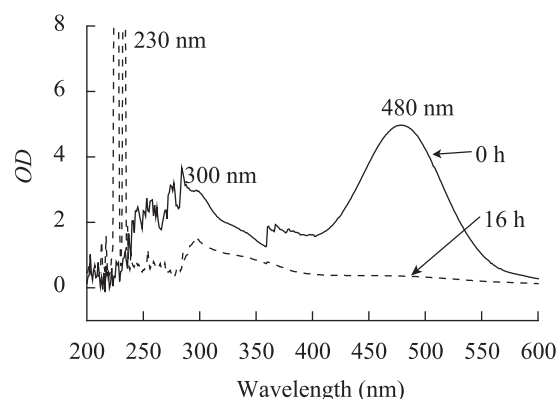


图3 HS01/金橙 I/葡萄糖体系中金橙 I 的紫外-可见扫描光谱变化曲线

Fig. 3 Wavelength scanning of anaerobic decolorization of orange I in HS01/orange I/glucose system

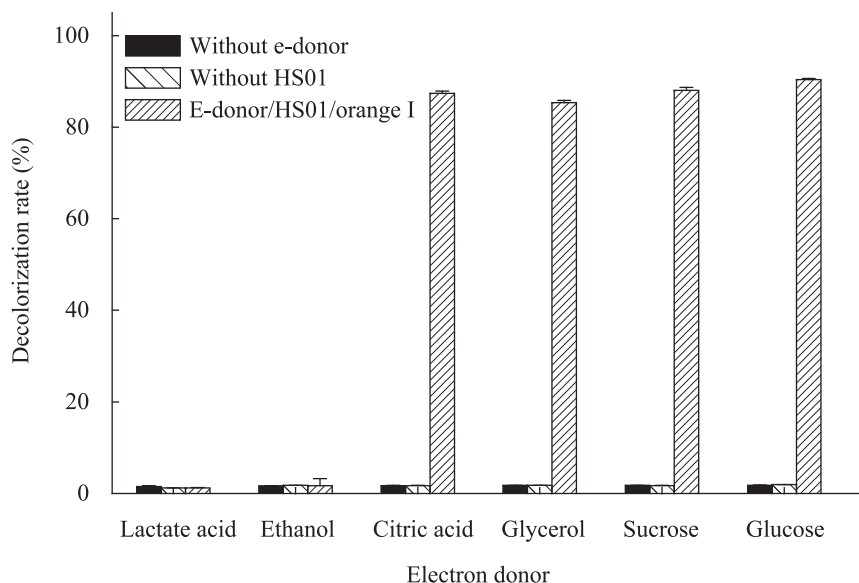


图4 电子供体种类对金橙 I 脱色的影响

Fig. 4 Effects of electron donor types on orange I decolorization by strain HS01 under anaerobic conditions

HS01 能以葡萄糖、蔗糖、柠檬酸和丙三醇作为电子供体, 进行偶氮还原脱色, 且脱色效率依次递减; 乙醇、乳酸等其余 5 种有机物不能作为有效的电子供体支持脱色。

**2.2.2 体系 pH:** 如图 5 所示, pH 为 5 和 10 时, 菌株对金橙 I 的脱色率为 0; pH 9 时, 12 h 的脱色率为 44%, 18 h 的脱色率达 60%, 之后趋于稳定; pH 6–8 的脱色趋势基本相同, 18 h 后脱色率稳定在 90% (图 5A); 不加菌的对照体系也有少许脱色现象, 脱色率为 1.6%–2.5%, 是还原糖葡萄糖与金橙 I 的化学反应所致(图 5B)。以上结果表明, HS01

还原金橙 I 的最适 pH 范围为 6–8, 过酸或过碱条件不利用反应。

**2.2.3 金橙 I 初始浓度:** 以葡萄糖为电子供体, 研究了不同金橙 I 初始浓度下, HS01 的偶氮脱色率, 结果如表 1 所示, 24 h 时, 0.5、1.0、2.0、5.0 mmol/L 初始浓度下, 金橙 I 的脱色率分别为 90.76%、87.71%、80.16%、15.46%, 表明金橙 I 初始浓度影响 HS01 对偶氮的脱色率, 初始浓度 2.0 mmol/L 内, HS01 可保持高脱色率, 5.0 mmol/L 金橙 I 对 HS01 偶氮脱色率有显著抑制作用。

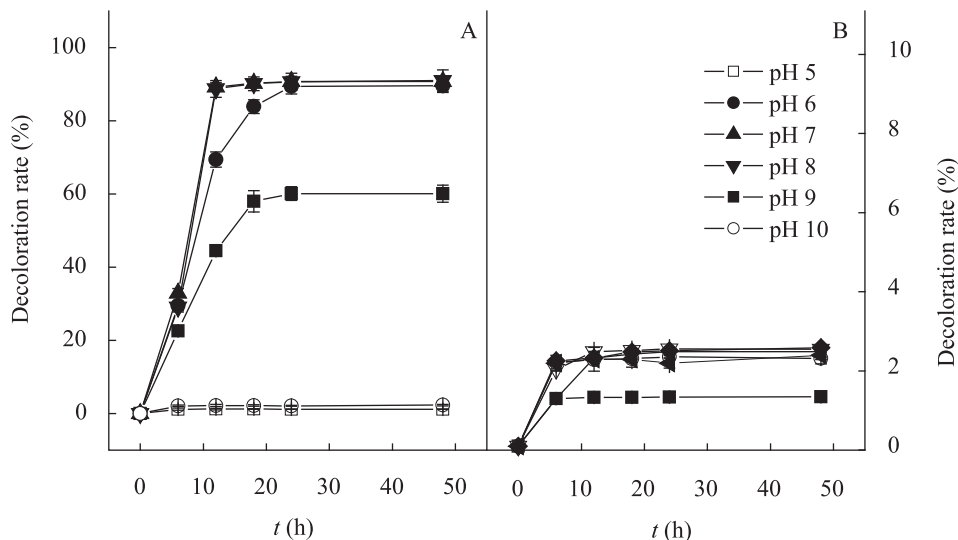


图 5 不同电子供体对金橙 I 脱色的影响

Fig. 5 Effects of electron donor on orange I decolorization by strain HS01 under anaerobic conditions

注: A: 葡萄糖+HS01+金橙 I; B: 葡萄糖+金橙 I.

Note: A: Glucose+HS01+orange I; B: Glucose+orange I.

表 1 HS01/金橙 I/葡萄糖体系中不同浓度金橙 I 对厌氧脱色的影响

Table 1 Effect of different orange I concentration on anaerobic decolorization in HS01/orange I/glucose system

反应时间 Reaction time (h)	金橙 I 脱色率 Decolorization rate (%)			
	0.5 mmol/L	1.0 mmol/L	2.0 mmol/L	5.0 mmol/L
6	32.94±0.064	10.11±0.059	4.56±0.021	1.13±0.010
12	89.29±0.136	74.05±0.094	58.45±0.067	12.02±0.033
18	90.27±0.098	80.79±0.108	66.19±0.082	15.02±0.054
24	90.76±0.079	87.71±0.089	80.16±0.121	15.46±0.051
48	90.74±0.141	87.80±0.101	84.11±0.099	15.48±0.063

### 2.3 铁氧化物对 HS01 偶氮还原的影响

构建“HS01+ $\alpha$ -FeOOH+葡萄糖+金橙 I”厌氧反应体系, 每 6 h 取样分析体系中金橙 I 浓度与生成的 Fe(II)浓度, 与 HS01 偶氮还原体系(HS01+葡萄糖+金橙 I)和异化铁还原体系(HS01+葡萄糖+ $\alpha$ -FeOOH)比较金橙 I 脱色率或 Fe(II)浓度, 以未加 HS01 或葡萄糖的处理作为对照。由图 6 可知, “HS01+ $\alpha$ -FeOOH+葡萄糖+金橙 I”复杂体系中, 同时检测到 Fe(II)的生成和金橙 I 的减少: (1) 44 h 脱色率达 95%, 而只含金橙 I 的脱色体系, 44 h 脱色率为 90%, 对照体系几乎没有脱色现象, 可见,  $\alpha$ -FeOOH 能够促进菌株 HS01 的偶氮还原脱色(图 6A); (2) 生成的总 Fe(II)动力学曲线与 HS01 异化铁还原体系的 Fe(II)生成曲线几乎重合, 金橙 I 的加入对 HS01 的异化铁还原没有影响(图 6B)。综上, 在“HS01+ $\alpha$ -FeOOH+葡萄糖+金橙 I”, Fe(III)还原与偶氮还原脱色两个过程同时发生, Fe(III)促进 HS01 偶氮脱色作用, 而金橙 I 不影响 HS01 的 Fe(III)还原。

## 3 讨论

微生物的厌氧偶氮还原是偶氮染料脱色降解

的一个重要途径。偶氮染料是极性化合物, 不易透过细胞膜, 因此认为偶氮还原脱色发生在细胞膜外: 胞内电子供体氧化产生的电子首先传递到细胞内膜, 经一系列还原活性电子载体, 最终传递到胞外偶氮结构, 使偶氮键断裂<sup>[2]</sup>。在这一过程中, 一部分菌体能够获得生长所需能量, 使菌体增殖, 称为偶氮呼吸, 是微生物胞外呼吸的一种方式。希瓦氏菌属是胞外呼吸研究最多的一类菌属, Hong 等(2007)报道, 脱色希瓦氏菌(*Shewanella decolorationis*) S12 能以甲酸为电子供体, 以偶氮染料为唯一电子受体进行偶氮呼吸, 在 4 mmol/L 甲酸氧化、2 mmol/L 苋菜红脱色的过程中, 菌体增殖 30 倍<sup>[6]</sup>。除偶氮外, S12 的胞外电子受体还有铁氧化物( $\alpha$ -FeOOH、柠檬酸铁)<sup>[15]</sup>、AQDS<sup>[16]</sup>及 DDT<sup>[10]</sup>。嗜水气单胞菌(*A. hydrophila*)也是一株典型的胞外呼吸菌, 硝酸盐、延胡索酸盐、Fe(III)、Co(III)、Se(VI)、AQDS、电极可作为该菌厌氧呼吸的唯一电子受体<sup>[12,14]</sup>。于文娟等(2012)发现嗜水气单胞菌 RB5-M1 在厌氧条件下能使偶氮染料活性黑脱色, 但对脱色机制未作解释<sup>[17]</sup>。

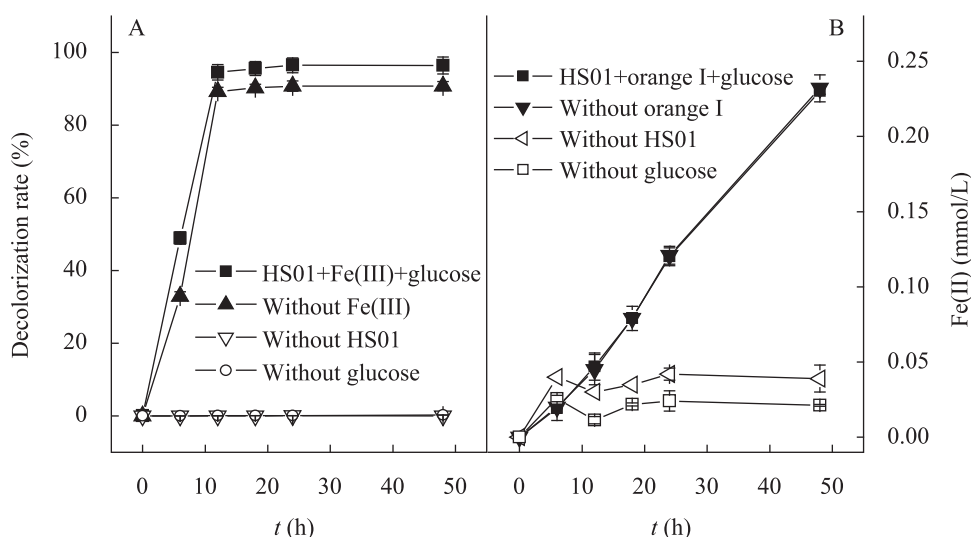


图 6 HS01/金橙 I/ $\alpha$ -FeOOH/葡萄糖体系中金橙 I 脱色率(A)和生成总 Fe(II) (B)的变化曲线

Fig. 6 Dynamic curves of decolorization (A) and total Fe(II) production (B) in the system of HS01/orange I/ $\alpha$ -FeOOH/glucose

本文以嗜水气单胞菌(*A. hydrophila*) HS01 为目标菌, 建立 HS01/偶氮染料/电子供体序批式厌氧反应体系, 研究 Fe(III)/腐殖质还原菌 HS01 的厌氧偶氮脱色机制。在嗜水气单胞菌 HS01/金橙 I/葡萄糖体系中, HS01 以葡萄糖为电子供体, 偶氮染料金橙 I 为唯一电子受体, 进行厌氧呼吸, HS01 对偶氮染料的脱色是通过偶氮呼吸途径进行; 呼吸过程中, 菌株对电子供体具有选择性, 可以作为电子供体被 HS01 利用的碳源为葡萄糖、蔗糖、柠檬酸、丙三醇, 因此, 添加不同电子供体会引起脱色率的差异。

Fe(III)/腐殖质微生物还原是厌氧环境中一种重要的电子转移途径, 该还原条件下[Fe(III)/腐殖质作为电子穿梭体]的污染物原位生物修复已成为国际热门领域<sup>[3-4]</sup>。在本文构建的“HS01/金橙 I/葡萄糖/ $\alpha$ -FeOOH 体系”, 金橙 I 的脱色机制为: (1) 微生物直接脱色机制: HS01 通过自身酶系作用, 将电子供体葡萄糖氧化生成小分子有机酸, 氧化过程中产生的电子通过呼吸链传递给氧化还原电位较高的金橙 I, 使其还原脱色; (2) Fe(III)介导脱氯机制:  $\alpha$ -FeOOH 通过 HS01 的厌氧呼吸作用被还原, 产生的 Fe(II)与 Fe(III)氧化物形成吸附态 Fe(II)物种, 吸附态 Fe(II)物种进一步将电子传递到金橙 I 使其还原, Fe(II)再次转化为 Fe(III)。可见, 在该复杂反应体系中, 偶氮脱色并非单纯的生物作用或者化学反应, 而是生物与非生物相互作用的过程, 腐殖质/Fe(III)还原菌 HS01 是核心驱动力, 而 Fe(III)是电子穿梭体, 它们协同促进作为电子供体的有机物矿化与作为末端电子受体的偶氮染料的还原脱色。

嗜水气单胞菌 HS01 电子供体利用谱广、兼性厌氧、生长 pH 范围宽、易于扩大培养, 该菌还具有还原脱氯、偶氮脱色特性, 因此在偶氮废水处理、有机氯污染土壤修复等领域具有开发应用潜力。

## 参 考 文 献

- [1] 杨清香, 贾振杰, 杨敏. 微生物染料脱色研究进展[J]. 微生物学通报, 2006, 33(4): 144-148.
- [2] 洪义国, 许玫英, 郭俊, 等. 细菌偶氮还原研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(5): 642-647.
- [3] Lovley DR, Holmes DE, Nevin KP. Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) reduction[J]. *Advances in Microbial Physiology*, 2004, 49: 219-286.
- [4] 武春媛, 李芳柏, 周顺桂. 腐殖质呼吸作用及其生态学意义[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1535-1542.
- [5] 黎慧娟, 彭静静. 异化 Fe(III)还原微生物研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1633-1642.
- [6] Hong YG, Xu MY, Jun G, et al. Respiration and growth of *Shewanella decolorationis* S12 with an azo compound as the sole electron acceptor[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(1): 64-72.
- [7] 许志诚, 洪义国, 罗微, 等. 厌氧条件下希瓦氏菌腐殖质还原对偶氮还原的影响[J]. 微生物学报, 2006, 46(4): 591-597.
- [8] Rau J, Knackmuss HJ, Stolz A. Effects of different quinoid redox mediators on the anaerobic reduction of azo dyes by bacteria[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(7): 149-1502.
- [9] 李晓敏, 李芳柏, 李永涛, 等. 有机氯脱氯转化的铁还原菌与铁氧化物界面的交互反应[J]. 科学通报, 2009, 54(13): 1880-1884.
- [10] Li FB, Li XM, Zhou SG, et al. Enhanced reductive dechlorination of DDT in an anaerobic system of dissimilatory iron-reducing bacteria and iron oxide[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1733-1740.
- [11] Li FB, Li XZ, Li XM, et al. Heterogeneous photodegradation of bisphenol a with iron oxides and oxalate in aqueous solution[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 311(2): 481-490.



- [12] 武春媛. Fe(III)/腐殖质还原菌的分离鉴定及其环境功能[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文, 2010.
- [13] Wu CY, Zhuang L, Zhou SG, et al. Fe(III)-enhanced anaerobic transformation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid by an iron-reducing bacterium *Comamonas koreensis* CY01[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2010, 71(1): 106–113.
- [14] Knight V, Blakemore R. Reduction of diverse electron acceptors by *Aeromonas hydrophila*[J]. Archives of Microbiology, 1998, 169(3): 239–248.
- [15] Xu MY, Guo J, Cen YH, et al. *Shewanella decolorationis* sp. nov., a dye-decolorizing bacterium isolated from activated sludge of a waste-water treatment plant[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2005, 55(1): 363–368.
- [16] Hong YG, Guo J, Xu ZC, et al. Humic substances act as electron acceptor and redox mediator for microbial dissimilatory azoreduction by *Shewanella decolorationis* S12[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2007, 17(3): 428–437.
- [17] 于文娟, 谢学辉, 洪武林, 等. 嗜水气单胞菌 RB5-M1的分离鉴定及脱色条件研究[J]. 微生物学通报, 2012, 39(4): 458–467.

~~~~~  
(上接 p.938)

## 征 稿 简 则

### 3.3 摘要写作注意事项

3.3.1 英文摘要: 1) 建议使用第一人称, 以此可区分研究结果是引用文献还是作者得出的; 2) 建议用主动语态, 被动语态表达拖拉模糊, 尽量不用, 这样可以避免长句, 以求简单清晰; 3) 建议使用过去时态, 要求语法正确, 句子通顺; 4) 英文摘要的内容应与中文摘要一致, 但可比中文摘要更详尽, 写完后务必请英文较好且专业知识强的专家审阅定稿后再返回编辑部。5) 摘要中不要使用缩写语, 除非是人人皆知的, 如: DNA, ATP 等; 6) 在英文摘要中, 不要使用中文字体标点符号。

3.3.2 关键词: 应明确、具体, 一些模糊、笼统的词语最好不用, 如基因、表达……

## 4 特别说明

### 4.1 关于测序类论文

凡涉及测定 DNA、RNA 或蛋白质序列的论文, 请先通过国际基因库 EMBL (欧洲)或 GenBank (美国)或 DDBJ (日本), 申请得到国际基因库登录号 (Accession No.)后再投来。

### 4.2 关于版权

4.2.1 本刊只接受未公开发表的文章, 请勿一稿两投。

4.2.2 凡在本刊通过审稿、同意刊出的文章, 所有形式的 (即各种文字、各种介质的)版权均属本刊编辑部所有。作者如有异议, 敬请事先声明。

4.2.3 对录用的稿件编辑部有权进行文字加工, 但如涉及内容的大量改动, 将请作者过目同意。

4.2.4 文责自负。作者必须保证论文的真实性, 因抄袭剽窃、弄虚作假等行为引发的一切后果, 由作者自负。

### 4.3 审稿程序及提前发表

4.3.1 来稿刊登与否由编委会最后审定。对不录用的稿件, 一般在收稿 2 个月之内通过 E-mail 说明原因, 作者登陆我刊系统也可查看。稿件经过初审、终审通过后, 作者根据编辑部返回的退修意见进行修改补充, 然后以投稿时的用户名和密码登陆我刊系统上传修改稿, 待编辑部复审后将给作者发稿件录用通知单, 稿件按照投稿先后排队发表。

4.3.2 对投稿的个人和单位一视同仁。坚持文稿质量为唯一标准, 对稿件采取择优先登的原则。如作者要求提前发表, 请在投稿的同时提出书面报告, 说明该研究成果的重要性、创新性、竞争性和提前发表的必要性, 经过我刊的严格审查并通过后, 可予提前刊出。

## 5 发表费及稿费

论文一经录用, 将在发表前根据版面收取一定的发表费并酌付稿酬、赠送样刊。

## 6 联系方式

地址: 北京市朝阳区北辰西路 1 号院 3 号中国科学院微生物研究所《微生物学通报》编辑部(100101)

Tel: 010-64807511

E-mail: tongbao@im.ac.cn

网址: <http://journals.im.ac.cn/WSWXTBCN>