

## 中度嗜盐菌群对酸性大红 GR 的脱色性能研究

郭光<sup>1</sup> 田芳<sup>1</sup> 刘妍<sup>1</sup> 刘廷凤<sup>1</sup> 丁克强<sup>1</sup> 刘翀<sup>2\*</sup>

(1. 南京工程学院环境工程学院 江苏 南京 211167)

(2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 北京 100081)

**摘要:**【目的】获得能够在高盐环境下脱色偶氮染料的高效脱色菌群，应用于印染废水的生物处理。【方法】采用在 5% 盐度培养基富集的方法，从印染废水的活性污泥中富集能够在 5% 盐度下脱色酸性大红 GR 的嗜盐混合菌群，利用高通量测序方法研究其群落结构，利用静置培养的方法研究其脱色性能。【结果】该菌群可以在 5% 盐度、静置培养下 15 h 内将 100 mg/L 的酸性大红 GR 几乎完全脱色，主要由 *Halomonas*、*Salinicoccus*、*Nitratireductor* 和 *Aequorivita* 等 4 个属组成，*Halomonas* 是主要的脱色菌。高浓度的  $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaCl}$  抑制菌群的脱色，其中  $\text{NaNO}_3$  抑制作用最强。该菌群的最佳脱色条件是在 pH 7.0、盐度 5%、30 °C 脱色效果最好，可脱色直接耐黑 G 和分散深蓝 S-3BG 等偶氮染料，并且具有连续脱色的能力。【结论】嗜盐菌群在处理偶氮染料废水中具有良好的应用价值。

**关键词:** 酸性大红 GR，脱色，中度嗜盐菌群，盐度，偶氮染料

## Decoloring acid scarlet GR by a moderately halophilic bacterial consortium

GUO Guang<sup>1</sup> TIAN Fang<sup>1</sup> LIU Yan<sup>1</sup> LIU Ting-Feng<sup>1</sup> DING Ke-Qiang<sup>1</sup> LIU Chong<sup>2\*</sup>

(1. College of Environmental Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China)

(2. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Beijing 100081, China)

**Abstract:** [Objective] To obtain efficient decoloration bacterial consortium, which were able to degrade azo dyes in high salt environment and to biodegrade the dyeing wastewater. [Methods] A moderately halophilic bacterial consortium degrading of acid scarlet GR was enriched from activated sludge of dyeing wastewater. The community structure of the bacterial consortium was studied by

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 31600091, 51608257, 31402117); The Talent-Recruiting Program of Nanjing Institute of Technology (No. YKJ201528); Undergraduate Scientific and Technological Innovation Project of Nanjing Institute of Technology (No. TB201712001)

\*Corresponding author: E-mail: liuchong@caas.cn

**Received:** February 17, 2017; **Accepted:** April 07, 2017; **Published online** (www.cnki.net): May 03, 2017

基金项目：国家自然科学基金项目(No. 31600091, 51608257, 31402117)；南京工程学院人才引进项目(No. YKJ201528)；南京工程学院大学生科技创新项目(No. TB201712001)

\*通讯作者：E-mail: liuchong@caas.cn

收稿日期：2017-02-17；接受日期：2017-04-07；优先数字出版日期(www.cnki.net)：2017-05-03

high-throughput sequencing method, and the decoloring performance was studied under static condition. **[Results]** The moderately bacterial consortium was mainly composed by *Halomonas*, *Salinicoccus*, *Nitratireductor* and *Aequorivita*, *Halomonas* was the main decoloring bacteria. The degradation was inhibited by high concentration of NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaNO<sub>3</sub>, of which the strongest inhibition is NaNO<sub>3</sub>. The optimal decolorization conditions were as follows: pH 7.0, 30 °C, 5% NaCl. The moderately halophilic bacterial consortium could also degrade direct black 19 and disperse deep blue S-3BG. After continuous bleaching for 5 rounds, the degradation rate still reached over 98%. **[Conclusion]** The moderately halophilic bacteria consortium has strong potential to treat azo dye contaminated wastewater.

**Keywords:** Acid scarlet GR, Decoloring, Moderate halophilic bacterial consortium, Salinity, Azo dye

随着印染工业的发展, 印染废水已成为当前主要的工业废水之一, 总废水排放量排名第三<sup>[1]</sup>。在印染过程中约有 10%–15% 的染料随废水排入环境<sup>[2]</sup>, 每年约有 7.56–15.12 万 t 染料随废水直接进入水体环境<sup>[3]</sup>, 从而对环境造成了巨大的污染。染料废水具有色度深、有机污染物含量高、成分复杂、生物毒性大、难生物降解、盐度高等特点。所有染料中, 偶氮染料占染料总量的 80% 左右<sup>[4]</sup>, 其降解产物-苯胺类化合物具有致畸、致癌、致突变性<sup>[5-6]</sup>, 已成为威胁我国水环境安全的重要因素之一<sup>[7]</sup>。因此, 偶氮染料废水处理的研究备受关注。

目前国内外处理印染废水的技术主要有物理法、化学法、生物法。在长期的实际应用中虽然物理、化学处理法的脱色率高, 但 COD 去除率较低, 且处理费用较高, 处理不当还会产生二次污染<sup>[8]</sup>。与物理、化学处理相比, 生物处理法因具有成本低、操作简单、不会产生二次污染等优点被广泛采用<sup>[9]</sup>。印染废水的显著特点是含盐量较高, 为了提高印染效率加入无机盐(NaNO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaCl 和 NaOH 等)<sup>[10]</sup>和为了调整染料 pH 添加 NaOH 导致盐度升高<sup>[11]</sup>。因此, 染料废水属于典型的高盐工业废水, 是公认的最难处理的高浓度有机废水之一。然而, 非嗜盐微生物很难在高盐环境下发挥其降解作用, 利用中度嗜盐菌来降解高盐度的印染废水就显得尤为重要。目前, 关于嗜盐菌脱色偶氮染料的研究很多<sup>[12]</sup>, 大部分都是关于嗜盐菌的分离及脱色特性研究<sup>[13]</sup>。菌群中细菌的协同作用使得微生物菌群的适应性更强, 便于

规模化应用。但是, 目前关于嗜盐菌群脱色偶氮染料的研究较少<sup>[14]</sup>。因此, 富集能够在高盐环境下脱色偶氮染料的嗜盐菌群具有很高的应用价值和前景。

基于此, 本实验以偶氮染料酸性大红 GR 为底物, 富集了在 5% 盐度下对其高效脱色的中度嗜盐菌群, 并对其脱色条件及性能进行研究, 为印染废水的生物强化处理提供菌种及实验依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 主要仪器、试剂、培养基和菌群

全温振荡培养箱(HZQ-F160 型), 常州杰博森仪器有限公司; 立式压力灭菌锅(LDZX-50KBS), 上海申安医疗器械厂; 紫外可见分光光度计(SHIMAZUUV-2550), 日本岛津公司; TGL-20B 高速台式离心机, 上海安亭科学仪器厂; MiSeq 平台, 美国 Illumina 公司。土壤 DNA 提取试剂盒, MoBio 公司。

5% 无机盐培养基(g/L): Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5; NH<sub>4</sub>Cl 0.3; CaCl<sub>2</sub> 0.1; KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.2; KCl 0.5; MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 6.0; NaCl 40.0, 酵母粉 0.5, pH 7.0, 1×10<sup>5</sup> Pa 灭菌 30 min。

模拟印染废水: 5% 的无机盐培养基中加入酸性大红 GR。

中度嗜盐菌群: 将 10 mL 江苏某印染厂的活性污泥接入 90 mL 5% 的无机盐培养基锥形瓶中(酸性大红 GR 浓度为 100 mg/L), 30 °C、150 r/min 振荡培养, 待脱色率达到 80% 以上, 取 10% 的浊液接种到新鲜的 5% 无机盐培养基中(酸性大红 GR 浓度为

100 mg/L)。如此循环 8 代, 富集培养结束。

## 1.2 菌群组成分析

采用 Fast DNA Spin Kit 提取试剂盒提取微生物基因组 DNA。采用高通量测序的方法获得微生物的 16S rRNA 基因序列, 在 Illumina MiSeq PE250 高通量测序仪上测序(上海美吉生物医药科技有限公司)。测序引物分别为 515F (5'-GTGCCAGCMGC CGCGG-3')和 907R (5'-CCGTCAATTCMTTTRAGT TT-3')。20  $\mu$ L PCR 反应体系: rTaq 酶 0.2  $\mu$ L, 10 $\times$ PCR buffer 2.0  $\mu$ L, 20.5 mmol/L dNTPs 2  $\mu$ L, 5  $\mu$ mol/L 引物 515F 和 907R 各 0.8  $\mu$ L, 25 mg/L 模板 DNA 10 ng, 无菌 ddH<sub>2</sub>O 补足至 20  $\mu$ L。PCR 反应条件: 95  $^{\circ}$ C 3 min; 95  $^{\circ}$ C 30 s, 55  $^{\circ}$ C 30 s, 72  $^{\circ}$ C 45 s, 35 个循环; 72  $^{\circ}$ C 10 min。对所有序列进行筛选和拼接后根据 16S rRNA 基因序列之间的相似度以 97%作为阈值将有效序列分成操作分类单元(Operational taxonomic unit, OTU), 并确定每个 OTU 的代表序列。将代表性序列与 RDP classifier 数据库(<http://rdp.cme.msu.edu/misc/resources.jsp>)和 Silva 数据库(<http://www.arb-silva.de/>)中的已知数据进行比对和物种注释, 并在门、纲、目、科、属、种水平统计群落结构。

## 1.3 菌群脱色酸性大红 GR 的不同影响因素

为了研究中度嗜盐菌群对酸性大红 GR 的脱色效果, 将菌群置于含酸性大红 GR 的 5%盐度的培养基中, 30  $^{\circ}$ C 静置培养, 12 h 后 4 000 r/min 离心 5 min 收集菌体, 用 5%无机盐培养基洗涤菌体 2 次, 菌体悬浮于 5%无机盐培养基中, 摇匀后取 1 mL 菌液加入到不同盐度、pH、温度和酸性大红 GR 浓度的新鲜 5%盐度培养基中(染料浓度为 100 mg/L)。

连续脱色测试: 以 10% (体积比)接入到含有 90 mL 酸性大红 GR 染料(100 mg/L)-5%盐度培养基的 250 mL 培养瓶中, 30  $^{\circ}$ C 静置培养 15 h 后测定脱色率。同时取出菌体, 转接于新的含有 90 mL 酸性大红 GR 染料(100 mg/L)-5%盐度的培养基中, 继续脱色 15 h, 重复 5 次。实验设 3 次重复。

## 1.4 酸性大红 GR 浓度的测定及脱色率的计算

将活化后的菌群接种到新鲜的 5%盐度的培养基中, 每隔 4 h 从含染料的培养基中取出 2 mL 脱色液, 10 000 r/min 离心 5 min, 以未加染料的培养基作为空白, 在 510 nm 波长处测定其吸光度。根据公式(1)计算脱色率:

$$\text{脱色率 } q (\%) = (A_0 - A_t) / A_0 \times 100 \quad (1)$$

$A_0$  为初始时刻染料的吸光度;  $A_t$  为  $t$  时刻染料的吸光度。

## 1.5 菌株脱色染料广谱性研究

取 1 mL 1.3 中的重悬菌液加入到含有不同偶氮染料(100 mg/L)的 5%无机盐培养基中, 实验底物包括直接耐黑 G、分散艳兰 S-3BG 和活性艳红 X-3B。15 h 后取 2 mL 脱色液 10 000 r/min 离心 5 min, 以未加染料的培养基作为空白, 分别测定 0 和 15 h 染料的吸光度, 直接耐黑 G、分散艳兰 S-3BG 和活性艳红 X-3B 的检测波长分别为 646、590 和 539 nm。按照公式(1)计算脱色率。实验设 3 次重复。

## 2 结果与讨论

### 2.1 菌群的富集

经过 8 次富集获得了一个能够在高盐环境下脱色酸性大红 GR 的中度嗜盐菌群。如图 1 所示, 该

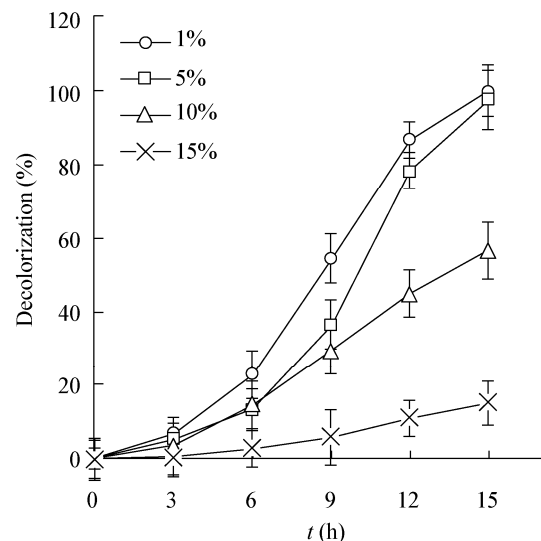


图 1 NaCl 对中度嗜盐菌群脱色的影响

Figure 1 Effects of NaCl concentration on decolorization of acid brilliant scarlet GR by the halophilic bacterial consortium

菌群能在 15 h 内将 100 mg/L 的酸性大红 GR 几乎完全脱色(98.2%)。该菌群脱色效率高,因此具有较高的应用潜力。研究了静置和摇动培养条件下中度嗜盐菌群对酸性大红 GR 脱色的影响,结果表明,15 h 后静置培养的脱色率(98.2%)显著高于好氧状态(75.3%)下的脱色率,这与谢学辉等<sup>[15]</sup>的研究结果相同。氧气抑制了微生物偶氮还原酶的活性,这可能是由于氧气比染料更容易成为电子受体<sup>[16]</sup>。从运行成本和脱色效率的角度考虑,后续实验采用静置的方法研究其它参数或影响因素对脱色的影响。

## 2.2 中度嗜盐菌群的群落结构

高通量测序的结果表明(图 2),该菌群主要由 *Halomonas*、*Salinicoccus*、*Nitratireductor*、*Aequorivita*、*Marinobacter*、*Exiguobacterium* 和 *Microbacterium* 等组成。其中 *Halomonas*、*Salinicoccus*、*Nitratireductor* 和 *Aequorivita* 是主要的菌属,分别占全部序列的 58.4%、8.2%、7.8%和 6.0%。*Halomonas* 属是 Halomonadaceae,代表嗜盐微生物,很多研究发现其可以在高盐环境下降解碳氢化合物<sup>[17]</sup>。*Halomonas* 也是本课题组前期富集的一个能在 10%盐度下脱色酸性大红 GR 的嗜盐菌群的主要菌属,占全部序列的 98.8%<sup>[18]</sup>。*Halomonas* 可在高盐环境下脱色偶氮染料<sup>[19-20]</sup>。本研究富集的中度嗜盐菌群中 *Halomonas* 占全部序列的 58.4%,是脱色酸性大红 GR 主要菌属。目前该菌已经被分离纯化,相关工作正在进行中。*Salinicoccus* 属于中度嗜盐菌,本课题组前期富集的脱色酸性大红 GR 菌群中也发现了该菌<sup>[18]</sup>。*Nitratireductor* 是催化硝酸盐还原为亚硝酸盐但不能还原亚硝酸盐为氮气的细菌。到目前为止,*Nitratireductor* 共有 8 种,大部分是从海洋中分离纯化的<sup>[21]</sup>,还没有关于该菌脱色偶氮染料的报道,本研究首次发现 *Nitratireductor* 参与偶氮染料的脱色,其可能是参与酸性大红 GR 中 N 的降解。*Aequorivita* 属于 Flavobacteriaceae,大部分从海洋中分离得到,在降解复杂有机物中起重要作用<sup>[22]</sup>,但是还没有其

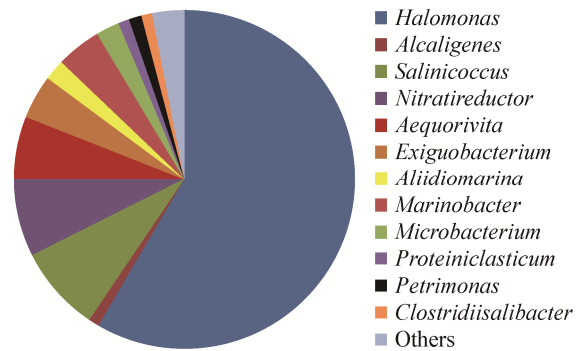


图 2 嗜盐微生物菌群的群落结构

Figure 2 Community structure of the halophilic bacterial consortium

脱色染料的报道。因此,本实验富集的脱色酸性大红 GR 的嗜盐菌群中,*Halomonas* 是脱色酸性大红 GR 的主要菌属。

## 2.3 盐度对中度嗜盐菌群脱色的影响

印染过程中为提高印染效率加入大量的无机盐,导致印染废水的含盐量都很高。高盐使细菌细胞脱水,导致细菌降低或丧失脱色染料能力。高盐环境下,普通的微生物处理印染废水的效率降低<sup>[23]</sup>。相反,嗜盐微生物可以在高盐环境下发挥作用。在 5%盐度下富集的嗜盐菌群,在 1%和 5%的盐度下,15 h 的脱色率几乎都达到 100%;在 10%和 15%盐度下,15 h 的脱色率为 56.5%和 15.1% (图 1);在 20%盐度下,几乎完全抑制了菌群的脱色(结果没有显示)。盐度过高会使微生物质壁分离,抑制细菌的活性,使微生物的脱色效率下降<sup>[23]</sup>。本课题组前期用 10%的 LB 培养基富集的微生物菌群在 5%的盐度下,12 h 的脱色率就达到 98.5%,可能是培养基的营养丰富,提高了菌群的脱色能力<sup>[18]</sup>。目前,一些脱色偶氮染料的嗜盐菌或耐盐菌已经被分离出来<sup>[24]</sup>,它们在高盐环境下显示出较好的脱色效果(5%–15%),但是盐度过高会抑制微生物的脱色效果,可能是盐度影响了偶氮还原酶的活性<sup>[25]</sup>。本文所富集的菌群在盐度 1%–10%范围内脱色率均可达 50%以上,因此该菌群具有在高盐环境下对染料脱色的能力。

印染过程中添加大量的  $\text{NaNO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  会影

响微生物对染料的脱色效果。因此, 研究盐度对微生物脱色的影响有很重要的意义。 $\text{NaNO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  抑制了嗜盐微生物对酸性大红 GR 的脱色(图 3)。在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  浓度为 1% 和 2% 时, 15 h 内脱色率均可达 100% 和 88.9%。但随  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  浓度的增加, 其脱色率降低。在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  浓度为 4% 时, 15 h 的脱色率仅为 56.2%, 而 8% 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  则严重抑制了菌群的脱色。实验结果表明, 当  $\text{NaNO}_3$  浓度为 0.05% 时, 在 15 h 的脱色率可达 99.1%; 当  $\text{NaNO}_3$  浓度为 0.20% 时, 在 15 h 时的脱色率仅为 39.7%; 0.40% 的  $\text{NaNO}_3$  严重抑制了菌群的脱色效果, 浓度越高抑制作用越强。随着  $\text{NaNO}_3$  浓度的增加, 脱色率逐步降低, 说明  $\text{NaNO}_3$  抑制了嗜盐微生物的生长, 从而抑制了其对酸性大红 GR 的脱色。Meng 等研究发现, 高浓度的  $\text{NaNO}_3$  (0.26%)、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (8%) 严重抑制微生物脱色的速率<sup>[23]</sup>。Liu 等也发现无机盐抑制微生物的脱色, 其中  $\text{NaNO}_3$  的抑制作用最强<sup>[26]</sup>, 与本研究的结果相同。除去盐度对微生物的影响, 硝酸盐的氧化还原电位 (+360 mV) 高于硫酸盐的氧化还原电位 (-516 mV) 和染料, 使硝酸盐更容易成为微生物的电子受体, 抑制微生物的对染料的脱色效果<sup>[26]</sup>。虽然盐度会抑制菌群脱色, 但结果表明, 本实验富集的中度嗜盐菌群在  $\text{NaNO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  环境下均能对酸

性大红 GR 有明显的脱色作用。

#### 2.4 pH 和温度对脱色的影响

微生物在最适 pH 才能更好地发挥脱色作用, pH 变化会抑制微生物的生长, 尤其会抑制酶活性。研究了不同初始 pH 对嗜盐菌群对酸性大红 GR 的影响, 从图 4A 可以看出, 嗜盐菌群对 pH 适应范围较广, 更适合偏碱性环境。当 pH 值为 7.0、8.0 和 9.0 时, 酸性大红的脱色率分别为 99.8%、100.1% 和 88.2%。在 pH 5.0 和 6.0 的过酸环境下, 染料脱色率只有 19.1% 和 24.1%, 说明菌株的生长受到抑制, 从而影响其脱色效果。当 pH 10.0 时, 15 h 的脱色率只有 63.2%。很多印染废水的 pH 偏碱性, 有些印染废水 pH 高达 10.0, 主要是因为印染过程中会添加 NaOH 等。惠丰立等也富集了能在 pH 5.0–10.0 的印染废水中高效脱色的菌群<sup>[27]</sup>。该菌群在偏碱性环境下有很好的脱色能力, 其中在 pH 7.0 和 8.0 时脱色率最高, 所以, 该菌群在偏碱性印染废水处理中具有很大的应用潜力。

温度对中度嗜盐菌脱色酸性大红 GR 的结果表明(图 4B), 在 10–37 °C 范围内, 脱色率随温度的升高而增大; 在 30 °C 时脱色率最大, 达到 98.2%。这和 Tan 等富集的能够脱色酸性大红 GR 的菌群的结果相同<sup>[14]</sup>。在 30–55 °C 范围内, 随温度的升高脱色率逐渐降低, 55 °C 时达到最低。

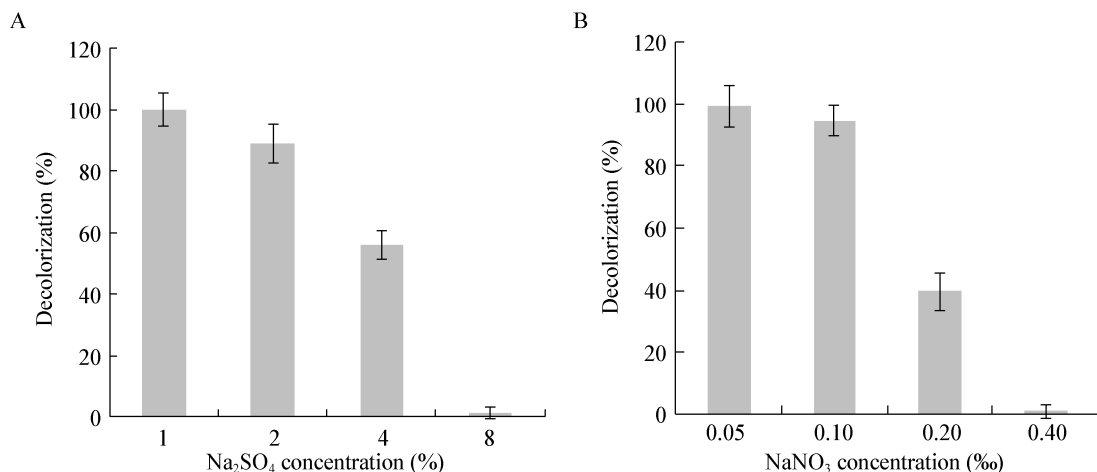


图 3  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (A) 和  $\text{NaNO}_3$  (B) 对中度嗜盐菌群脱色的影响

Figure 3 Effects of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (A) and  $\text{NaNO}_3$  (B) on the decolorization of acid brilliant scarlet GR by the halophilic bacterial consortium

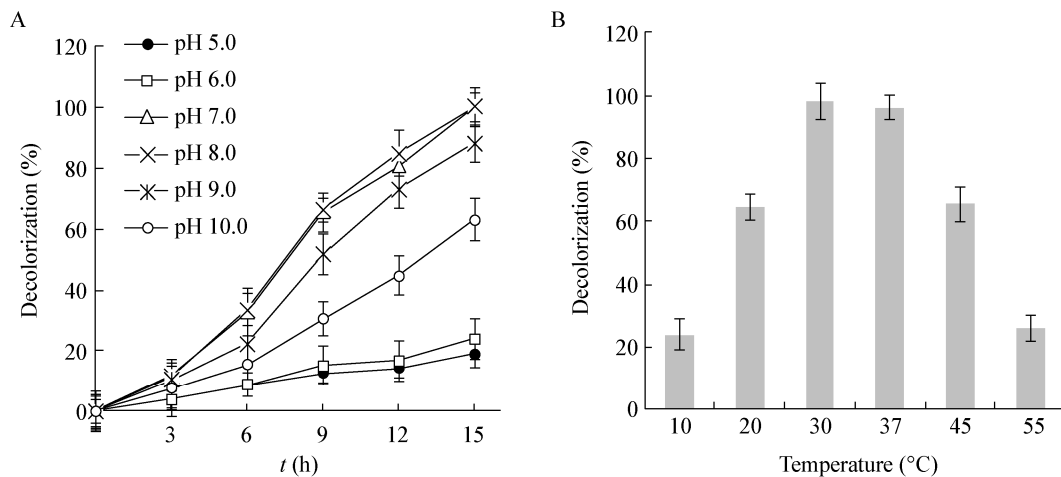


图 4 pH (A)和温度(B)对中度嗜盐菌群脱色的影响

Figure 4 Effects of pH (A) and temperature (B) on decolorization of acid brilliant scarlet GR by the halophilic bacterial consortium

## 2.5 起始浓度对脱色的影响

染料起始浓度对中度嗜盐菌群脱色的影响如图 5 所示。染料浓度越高，微生物脱色率越低。当初始染料浓度为 400 mg/L 时，菌群 15 h 的脱色率只有 42.8%。染料初始浓度大于 400 mg/L 时，15 h 的脱色率只有 15.1% (结果没有显示)。项学敏等<sup>[28]</sup>发现耐盐菌 GTY 有一定承受负荷限，当污染物浓度过高时，会延长微生物的脱色时间。高浓度的酸性大红 GR 具有毒性，且随着浓度升高毒性也曾大，抑制了菌群的生长和代谢活性，从而抑制了菌群的脱色效果。

## 2.6 菌群对不同染料的脱色

偶氮染料化学结构的多样性直接影响微生物对偶氮染料的脱色性能，偶氮染料分子偶氮键的数量及芳环上取代基影响生物脱色效果。研究了中度嗜盐菌对不同染料的脱色效果，如图 6 所示。中度嗜盐菌在 15 h 内将 100 mg/L 的酸性大红 GR 几乎完全脱色，而直接耐黑 G (87.3%)、分散深蓝 S-3BG (20.2%)和活性艳红 X-3B (15.2%)的脱色率逐渐降低。戴树桂等<sup>[29]</sup>研究发现偶氮染料中促进基团和抑制基团的数量和种类也会影响脱色效果，而且两种基团的作用可以相互抵消。直接耐黑 G 比活性艳红 X-3B 的脱色效果好，可能是直接

耐晒黑 G 促进基团的数量[5 个氨基(-NH<sub>2</sub>)和 1 个羟基(-OH)]大于抑制基团(2 个磺酸基(-SO<sub>3</sub><sup>-</sup>);分散深蓝 S-3BG 和活性艳红 X-3B 都只有 1 个偶氮键，但分散深蓝 S-3BG 还有 2 个抑制基团，活性艳红 X-3B 有 2 个抑制基团(-SO<sub>3</sub><sup>-</sup>)和 1 个促进基团(-OH);研究以含有 2 个偶氮键的酸性大红 GR 为

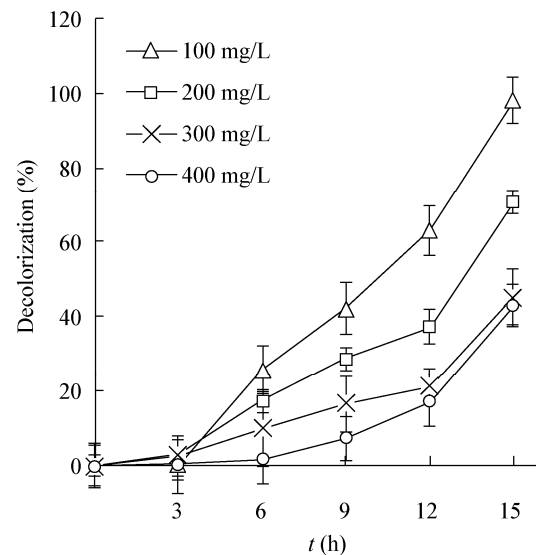


图 5 酸性大红 GR 起始浓度对中度嗜盐菌群脱色的影响

Figure 5 Effects of different initial concentrations of acid brilliant scarlet GR on decolorization of the halophilic bacterial consortium

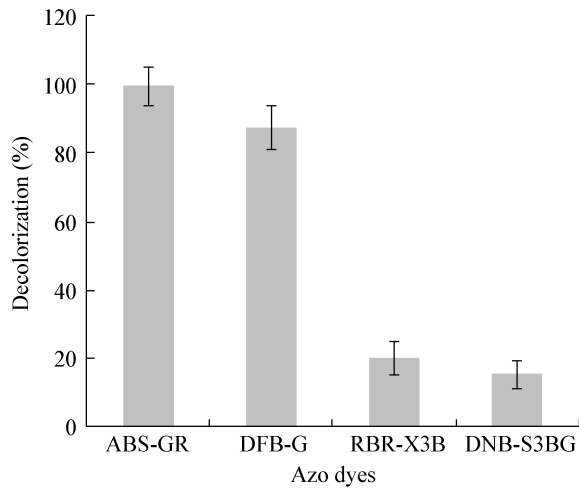


图6 中度嗜盐菌群对不同染料的脱色  
Figure 6 Decolorization of different azo dyes by the halophilic bacterial consortium

底物富集的中度嗜盐菌群,可能更容易脱色偶氮键多的偶氮染料,所以直接耐晒黑 G 的脱色率大于分散深蓝 S-3BG 和活性艳红 X-3B。与纯菌相比,菌群的多样性使得菌群的适应性和底物范围都较高,因此,混合菌群更适合实际应用。

### 2.7 连续脱色能力测试

连续脱色能力好的微生物具有很大的应用潜力。中度嗜盐菌群处理 100 mg/L 的酸性大红 GR 在连续脱色 5 个循环后仍能达到 98.2% 的脱色率(结果没有显示),显示该菌具有一定的连续脱色能力,对于该菌群的实际应用具有重要的意义。耐盐撕裂蜡孔菌在橙黄 G 连续脱色 3 个循环后只有 50% 的脱色率<sup>[30]</sup>。本研究中发现在 5 个脱色周期中,其脱色率维持在 98% 左右。相对于其它微生物,该菌群具有很强的连续脱色能力,应用潜力巨大。

## 3 结论

采用富集的方法,从印染废水的活性污泥中富集了一个能够脱色偶氮染料——酸性大红 GR 的中度嗜盐菌群,该菌属主要由 *Halomonas*、*Salinicoccus*、*Nitratireductor* 和 *Aequorivita* 等 4 个菌属组成,可在 1%–10% 盐度范围内高效地脱色酸性大红 GR,在 100–400 mg/L 的范围内都有较好的

脱色效果,可以脱色直接耐黑 G 和分散深蓝 S-3BG 等偶氮染料。

该菌群的最佳脱色 pH 值为 7.0,高浓度的 NaCl、NaNO<sub>3</sub> 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 对酸性大红 GR 有明显的抑制作用,连续脱色 5 次后,脱色率仍没有降低。

## 参考文献

- [1] Zhao X, He JX, Zhan YZ. Research progress of the dyeing wastewater treatment technologies[J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2009, 30(2): 38-43 (in Chinese)  
赵雪,何瑾馨,展义臻. 印染废水处理技术的研究进展[J]. 化学工业与工程技术, 2009, 30(2): 38-43
- [2] Solís M, Solís A, Pérez HI, et al. Microbial decoloration of azo dyes: a review[J]. Process Biochemistry, 2012, 47(12): 1723-1748
- [3] Ren NQ, Zhou XJ, Guo WQ, et al. A review on treatment methods of dye wastewater[J]. CIESC Journal, 2013, 64(1): 84-94 (in Chinese)  
任南琪,周显娇,郭婉茜,等. 染料废水处理技术研究进展[J]. 化工学报, 2013, 64(1): 84-94
- [4] Hua L, Xie JK, Zhu C, et al. Advance in microbial decolorization and degradation of azo dyes[J]. The Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2015, 43(10): 103-113 (in Chinese)  
花莉,解井坤,朱超,等. 微生物对偶氮染料脱色降解的研究进展[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(10): 103-113
- [5] Balakrishnan VK, Shirin S, Aman AM, et al. Genotoxic and carcinogenic products arising from reductive transformations of the azo dye, Disperse Yellow 7[J]. Chemosphere, 2016, 146: 206-215
- [6] Lu J, Yu ZS, Zhang HX. Research progress in the microbial degradation of azo dyes[J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(1): 15-19 (in Chinese)  
卢婧,余志晟,张洪勋. 微生物降解偶氮染料的研究进展[J]. 工业水处理, 2013, 33(1): 15-19
- [7] Kokabian B, Bonakdarpour B, Fazel S. The effect of salt on the performance and characteristics of a combined anaerobic-aerobic biological process for the treatment of synthetic wastewaters containing Reactive Black 5[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 221: 363-372
- [8] Popli S, Patel UD. Destruction of azo dyes by anaerobic-aerobic sequential biological treatment: a review[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(1): 405-420
- [9] Imran M, Crowley DE, Khalid A, et al. Microbial biotechnology for decolorization of textile wastewaters[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2014, 14(1): 73-92
- [10] Ogugbue CJ, Sawidis T, Oranusi NA. Evaluation of colour removal in synthetic saline wastewater containing azo dyes using an immobilized halotolerant cell system[J]. Ecological

- Engineering, 2011, 37(12): 2056-2060
- [11] Khalid A, Arshad M, Crowley DE. Decolorization of azo dyes by *Shewanella* sp. under saline conditions[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 79(6): 1053-1059
- [12] Amoozegar MA, Hajighasemi M, Hamed J, et al. Azo dye decolorization by halophilic and halotolerant microorganisms[J]. Annals of Microbiology, 2011, 61(2): 217-230
- [13] Wei N, Zhang QQ, Du ZJ, et al. Isolation and identification of halophilic bacteria strain *Halomonas elongata* and its application on degradation of an azo dye Reactive Blue BRF[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(9): 2091-2096 (in Chinese)  
韦娜, 张前前, 杜宗军, 等. 极端嗜盐菌 *Halomonas elongata* 的分离鉴定及其降解偶氮染料活性兰 BRF 的条件优化研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2091-2096
- [14] Tan L, Ning SX, Wang Y, et al. Aerobic decolorization of Acid Brilliant Scarlet GR by microbial community and the community dynamics during sequencing batch processes[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2013, 29(10): 1763-1771
- [15] Xie XH, Fan FX, Yuan XW, et al. Isolation of high performance bacterial consortium FF and its decolorization effects on reactive black 5[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2013, 39(6): 802-813 (in Chinese)  
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
- [16] Chang JS, Kuo TS, Chao YP, et al. Azo dye decolorization with a mutant *Escherichia coli* strain[J]. Biotechnology Letters, 2000, 22(9): 807-812
- [17] Castillo-Carvajal LC, Martín JLS, Barragán-Huerta BE. Biodegradation of organic pollutants in saline wastewater by halophilic microorganisms: a review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(16): 9578-9588
- [18] Guo G, Wang YH, Tian F, et al. Enrichment and decoloring capability of an acid brilliant scarlet GR decoloring halophilic bacterial consortium[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(2): 631-636 (in Chinese)  
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
- [19] Asad S, Amoozegar MA, Pourbabaee AA, et al. Decolorization of textile azo dyes by newly isolated halophilic and halotolerant bacteria[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(11): 2082-2088
- [20] Guo JB, Zhou JT, Wang D, et al. A novel moderately halophilic bacterium for decolorizing azo dye under high salt condition[J]. Biodegradation, 2008, 19(1): 15-19
- [21] Danish-Daniel M, Gan HY, Gan HM, et al. Genome sequence of *Nitratireductor basaltis* strain UMTGB225, a marine bacterium isolated from a green barrel tunicate in Bidong island, Malaysia[J]. Genome Announcements, 2014, 2(5): e01015-14
- [22] Liu JJ, Zhang XQ, Pan J, et al. *Aequorivita viscosa* sp. nov., isolated from an intertidal zone, and emended descriptions of *Aequorivita antarctica* and *Aequorivita capsosiphonis*[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2013, 63: 3192-3196
- [23] Meng XX, Liu GF, Zhou JT, et al. Azo dye decolorization by *Shewanella aquimarina* under saline conditions[J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 95-101
- [24] Bin Y, Du CH, Xu ML, et al. Decolorization of azo dyes by a salt-tolerant *Staphylococcus cohnii* strain isolated from textile wastewater[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2012, 6(6): 806-814
- [25] Uddin MS, Zhou JT, Qu YY, et al. Biodecolorization of azo dye acid red B under high salinity condition[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 79(4): 440-444
- [26] Liu GF, Zhou JT, Meng XM, et al. Decolorization of azo dyes by marine *Shewanella* strains under saline conditions[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(9): 4187-4197
- [27] Hui FL, Niu QH, Liu Z, et al. Constructing and characteristics of bacterial flora for decolorizing reactive red BF-3BN[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(7): 1538-1541 (in Chinese)  
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
- [28] Xiang XM, Wang XK, Zhou JT, et al. Decolorization of reactive X-3B red dye by salt-tolerant bacterium GTY[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(2): 31-34 (in Chinese)  
项学敏, 王晓坤, 周集体, 等. 耐盐菌 GTY 对偶氮染料活性艳红 X-3B 的脱色研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(2): 31-34
- [29] Dai SG, Song WH, Li T, et al. Study on azo dyes structure biodegradability relationships[J]. Advances in Environmental Science, 1996(6): 1-9 (in Chinese)  
戴树桂, 宋文华, 李彤, 等. 偶氮染料结构与其生物降解性关系研究进展[J]. 环境科学进展, 1996(6): 1-9
- [30] Tian QJ, Lin YH, He XB, et al. Toxicity test and decolorization of simulated orange G dye wastewater by *Ceriporia lacerata* P2 with a high-salinity tolerance[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2011, 17(6): 876-882 (in Chinese)  
田启建, 林永慧, 何兴兵, 等. 耐高盐撕裂蜡孔菌 P2 对模拟橙黄 G 染料废水的脱色及废水脱色前后的毒性测试[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(6): 876-882