

脱色菌群的富集及其对活性艳红 X-3B 的脱色效果

冯 栩, 刘 恒, 梁婧华, 夏丽娟, 杨 阳

(西华大学食品与生物工程学院, 成都 610039)

摘 要: 通过定向驯化法, 从实验室活性污泥处理系统中, 富集驯化出对活性艳红 X-3B 具有良好脱色性能的菌群 H1~H5, 针对其染料脱色性能进行了一系列研究。结果表明, 脱色菌群有一定的耐盐能力, 在盐度为 15%, 染料浓度 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 24 h 后脱色菌群 H5 的脱色率为 86%; 脱色菌群 H1~H5 在低染料浓度下能够快速脱色 ($< 600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 在 $800\sim 1500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度范围内, 经过 48 h 的培养后, 脱色率都能达到 95% 以上; 同时染料浓度为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 脱色菌群 H5 脱色的适宜 pH5~11, 温度 $25\sim 37^\circ\text{C}$, 培养时间 24 h, 脱色率达到 90% 以上; 脱色菌群 H5 对直接大红 4BS 和分散艳蓝 KN-R 有着良好的脱色性能, 培养 24 h, 脱色率达到 90% 以上。利用扫描电镜观察, 发现脱色菌群 H5 以杆菌为主。基于 Illumina Miseq 测序平台研究了脱色菌群 H5 的微生物菌群, 发现其中优势菌属为 *Alcaligenes* sp. 和 *Pseudomonas* sp., 所占比例分别为 55.78% 和 11.14%。

关键词: 定向驯化; 脱色菌群; 活性艳红 X-3B; 高通量测序

中图分类号: X788

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)05-0823-06

Enrichment of the decolorizing bacterial consortium and its decolorization effects on reactive brilliant red X-3B

FENG Xu, LIU Heng, LIANG Jinghua, XIA Lijuan, YANG Yang

(School of Food and Bioengineering, Xihua University, Chengdu 610039)

Abstract: The decolorizing bacterial consortium H1-H5 capable of decoloring reactive brilliant red X-3B effectively were screened out from an activated sludge treatment in a laboratory by the directional domestication and their decolorization performances were studied. Results showed that the decolorizing bacterial consortium showed certain salt tolerance in decolorization. The bacterial consortium H5 could remain a decolorization rate of 86% under 15% salinity and $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ reactive brilliant red X-3B after 24 h. The decolorizing bacterial consortium H1-H5 could quickly decolor at a low concentration of dye ($< 600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). In a range of $800\sim 1500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the decolorization rate could reach more than 95% after 48 h. At the same time, optimal conditions for the decolorization of reactive brilliant red X - 3B were pH 5-11, $25\sim 37^\circ\text{C}$ and culture for 24 h, and the decolorization rate was higher than 90% when the initial concentration of reactive brilliant red X-3B was $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. H5 had a good decolorization performance for direct scarlet 4BS and disperse brilliant blue KN-R, and the decolorization rate was higher than 90% after 24 h. Scanning electron microscope (SEM) revealed that the dominant bacteria were bacilli in the decolorizing bacterial consortium H5. Microbial community of the decolorizing bacterial consortium was investigated via Illumina MiSeq high throughput sequencing. The result indicated that *Alcaligenes* sp. (55.78%) and *Pseudomonas* sp. (11.14%) were two dominating bacteria.

Key words: directional domestication; decolorizing bacterial consortium; reactive brilliant red X-3B; high throughput sequencing

随着染料工业的迅速发展, 合成染料已达 3 万多种, 80% 以上的染料为含偶氮键、多聚芳香环的

复杂有机化合物^[1], 多数染料为有毒难降解有机物, 化学稳定性强, 具有致癌、致畸和致突变的“三致”

收稿日期: 2017-03-13

基金项目: 西华大学重点科研项目 (z1220409, z1520526), 四川省教育厅项目 (14ZB0125) 和四川省大学生创新创业训练计划项目 (201610623096) 共同资助。

作者简介: 冯 栩, 博士, 讲师。E-mail: fengxu@me.com

作用^[2-5]，再加上 PVA 浆料、人造丝皂化物以及大量新型助剂的广泛应用，使大量难降解的有机化合物进入废水，更增加了印染废水处理的难度。除此以外印染废水是典型的高盐废水^[6]，筛选高效降解染料的微生物是生物法处理的关键^[7]。

染料的生物降解过程需要多种酶的共同参与，对于单株纯培养的菌种来说，即使经过驯化和筛选，也难以在同一微生物体内产生种类多、活性高的各种酶^[8-9]。混合菌群在共代谢比较活跃，生物降解及矿化程度都有增长，而且依靠系统中形成的微生物群落的协同作用，才有可能得到染料降解反应所需的多种酶，从而使染料的降解更完全，脱色更彻底^[10-11]。本研究通过对盐环境（2%~3%）下培养的活性污泥系统进行定向驯化能够高效脱色活性艳红 X-3B 的菌群，研究其脱色性能以及培养特性，分析其能起到降解作用的关键因素，为印染废水的生物强化提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 材料

全温振荡培养箱（上海博讯），立式压力灭菌锅（上海博讯），722 型分光光度计（上海尤尼柯），高速台式离心机（上海安亭），扫描电子显微镜（日立 S-3400N）。

基础培养基：牛肉膏 3 g·L⁻¹，蛋白胨 10 g·L⁻¹，NaCl 5 g·L⁻¹，pH 为 7。染料培养基：基础培养基中加入一定浓度活性艳红 X-3B。

活性污泥来源：用于处理页岩气压裂返排液的 5 个活性污泥系统，呈棕褐色，絮状，SV₃₀ 为 30% 左右，由于页岩气压裂返排液的总矿化度为 20~30 g·L⁻¹，因此该污泥有一定的耐盐性能。

1.2 方法

（1）脱色菌群的驯化筛选过程。将实验室长期培养的不同培养条件的活性污泥系统 1[#]~5[#] 接入 5 个装有 100 mL 牛肉膏蛋白胨培养基锥形瓶中（活性艳红 X-3B 的浓度逐渐从 100~1 500 mg·L⁻¹），室温，静置培养，待脱色率达到 95% 以上，富集培养结束。

（2）菌群对染料的降解性能测定。菌群接种于基础培养基中，培养 24~48 h 后，按 10% 接种量接种菌液，加入不同染料浓度、不同盐度、不同 pH、不同染料等新鲜的染料培养基中培养一定时间后，进行降解性能测定。所有实验重复 3 次。

脱色率的测定：从染料培养基中取 5 mL 脱色液，在 5 000 r·min⁻¹ 下离心 8 min，以未加染料的

培养基作为空白，测定活性艳红 X-3B（538 nm）、直接大红 4BS（495 nm）、分散艳蓝 KN-R（584 nm）的吸光度。脱色率根据 $x = (A_0 - A_t) / A_0$ 计算，式中： A_0 为初始时刻染料的吸光度； A_t 为 t 时刻染料的吸光度。

菌群生长曲线的测定。将菌群按 10% 的接种量分别接种于 90 mL 基础培养基中，一定温度下培养一定时间，取 2 mL 发酵液，以灭过菌的基础培养基作为空白，在 600 nm 处测定其 OD₆₀₀，绘制生长曲线。

（3）脱色菌群的形态观察，将处于稳定期的菌液制片，在光学显微镜下观察，在染料平板培养基上培养 24 h 后观察；将处于稳定期的菌液离心、固定、干燥、喷金等一系列前处理后置于扫描电镜下观察。

（4）菌群群落结构分析。取 1 mL 新鲜混合菌液（脱色菌群 H5），将混合菌液交由上海美吉生物医药科技有限公司进行高通量测序，对其菌群群落结构进行分析。采用 Illumina Miseq 测序平台对 16SrRNA 基因进行测序，测序引物为 338F/806R，

338F: 5' -ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3'，

806R: 5' -G GACTACHVGGGTWTCTAAT-3'

使用 Trimmomatic、FLASH 软件对测序数据进行处理，获得干净数据。使用 97% 相似度的 OUT，利用 Mothur 做 Rarefaction 分析，利用 R 语言工具制作 Rarefaction 和 Rank-abundant 曲线。最终使用 Qiime 平台和 RDP classifier 软件得到菌群物种丰度统计信息。

2 结果与分析

2.1 脱色菌群的富集

将实验室长期培养的 5 个活性污泥系统（盐浓度 2%~3%）分别取 50 mL 活性污泥接入装有 100 mL 基础培养基的锥形瓶中，经过 3 个月的定向驯化，富集得到 5 组能够降解活性艳红 X-3B 的菌群 H1、H2、H3、H4 和 H5。

2.2 脱色菌群的脱色性能检测

2.2.1 培养方式对脱色菌群生长和脱色作用的影响
微生物对染料的脱色作用可以根据微生物对氧气的需求分为好氧脱色和厌氧还原^[12]。本研究考察了在染料培养基染料浓度 500 mg·L⁻¹，32℃，振荡培养（160 r·min⁻¹）和静置培养（缺氧），培养 12~24 h，考察培养方式对脱色菌群的影响。

从图 1 可以看出，氧对脱色菌群的脱色和生长有着重要的影响。12 h 培养后，脱色菌群振荡培养

的生长量高,但是脱色率低(H1~H5 的脱色率<40%),而静置培养的生长量低于振荡培养(静置培养的 OD_{600} <1.5),但脱色率高于振荡培养,而且脱色速率比振荡培养快,实验显示在静置培养 12 h 时,已完全脱色,而振荡培养 24 h 后,脱色才能够完全脱色。这说明氧气的存在对脱色有一定的抑制,特别是反应初期,因此后续实验中均采用静置培养。Wang 等^[13]利用芽孢杆菌 YZU1 脱色活性黑 5,发现在静置培养条件下活性黑 5 的脱色率比一定转速下摇床培养的脱色率高。谢学辉等^[11]发现氧对混合菌群 FF 的脱色和生长有重要影响,静置培养虽然生长量不是很高,但脱色率明显高于摇床培养。因此,可以推测脱色菌群对活性艳红 X-3B 的脱色机制为厌氧脱色。

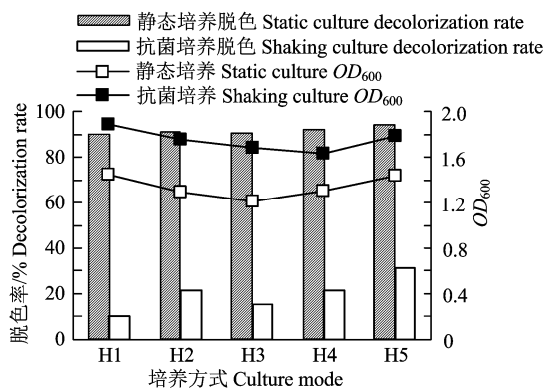


图 1 培养方式对脱色菌群的影响

Figure 1 Effects of cultivation mode on the decolorization rate of the decolorizing bacterial consortium

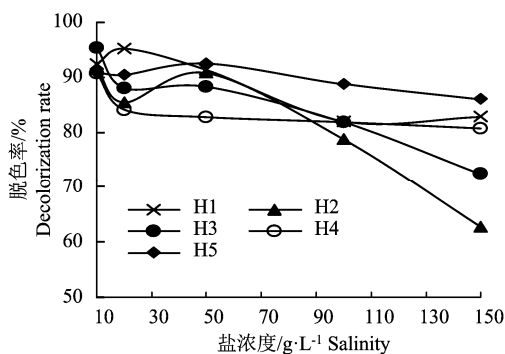


图 2 NaCl 对脱色菌群的脱色影响

Figure 2 Effects of NaCl concentration on decolorization rate of the decolorizing bacterial consortium

2.2.2 耐盐能力检测 印染过程中常会加入无机盐类,产生大量的含盐废水,而高盐度会导致微生物的脱色效果降低,降解性能变差。在不同盐度下,培养 24 h 后脱色菌群对活性艳红 X-3B 的脱色性能(染料培养基染料浓度 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $32 \text{ }^\circ\text{C}$, 静置培养)如图 2 所示。

从图 2 可以看出,在 NaCl 的加入量分别为 10、20、50、100 和 $150 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (盐度分别为 1%、2%、5%、10%和 15%)的情况下, H1~H5 的脱色率总体趋势是降低的,但脱色率变化情况不一样: H1 在盐度为 2%时脱色率达到峰值 (95.2%),随后逐渐降低,在盐度为 15%时,脱色率为 82.8%; H2 的脱色率由 91.7% (1%) \rightarrow 85.5% (2%) \rightarrow 90.8% (5%) \rightarrow 78.8% (10%) \rightarrow 62.7 (15%),先降低再升高,再降低,即在盐度为 5%时,还能一定程度地刺激菌群的脱色,而在盐度为 15%时,脱色率仅为 62.7%,说明高盐度能够抑制 H2 的脱色,对 H2 的脱色有较大的影响; H3 的脱色变化趋势与 H2 相似,在盐度为 15%时,脱色率为 72.4%。H4 的脱色情况随着盐度的增加,脱色率逐渐降低,但是降低幅度不大(降低约 11%);其中 H5 的耐盐性能最佳, H5 的脱色变化趋势与 H2 相似,先略有降低再升高(在 5%时脱色率为 92.5%),随着盐度增加再降低(在盐度为 15%时,脱色率为 86%),降低幅度约为 5%,说明盐度对菌群有一定的影响,一方面可能高盐度对菌群的生长有抑制,另一方面脱色酶的活性被盐度抑制。

2.2.3 脱色菌群对不同染料起始浓度的降解 将富集得到的脱色菌群 H1~H5 分别接种至染料浓度为 100 、 200 、 400 、 600 、 800 、 $1\ 000$ 、 $1\ 200$ 和 $1\ 500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的基础培养基中。由于在 $100\sim 600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度范围内,脱色的速度较快,因此在此浓度范围内记录肉眼观察到基本脱色的时间,脱色时间见图 3 (a)。从图 3 (a) 可见,在 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的染料浓度下,菌群都能在 6 h 内完全降解,其中 H5 的降解速度最快,仅 3 h 就能完全降解,随着染料浓度的增加,降解所需的时间延长。与紫色非硫光合细菌的混合菌种对染料活性艳红 X-3B 的脱色效果相似,小于 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,脱色效果很好^[14]。从图 3 (b) 可以看出,在 $800\sim 1\ 500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度范围内,经过 48 h 的培养后,脱色率都能达到 95%以上,处理效果很好。综合以上染料浓度可见,混合菌群 H5 表现出了更优秀的降解性能,能够更快更好的进行降解。因此在后续的研究中,以 H5 为研究对象。

2.2.4 初始 pH 对脱色菌群降解的影响 由于印染过程中通常会在碱性条件下进行,有些印染废水的 pH 高达 10,这将会抑制微生物进行脱色。本研究将脱色菌群 H5 分别接种至染料浓度为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (由于 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的脱色速度太快,不易观察,因此选用 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的染料浓度)的不同初始 pH 值的基础培养基中,考察脱色菌群的适应范围。

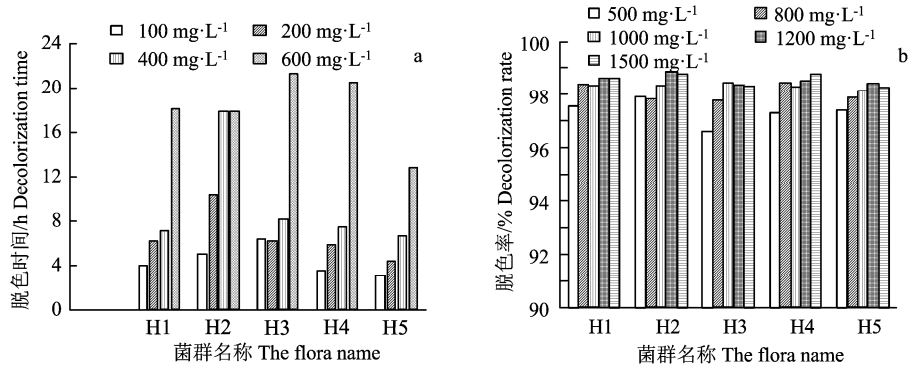


图 3 染料起始浓度对脱色菌群的影响

Figure 3 Effects of different initial concentrations of the dye of the decolorizing bacterial consortium

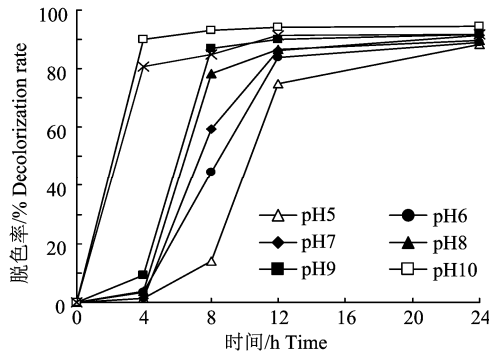


图 4 不同 pH 值对脱色菌群的影响

Figure 4 Effects of different pH value on the decolorization rate of the decolorizing bacterial consortium

从图 4 可以看出,脱色菌群 H5 对 pH 的适应范围广泛,与耐盐菌 GTY (pH 值 7~9)^[6]以及酸性大红嗜盐菌群^[15] (pH 值 5~10) 生长和脱色效果相比,脱色菌群 H5 在 pH 值的适应性方面有着独特的优势。在 pH5~pH11 的 24 h 的处理效果良好,均能达到 90%左右。在 pH5~pH9 时,4 h 时脱色慢,而且随着 pH 的增加,脱色率增加,8 h 时脱色速率也随着 pH 的增加而增高,在 12 h 时,脱色率能达到 75%以上;而 pH10 和 pH11 的条件下,4 h 的脱色率分别为 90.0%和 80.9%,其中, pH10 在 8 h 时达到 93.2%。由此可见,较高的 pH 对于脱色是有利的,能够在短时间内完成染料的降解,该脱色菌群更有优势。

2.2.5 温度对脱色菌群降解的影响 本研究将脱色菌群 H5 分别接种至染料浓度为 500 mg·L⁻¹ 的基础培养基中,在不同的温度 10、20、25、30、32、35、37 和 40 °C 下静置培养,培养 12 h 和 24 h 后,测其脱色率及在波长 600 nm 下的吸光度值。

由图 5 可以看出,菌群的脱色效果最适温度为 35 和 37 °C,其脱色率达 95%以上。在培养 12 h 时,10 和 20 °C 条件下,对活性艳红 X-3B 的脱色率低于

35%,在 10~37 °C 显示,提高温度有利于微生物脱色,但是当温度为 40 °C,脱色率下降为 64%;当培养时间为 24 h 时,可以发现脱色率都有增加,其中 20~37 °C 的脱色率均为 90%以上。而从其适宜生长温度来看,培养 24 h,在 10~35 °C 显示,提高温度有利于微生物生长,但是当温度为 37 °C 时,其吸光度比 35 °C 时的吸光度值低。从微生物生长及其脱色情况来看,35 °C 既有利于微生物生长,而且脱色效果也好。

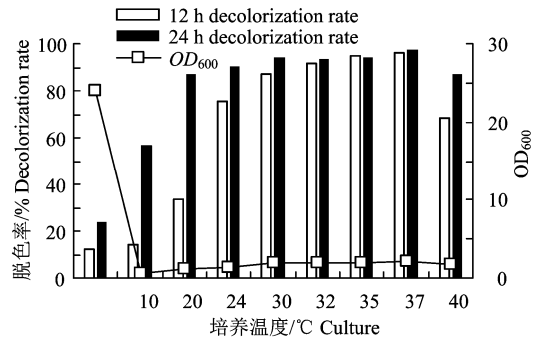


图 5 不同温度对脱色菌群的影响

Figure 5 Effects of different temperatures on the decolorization rate of the decolorizing bacterial consortium

2.2.6 脱色菌群对不同染料的处理效果 印染废水通常是含有多种染料的混合废水,这就要求微生物具有广泛的底物范围。本研究将富集得到的脱色菌群 H5 分别接种至含直接大红 4BS 和分散艳蓝 KN-R 浓度为 50 和 100 mg·L⁻¹ 的基础培养基中。培养 24 h 后,离心测定吸光度。从图 6 可以看出,脱色菌群对这 2 种染料具有不同的脱色能力,其中 H5 在处理 24 h 后能够将活性艳红 X-3B 完全脱色。直接大红 4BS 的脱色率分别为 84.3%和 68.4%,分散艳蓝 KN-R 的脱色率分别为 92.3%和 85.4%,这说明脱色菌群 H5 对其他染料也有一定的脱色效果,只不过效果不如活性艳红的处理效果明显。

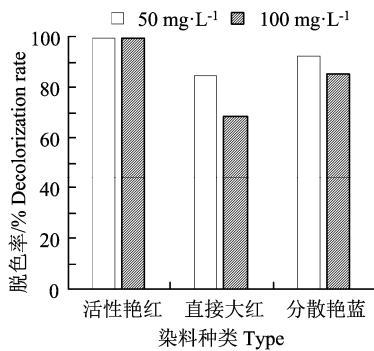
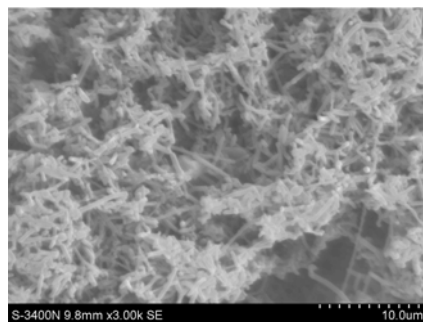


图 6 不同染料对脱色菌群的脱色影响

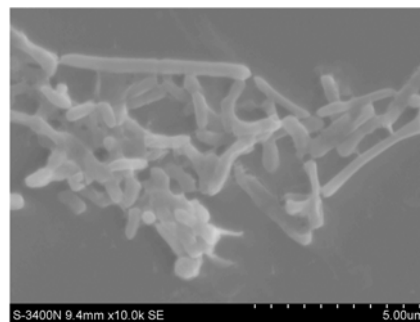
Figure 6 Decolorization on different dyes by the decolorizing bacterial consortium

2.3 脱色菌群的形态学观察

将脱色菌群 H5 接种于含染料的固体基础培养基上, 在 35℃ 恒温培养箱中培养 24 h 规整, 易挑起。脱色菌群 H5 的扫描电镜照片如图 7 所示, 该脱色菌群形态不一, 以杆菌为主, 短杆和长杆状, 这也说明脱色菌群中杆菌为优势菌群。后观察发现, 脱色菌群 H5 的菌落大都呈浅黄色和乳白色, 有光泽,



(a) ×3 000 倍



(b) ×10 000 倍

图 7 脱色菌群 H5 的扫描电镜照片

Figure 7 SEM images of the decolorizing bacterial consortium H5

表 1 属水平上物种丰度

Table 1 Species richness on the level of genus

细菌 Bacterial	丰度/% Abundance
产碱杆菌 <i>Alcaligenes</i>	55.78
假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	11.14
<i>Proteiniphilum</i>	7.50
<i>Synergistaceae-unclassified</i>	4.10
<i>Blvii28_wastewater-sludge_group</i>	2.42
<i>Synergistaceae_uncultured</i>	2.19
<i>Sedimentibacter</i>	1.89
<i>OPB54_norank</i>	1.89
<i>Family_XI_uncultured</i>	1.87
<i>Petrimonas</i>	1.19

对脱色菌群 H5 的微生物菌群进行解析, 该脱色菌群的微生物主要可以分为 4 大类门, 丰度最高

湿润无气味, 边缘规整, 易挑起。脱色菌群 H5 的扫描电镜照片如图 7 所示, 该脱色菌群形态不一, 以杆菌为主, 短杆和长杆状, 这也说明脱色菌群中杆菌为优势菌群。

2.4 脱色菌群微生物群落结构解析

对测序获得的原始序列进行质控后, 得到可用于分析的有效序列 38 801 条, 这些序列平均长度为 444.82 bp, 表明污泥具有较大样本序列数量且平均长度合适, 可以进行后续微生物多样性分析。微生物多样性指数包括序列数量 38 801, OUT 数量 74, Shannon 指数 1.98, ACE 指数 78, Chao1 指数 81, 覆盖率 0.97, Simpson 指数 0.3303。从多样性统计结果可以看出, 样品的群落多样性不高, 分析其原因可能由于该反应体系长期处于染料浓度很高的环境, 对极端环境的适应性很强, 脱色菌群保持了其高效专一的特性, 导致微生物群落多样性较差。这一实验结果证明微生物群落多样性变化与培养过程选择性培养方式密切相关。

的是变形菌门 (Proteobacteria, 相对丰度为 68.4%), 其次是拟杆菌门 (Bacteroidetes, 相对丰度 13.02%), 再次是厚壁菌门 (Firmicutes, 相对丰度 12.11%)、最后是互养菌门 (Synergistetes, 相对丰度 6.29%)。为了更清晰了解脱色菌群的菌属特征, 分析该脱色菌群的属水平。表 1 列出了脱色菌群 H5 相对丰度最高的前 10 个属。结果表明, 在属分类水平, 优势类群 (相对丰度 > 10%) 主要包括产碱杆菌属和假单胞菌属。产碱杆菌 (*Alcaligenes*) 属于变形菌门、甲烷氧化菌纲 (Betaproteobacteria)、伯克氏菌目 (*Burkholderiales*)、产碱杆菌科 (*Alcaligenaceae*)。产碱杆菌属所占比例为 55.78%, 为菌群中含量最多的微生物菌属, 产碱菌属曾在农产品降解过程中出现^[16], 对重金属有较强的耐性, 该菌在染织废水的

脱色处理上也曾出现^[17]。产碱杆菌与脱色菌群的脱色能力密切相关,是脱色菌群 H5 的降解染料的功能菌属。假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 属于变形菌门、 γ -变形菌纲 (*Gammaproteobacteria*)、假单胞菌目 (*Pseudomonadales*) 和假单胞菌科 (*Pseudomonadales*)。假单胞菌属所占比例为 11.14%,为菌群中含量较多的微生物菌属,假单胞菌属曾在多种污染物的降解过程中出现^[18],对染化废水中典型类持久性有机污染物的去除^[19]、石油类^[20]及多环芳烃^[21]的降解都有显著的效果。基于以上结果分析,可以推断发生的染料降解是由产碱杆菌和假单胞菌为主导的生物降解过程,在染料处理系统中已经形成了稳定的微生物群落结构,使得染料通过协同作用得以去除。

3 结论

从实验室长期运行的活性污泥系统中,富集筛选出对活性艳红 X-3B 具有良好脱色性能的混合菌群 H1~H5。对脱色菌群的性能进行研究,发现混合菌群 H1~H5 能够在 10~150 g·L⁻¹ 的盐度范围内高效脱色活性艳红 X-3B,并且对染料的脱色能力强,在染料浓度低于 600 mg·L⁻¹ 时,能够在短时间内完成脱色(100 mg·L⁻¹ 的染料浓度最短能够在 4 h 内脱色),在染料浓度 800~1 500 mg·L⁻¹ 经过 48 h 的培养后,也能够达到 95% 的去除率。

对脱色菌群 H5 的脱色条件进行研究,其生长和脱色的最佳温度为 35℃,最适 pH 值为 10,能够在碱性条件下实现高效降解。该菌群的温度适应范围广(20~37℃),pH 适应范围也广(pH5~11),可以脱色直接大红 4BS 和分散艳蓝 KN-R,有利于实际印染废水混合染料的处理。脱色菌群 H5 的扫描电镜照片显示脱色菌群中的优势菌为杆状菌。

对脱色菌群 H5 的微生物菌群进行解析,在门水平,该脱色菌群的丰度最高的是变形菌门 (*Proteobacteria*, 相对丰度为 68.4%),在属分类水平,优势类群(相对丰度 > 10%) 主要包括产碱杆菌属和假单胞菌属。结合现有文献,可以推断发生的染料降解是由产碱杆菌和假单胞菌为主导的生物降解过程,在染料处理系统中已经形成了稳定的微生物群落结构,使得染料通过协同作用得以去除。

参考文献:

- [1] TAN L, NING S, WANG Y, et al. Aerobic decolorization of Acid Brilliant Scarlet GR by microbial community and the community dynamics during sequencing batch processes[J]. *World J Microb Biot*, 2013, 29(10): 1763-1771.
- [2] 胡景华,朱向东,孔令保,等.一株嗜热偶氮染料脱色菌的分离鉴定及其脱色特性[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(8): 4563-4568.
- [3] STOLZ A. Basic and applied aspects in the microbial degradation of azo dyes[J]. *Appl Microbiol Biot*, 2001, 56(1): 69-80.
- [4] TURHAN K, DURUKAN I, OZTURKCAN S A, et al. Decolorization of textile basic dye in aqueous solution by ozone[J]. *Dyes Pigments*, 2012, 92(3): 897-901.
- [5] OGUGBUE C J, SAWIDIS T, ORANUSI N A. Evaluation of colour removal in synthetic saline wastewater containing azo dyes using an immobilized halotolerant cell system[J]. *Ecol Eng*, 2011, 37(12): 2056-2060.
- [6] KHALID A, ARSHAD M, CROWLEY D E. Decolorization of azo dyes by *Shewanella* sp. under saline conditions[J]. *Appl Microbiol Biot*, 2008, 79(6): 1053-1059.
- [7] 俞承志,谢学辉,郑秀林,等.活性黑 5 的生物脱色,复色现象及机理[J]. *化工进展*, 2016, 35(9): 2987-2996.
- [8] 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 E*, 2011, 42(1): 138-157.
- [9] 惠丰立,牛秋红,刘征,等.活性红 BF-3BN 脱色菌群的构建及特性研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(7): 1538-1541.
- [10] 廖欢,严滨,黄国和,等.一株高效广谱染料脱色菌脱色条件的优化[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(9): 3649-3656.
- [11] 谢学辉,范凤霞,袁学武,等.高效混合菌群 FF 的筛选及其对活性黑 5 的脱色作用[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2013, 39(6): 802-813.
- [12] PANDEY A, SINGH P, IYENGAR L. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes[J]. *Int Biodeter Biodegr*, 2007, 59(2): 73-84.
- [13] WANG Z W, LIANG J S, LIANG Y. Decolorization of Reactive Black 5 by a newly isolated bacterium *Bacillus* sp. YZU1[J]. *Int Biodeter Biodegr*, 2013, 76: 41-48.
- [14] 赵亮,李兰生,刘金雷.染料活性艳红 X-3B 的微生物脱色研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(9): 34-35.
- [15] 郭光,王艳华,田芳,等.酸性大红嗜盐菌群的富集及脱色效果[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(2): 631-636.
- [16] YUSUF I, AHMAD S A, PHANG L Y, et al. Keratinase production and biodegradation of polluted secondary chicken feather wastes by a newly isolated multi heavy metal tolerant bacterium-*Alcaligenes* sp. AQ05-001[J]. *J Environ Manage*, 2016, 183: 182-195.
- [17] 成应向,李瑾,余昱.高絮凝活性菌株的筛选及其处理效果研究[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(9): 90-92.
- [18] 李晶,饶婷,李巍,等.恶臭假单胞菌 (*Pseudomonas putida* LY1) 共代谢降解苯酚和 4-氯苯酚系统的降解动力学研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(10): 2109-2116.
- [19] 钱勇兴.假单胞菌属对染化废水中典型类持久性有机污染物的去除作用机理研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [20] 于彩虹,赵粉红,吴东奎,等.一株假单胞菌 (*Pseudomonas*) SYBS01 降解石油的特性[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(10): 6042-6048.
- [21] 黄兴如,张彩文,张瑞杰,等.多环芳烃降解菌的筛选,鉴定及降解特性[J]. *微生物学通报*, 2016, 43(5): 965-973.