

# 光合细菌固定化及其处理含油废水的研究

毛雪慧<sup>1</sup>, 徐明芳<sup>2</sup>, 刘 辉<sup>1</sup>, 曾 乐<sup>2</sup>, 肖 娜<sup>1</sup>

(1.暨南大学水生生物研究所, 广东 广州 510632; 2.暨南大学生物工程系, 广东 广州 510632)

**摘要:**采用固定化光合细菌 PSBRS(*Rhodobacter sphaeroides*)处理含油废水。比较了 3 种不同包埋材料固定化光合细菌处理含油废水的效果,对固定化光合细菌去除废水中油的工艺条件进行了优化,并分析了油降解后的脂肪酸成分。通过几种固定化工艺的比较,确定了 2%沸石+2%海藻酸钠(CA)的凝胶剂组合作为共固定材料。结果表明,该固定化颗粒降解 1 000 mL 含油废水的最佳使用条件为:好氧避光条件下,粒径 4 mm,包埋比 1:2,颗粒投加量 10 g。6 d 后含油废水中油、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  的去除率分别为 80.1%、87.4%、96.3%。通过固定化光合细菌与游离态光合细菌对油去除率的比较,固定化光合细菌去油率达到 74.95%,与游离态 PSBRS(去油率为 35.31%)相比,提高约 50%以上。此外,分析了油降解后的脂肪酸成分,固定化光合细菌对脂肪酸的去除效果显著,为今后开展高效处理含油废水的微生物筛选和固定化技术研究奠定了基础。

**关键词:**固定化;光合细菌;油废水;氨氮;磷

**中图分类号:**X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)07-1494-06

## Immobilization of Photosynthetic Bacteria for Oily Wastewater Treatment

MAO Xue-hui<sup>1</sup>, XU Ming-fang<sup>2</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, ZENG Le<sup>2</sup>, XIAO Na<sup>1</sup>

(1.Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2.Biotechnology Department, Jinan University, Guangzhou 510632,China)

**Abstract:**Photosynthetic bacteria *Rhodobacter sphaeroides* (PSBRS) was immobilized to treat oily wastewater. Three different embedding materials were compared for the oil removal effect of the immobilized PSBRS. The process for removing oil was optimized and the degradation of fatty acids in oily wastewater was also analyzed. The gel complex with 2% zeolite and 2% sodium alginate was selected after comparison for co-immobilization, with a diameter of 4 mm of the immobilized granule and an embedding ratio of 1:2. After 6 days treatment with 10 g·L<sup>-1</sup> granules under aerobic conditions in the darkness, the oil,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , and  $\text{PO}_4^{3-}$  in the wastewater were removed by 80.1%, 87.4% and 96.3%. The amount of oil removed by immobilized PSBRS was 50% higher than that by the same bacteria without immobilization. Fatty acids were also largely removed by immobilized PSBRS. This work is beneficial to the screening and immobilization of microorganisms for efficient treatment of oily wastewater.

**Keywords:**immobilization; photosynthetic bacteria; oily wastewater; ammonia nitrogen; phosphate

目前,我国每年餐饮业排放的未经处理的废水达上亿吨,且有不断增长的趋势<sup>[1]</sup>。餐饮业废水中含有较高浓度的动植物油,主要是由  $\text{C}_{20}\text{H}_{40}\text{O}_2\sim\text{C}_{16}\text{H}_{30}\text{O}_2$  的饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸组成,油脂会凝结固化堵塞下水道,污染土壤、植物和水体<sup>[2]</sup>。因此有效处理含油废水对保护生态环境和减轻城市污水处理站负担有明显的环境效益和经济效益。

含油废水处理的一般方法分为物理法(如离心

分离、膜分离法)、化学法(如酸化、化学氧化法)、物理化学法(如浮选、吸附法)和生物化学法(如活性污泥、生物膜法)。生物化学法较物理或化学法具有成本低、投资少、效率高、无二次污染等优点<sup>[3]</sup>。研究表明光合细菌能利用多种有机物作为碳源,是处理有机废水常用的微生物之一<sup>[4-5]</sup>。但游离态的光合细菌,在流水条件下易被水流冲走,静水条件下易被其他生物所食。将光合细菌同载体结合并固定化,可明显提高其沉降性能,保持包埋菌占优势,抗毒性能和耐受力明显增加,易固液分离<sup>[6-7]</sup>。本文采用固定化光合细菌(*Rhodobacter sphaeroides*)处理含油废水,对其工艺条件进行了优化,分析了油降解后的脂肪酸成分,

收稿日期:2008-10-11

作者简介:毛雪慧(1982—),女,硕士,主要研究方向为环境生物技术。

E-mail:szmm@163.com

通讯作者:徐明芳 E-mail:xuxuxu20042005@126.com

为今后开展高效处理含油废水的微生物筛选和固定化技术研究奠定了基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验废水<sup>[7]</sup>

人工配制下水道含油废水( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ):D-glucose 4.0,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.015,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.006,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$  0.030,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0.117,  $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.056,  $\text{CaCl}_2$  0.010, peptone 0.150,  $\text{KNO}_3$  0.069, 蒸馏水 1 000 mL, 3 300  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  食用调和油(深圳金龙鱼)。

### 1.2 实验菌株的培养与收集

光合细菌(PSBRS)接种于液体富集培养液<sup>[8]</sup>中, 置温度为 30  $^{\circ}\text{C}$ 、光照度为 4 000 lx、厌氧光照条件下培养 4 d 后, 收集菌液 5 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 15 min, 弃去上层清液, 使收获的光合细菌浓缩液最终湿重达 225  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 4  $^{\circ}\text{C}$  低温保存备用。

### 1.3 固定化方法

本实验中采用不同种类的凝胶剂溶液和 2% 海藻酸钠溶液混合制成包埋剂溶液。凝胶剂组成如表 1 所示。将浓缩菌液按一定比例加入包埋剂中, 菌体与包埋剂混合液由 10 mL 无菌注射器从 10 cm 高处滴入 2%  $\text{CaCl}_2$  的饱和硼酸溶液(交联剂)中, 交联成直径为 2~4 mm 左右的球体。固定化球体没在 2%  $\text{CaCl}_2$  的饱和硼酸溶液中, 放入冰箱中继续固定 24 h。收获的小球用无菌水洗, 保存在 0.85% 生理盐水中。

表 1 凝胶剂的质量分数

Table 1 Percentage of gels composition

| 凝胶剂名称  | 沸石 | 聚乙烯醇(PVA) | 明胶  |
|--------|----|-----------|-----|
| 质量分数/% | 2  | 10        | 1.5 |

### 1.4 实验方法

各取 1 000 mL 含油废水于 1 500 mL 三角烧瓶中, 含油废水含油量为 3 300  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。将固定化光合细菌投入废水进行曝气, 30  $^{\circ}\text{C}$  黑暗条件下反应 6 d, 每天取样测定残余油、氨氮、磷酸盐去除率。实验中设游离态 PSBRS 和固定化 PSBRS 两种处理方法, 比较不同溶解氧、包埋剂种类、包埋比、投加量等对固定化 PSBRS 含油废水处理效果的影响。

### 1.5 分析方法

#### 1.5.1 油脂去除率的测定方法<sup>[9]</sup>

用石油醚萃取 1 000 mL 水样中的油, 置 65  $^{\circ}\text{C}$  恒温箱中烘干、冷却、称重。

油脂去除率的计算: 去除率 =  $(m_1 - m_2) / m_1 \times 100\%$

式中:  $m_1$  为含油废水中初始油的重量, g;  $m_2$  为水样的残油重量, g。

#### 1.5.2 水质理化性质检测<sup>[10]</sup>

氨氮用纳氏比色法检测, 磷酸盐用钼酸盐分光光度法检测, 溶解氧用 YSI 550A 型溶解氧测定仪测定。

#### 1.5.3 固定化颗粒的结构表征

采用 PHILIPS XL-30 ESEM 型扫描电镜(荷兰飞利浦)观察固定化颗粒表面结构。首先用 2.5% 戊二醛固定液将颗粒固定 1 h, 随后用酒精逐级增加浓度对颗粒进行脱水, 然后用临界点干燥器干燥颗粒, 再在真空下喷金, 最后在扫描电镜下进行观察、拍照。

#### 1.5.4 脂肪酸分析方法<sup>[11]</sup>

仪器: TRACE[ET] GC-MS 气相色谱-质谱联用仪(美国菲尼根)。

色谱条件: DB-17 毛细管色谱柱 30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ , 载气为高纯氦气(99.999%), 氦气流速为 1.2 mL $\cdot$ min $^{-1}$ , 进样口温度为 260  $^{\circ}\text{C}$ , 起始柱温为 60  $^{\circ}\text{C}$ , 保持 2 min, 以 30  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温至 145  $^{\circ}\text{C}$ , 以 1.5  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温至 250  $^{\circ}\text{C}$ , 保持 2 min。

质谱条件: 采用电子轰击方式或化学电离方式进行离子化, EI 电离能量为 70 eV, 接口温度为 250  $^{\circ}\text{C}$ , 离子源温度为 220  $^{\circ}\text{C}$ , 质量扫描范围为 42~500。

## 2 结果与讨论

### 2.1 包埋剂对含油废水除油效果的影响

#### 2.1.1 包埋剂种类对含油废水除油效果的影响

不同凝胶剂的固定化颗粒的除油率结果如图 1。6 d 后, 3 种不同包埋材料的固定化 PSBRS 除油效果显著, 沸石和 PVA 作为包埋剂的颗粒去油效率大于明胶, 除油效率最高达 65.3%。由图 2 A、B 海藻酸钙与沸石包埋表面的扫描电镜照片可看出, 颗粒表面凹凸不平, 沸石颗粒镶嵌或包埋在颗粒表面和内部。沸石具有空旷的骨架结构, 晶体结构使其具有大量的孔穴通道, 孔穴中阳离子的存在使其具有静电吸引力<sup>[12]</sup>。由于光合细菌在孔穴中生长繁殖, 并且沸石将油吸附到沸石孔穴中, 光合细菌和油污水接触面积增大, 因此提高了光合细菌与油的反应效率。沸石颗粒能达到包埋和吸附的双重效果, 因此油脂的去除率比 PVA 作为包埋剂的颗粒去油效率高。由图 2 C、D 海藻酸钙与明胶包埋表面的扫描电镜照片可看出, 颗粒表面较为光滑, 没有分离, 说明海藻酸钙与明胶具有良好相容性。正因为密实的结构, 导致颗粒的传质性能差<sup>[13]</sup>, 油脂不易进入颗粒内部, 因此油脂降解率不

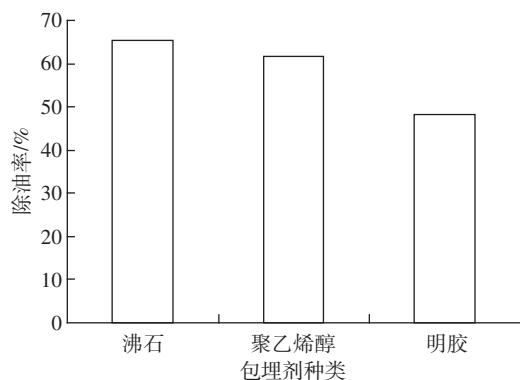


图 1 包埋剂种类对固定化光合细菌除油污水效果的影响

Figure 1 Effect of embedding materials on efficiency of removal oil by immobilized PSBRS beads

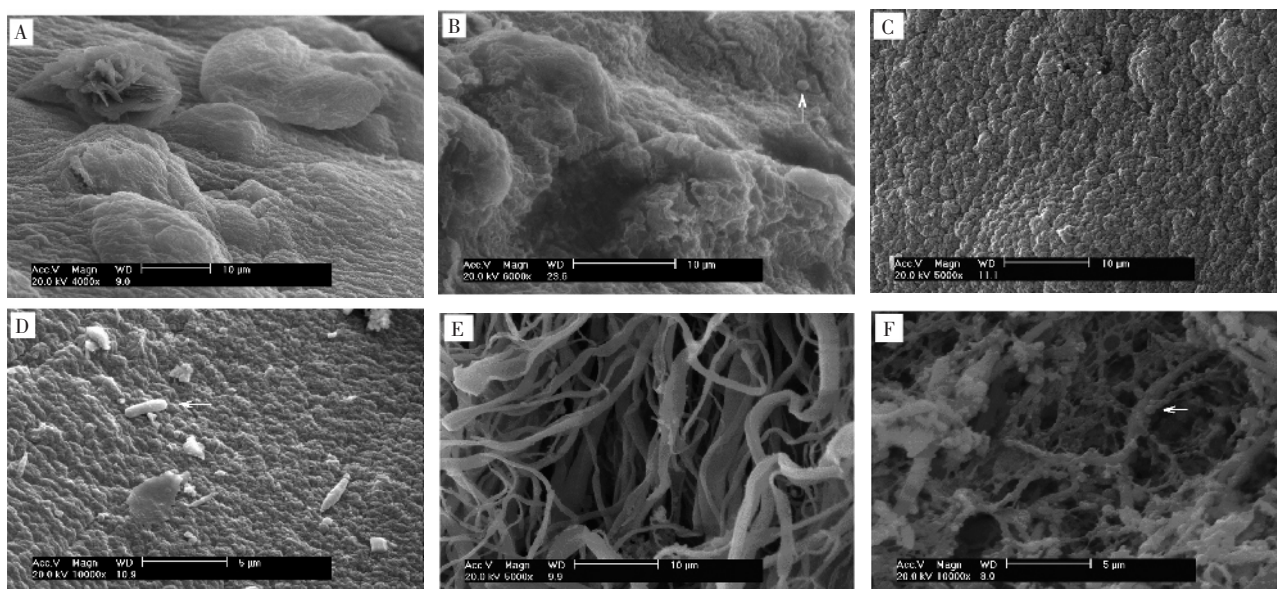
高。由图 2 E、F,海藻酸钙与 PVA 包埋表面的扫描电镜照片可看出,颗粒表面呈网格交联状,在颗粒内部存在许多孔隙,孔隙内分布着细菌。PVA 在与海藻酸钙交联后,分子链中的氢键被削弱,且两者形成的网状结构互相贯穿,交联的紧密性减少<sup>[14]</sup>,这种结构有利于细菌在颗粒内部生长繁殖。PVA 固定化颗粒的传质性能好,有利于油脂与细菌的接触。但在实验中发现,颗粒投入废水中反应 48 h 后,PVA 颗粒出现明显溶胀,72 h 后,开始溶解;由于 PVA 颗粒与硼酸交联不彻底,少量有机碳成分溶出<sup>[15]</sup>,致使颗粒溶解。

所以 PVA 颗粒的机械强度明显弱于沸石颗粒,沸石颗粒强度可以持续 3 周左右。虽然 PVA 颗粒有很好的除油效果,但考虑其强度不高、易溶解,因此,本实验采用沸石颗粒进行下面的实验。

### 2.1.2 不同包埋比对含油废水除油效果的影响

在相同的实验条件下,调节鼓泡气量进行曝气,在不同的溶解氧浓度下,曝气处理 6 d,取样测定含油量,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着 DO 的增大,油值去除率逐渐上升。这是由于光合细菌在好氧避光条件下无法进行光合作用,但能够充分利用足够的氧气将有机物作为呼吸基质<sup>[16]</sup>,进行一种纯呼吸代谢,由三羧酸循环作为其最终物质氧化的途径<sup>[17]</sup>,故油脂去除率上升。当 DO 达到  $1.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,油值的去除率最高,达 70.4%。这是由于废水中通入的微细气泡量增加,气液相的接触面积增大,从而减少氧传递过程的阻力,同时能使油脂均匀地悬浮于废水中,有利于营养物质的吸收和代谢物的分散<sup>[18]</sup>。当 DO 进一步增大时,油值去除率反而有所下降,说明光合细菌的生长和代谢有一最适氧浓度,氧浓度过高,反而会抑制菌体的生长和代谢。因此,操作时应控制溶解氧浓度在  $1.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右。

分别取 1:1、1:2、1:5 的包埋比的凝胶颗粒处理含油废水,曝气处理 6 d,取样测定含油量。除油率结果



A. 无菌沸石颗粒; B. 有菌沸石颗粒; C. 无菌明胶颗粒; D. 有菌明胶颗粒; E. 无菌 PVA 颗粒; F. 有菌 PVA 颗粒  
A. zeolites with no microorganism; B. zeolites with microorganism; C. glutin with no microorganism; D. glutin with microorganism;  
E. PVA with no microorganism; F. PVA with microorganism

图 2 固定化颗粒表面结构的扫描电镜图

Figure 2 Configuration on the surface of immobilized beads observed under SEM

如图4所示,包埋比为1:2时除油率最高,达71.1%。当包埋比为1:1时,过高的细菌密度抑制了菌体表面物质的活性,而表面活性物质可促进菌体对有机物质的吸收,从而降解率受影响<sup>[19]</sup>。包埋比为1:5时,细菌密度较低数量少,除油率不高。因此,该颗粒降解油的最佳包埋比为1:2。

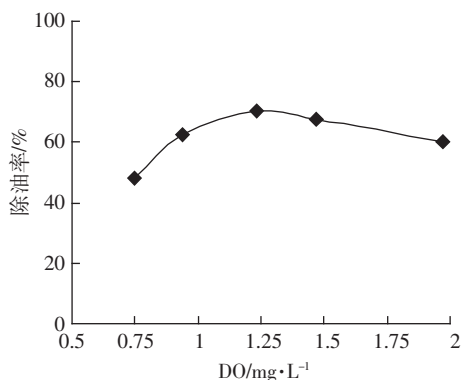


图3 不同溶解氧对除油废水效果的影响

Figure 3 Effect of dissolved oxygen on efficiency of removal oil by immobilized PSBRS beads

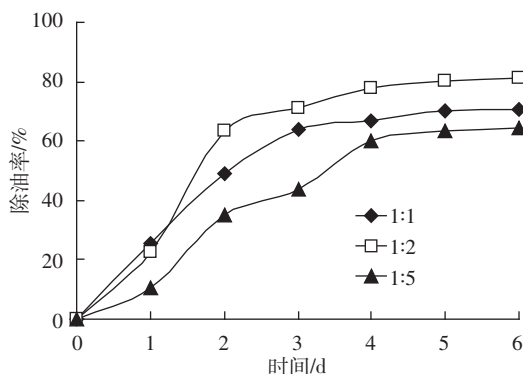


图4 不同包埋比对除油废水效果的影响

Figure 4 Effect of embedding ratio on efficiency of removal oil by immobilized PSBRS beads

## 2.2 固定化颗粒投加量对含油废水除油效果的影响

向废水中分别投加5、10、15、20 g·L<sup>-1</sup>固定化颗粒,除油率结果如图5所示。投菌量在5.0~10.0 g·L<sup>-1</sup>之间时,除油率随投菌量的增加而急剧升高。当菌量在10 g·L<sup>-1</sup>以上时,除油率反而呈现下降趋势。固定化 PSBRS 对降低含油废水的氨氮、磷酸盐也具有明显的效果。如图5和图6所示,投加10 g·L<sup>-1</sup>固定化光合细菌后,废水的油、氨氮和磷酸盐的去除率分别达到了80.1%、87.4%、96.3%。但当投加量大于10 g·L<sup>-1</sup>时,去除率反而呈下降的趋势,氨氮、磷酸盐的去除率分别只有48.6%、65.2%,远不及投加量为10 g·

L<sup>-1</sup>时的去除率。

可能是由于投加量过大,光合细菌的大量繁殖使水中的营养物质快速消耗,使得后期一部分细菌因营养不足而死亡,而菌体死亡分解产生的有机物使水中的氨氮、磷酸盐含量上升<sup>[20]</sup>。因此,实验颗粒的投加量以10 g·L<sup>-1</sup>为最佳。

## 2.3 固定化光合细菌与游离态光合细菌对油去除率的比较

向1000 mL含油废水中分别投加10 g固定化光

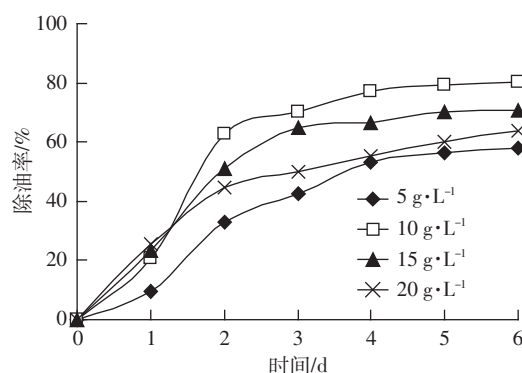


图5 不同投加量对除油废水效果的影响

Figure 5 Effect of different beads amount on efficiency of removal oil

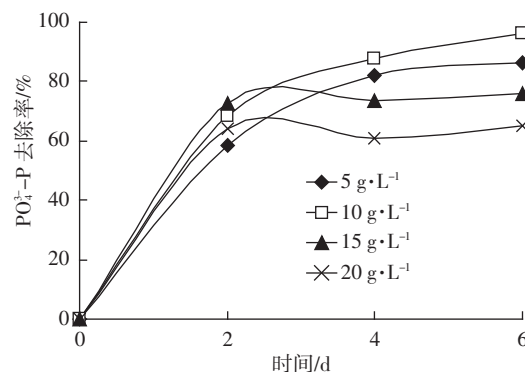
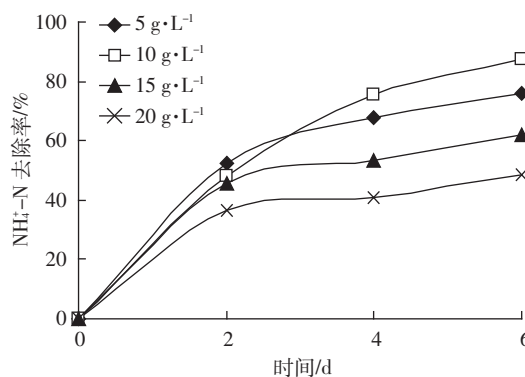


图6 不同投加量对氮磷去除率的影响

Figure 6 Effect of different weight on removal NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> of immobilized beads

合细菌颗粒、10 g 固定化颗粒(未加菌)和相同量的游离光合细菌,曝气,30 °C 黑暗条件下反应 6、3、6 d 后分别取样 GC/MS 分析脂肪酸成分。

由表 2 所示,棕榈酸( $C_{16}H_{32}O_2$ )、9,12,15-亚麻酸( $C_{18}H_{30}O_2$ )、9,12-亚油酸( $C_{18}H_{32}O_2$ )、9-油酸( $C_{18}H_{34}O_2$ )和花生酸( $C_{20}H_{40}O_2$ )是食用油中的最主要的脂肪酸成分,其中含量最高的是 9-油酸,高达 43.81%,其余依次是 9,12-亚油酸(34.63%),棕榈酸(7.53%)和 9,12,15-亚麻酸(7.44%)。9-油酸和 9,12-亚油酸的总含量高达 78%,说明食用油中脂肪酸的不饱和程度较高。3 d 后,游离菌除油效果显著,脂肪酸含量降低,其中 9-油酸和 9,12-亚油酸含量下降为 13.29%和 12.18%,且花生酸、十七烷酸( $C_{17}H_{34}O_2$ )和 9-十六碳烯酸( $C_{16}H_{30}O_2$ )被完全降解,并且出现了十五烷酸( $C_{15}H_{30}O_2$ )。6 d 后,游离菌处理废水中各种脂肪酸含量继续降低,并且 9,12,15-亚麻酸和十五烷酸被完全降解。3 d 后,固定化 PSBRs 除油效果明显,脂肪酸含量降低,其中 9-油酸和 9,12-亚油酸含量下降为 9.53%和 7.11%,且十七烷酸( $C_{17}H_{34}O_2$ )和 9-十六碳烯酸( $C_{16}H_{30}O_2$ )被完全降解,并且出现了十五烷酸( $C_{15}H_{30}O_2$ )和甘油( $C_3H_8O_3$ )。6 d 后,经过固定化 PSBRs 处理含油废水,其中 9-油酸和 9,12-亚油酸含量下降为 3.85%和 2.97%,且 9,12,15-亚麻酸、十五烷酸和甘油被完全降解。说明光合细菌具有降解不饱和脂肪酸的能力。

光合细菌降解脂肪酸是由于菌体分泌脂肪酶的

表 2 固定化光合细菌与游离光合细菌对各种脂肪酸的去除率的对比

Table 2 Comparison of volatile fatty acids removal by means of immobilized PSBRs and suspended PSBRs

| 编号 | 出峰时间/min | 化合物名称                   | 相对质量分数/% |         |         |          |          |
|----|----------|-------------------------|----------|---------|---------|----------|----------|
|    |          |                         | 空白/0 d   | 游离菌/3 d | 游离菌/6 d | 固定化菌/3 d | 固定化菌/6 d |
| 1  | 40.95    | 花生酸( $C_{20}$ )         | 1.44     | —       | —       | —        | —        |
| 2  | 31.51    | 9-油酸( $C_{18}$ )        | 43.81    | 13.29   | 6.01    | 9.53     | 3.85     |
| 3  | 32.43    | 9,12-亚油酸( $C_{18}$ )    | 34.63    | 12.18   | 4.71    | 7.11     | 2.97     |
| 4  | 33.55    | 9,12,15-亚麻酸( $C_{18}$ ) | 7.44     | 1.76    | —       | 0.95     | —        |
| 5  | 26.15    | 十七烷酸( $C_{17}$ )        | 0.08     | —       | —       | —        | —        |
| 6  | 26.30    | 油酸( $C_{17}$ )          | 0.06     | 2.34    | 0.94    | 9.07     | 0.92     |
| 7  | 35.12    | 9,12-亚油酸( $C_{17}$ )    | 0.25     | 1.38    | 0.55    | 7.61     | 0.69     |
| 8  | 21.77    | 棕榈酸( $C_{16}$ )         | 7.53     | 2.61    | 2.20    | 2.01     | 1.49     |
| 9  | 21.97    | 9-十六碳烯酸( $C_{16}$ )     | 0.19     | —       | —       | —        | —        |
| 10 | 24.33    | 十五烷酸( $C_{15}$ )        | —        | 0.44    | —       | 2.81     | —        |
| 11 | 5.46     | 甘油( $C_3$ )             | —        | —       | —       | 4.53     | —        |

作用。油在脂肪酶的作用下降解成甘油和高级脂肪酸,然后通过  $\beta$ -氧化过程降解脂肪酸,最终油被降解成  $CO_2$  和  $H_2O$ <sup>[21]</sup>。已有研究报道球形红假单胞菌能够分泌脂肪酶<sup>[5]</sup>。由表 2 所示,9-油酸和 9,12-亚油酸是食用油中两种主要的长链脂肪酸、经过细菌的降解含量显著降低,而花生酸和十七烷酸则被完全降解。而在细菌处理的第 3 d 废水中出现十五烷酸和甘油,油酸和 9,12-亚油酸的含量反而增加,这可能是光合细菌将长链脂肪酸分解成短链脂肪酸。长链脂肪酸含量降低,而短链脂肪酸含量升高,甚至出现新的短链脂肪酸。6 d 后,短链脂肪酸也被细菌利用,各种脂肪酸含量显著下降。说明光合细菌能够直接降解脂肪酸。

由表 2 所示,6 d 后,固定化 PSBRs 的脂肪酸降解率明显高于游离态 PSBRs 处理的废水,说明固定化 PSBRs 具有更好的除油效果。如表 3 所示,固定化光合细菌的除油率远远高于固定化沸石颗粒与菌液。光合细菌在沸石空隙中吸附生长,游离的油吸附在沸石的表面,由表到里传递到颗粒的内部,有利于油的生物降解。同时固定化后的光合细菌因为有效阻隔了氧气与菌体的接触,形成厌氧环境,使细菌能够保持活力,也能够自动更替菌膜,提高了菌体的作用时效,使其能稳定发挥降解效能<sup>[22]</sup>。同时光合细菌固定化易形成优势种,更加有利于油的降解。而投加菌液,则由于曝气作用,不利于光合细菌的繁殖,因此只有少部分微生物起降解作用。未加菌的固定化颗粒内并无富集的微生物起降解作用,因此降解率很低。

表 3 固定化光合细菌与菌液去除油的效果对比

Table 3 Summary of oil removal by using immobilized PSBRs and suspended PSBRs

| 名称    | 菌液    | 固定化光合细菌颗粒 | 固定化颗粒(未加菌) |
|-------|-------|-----------|------------|
| 除油率/% | 35.31 | 74.95     | 9.62       |

### 3 结论

(1) 2%沸石+2%CA 的固定化颗粒的除油率优于 10%PVA+2%CA 和 1.5%明胶+2%CA 的固定化颗粒。

(2) 当最适条件为好氧黑暗,溶解氧量  $1.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,粒径 4 mm,包埋比 1:2,颗粒投加量  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时处理含油废水的效果最好。经过 6 d 处理后油废水中油值、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  的去除率分别为 80.1%、87.4%、96.3%。

(3) 将光合细菌固定化能够显著提高油脂降解的效率。

## 参考文献:

- [1] 董晓丹, 王晨煜, 王恩德. 一种新型复合混凝剂处理餐饮废水的实验研究[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(6): 35-38.  
DONG Xiao-dan, WANG Chen-yu, WANG En-de. An experimental study on wastewater processing in the inns and restaurants by using a new agent[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2001, 1(6): 35-38.
- [2] 侯士兵, 玄雪梅, 贾金平, 等. 含油废水处理技术的研究与应用现状[J]. 上海化工, 2003(9): 11-14.  
HOU Shi-bing, XUAN Xue-mei, JIA Jin-ping, et al. Status quo of research and application of the oily wastewater treatment technology[J]. *Shanghai Chemical Industry*, 2003(9): 11-14.
- [3] 杨铁珣, 蒋翼, 王媛媛, 等. 含油废水处理技术的研究进展[J]. 化学工业与工程技术, 2007, 28(5): 29-32.  
YANG Yi-xun, JIANG Yi, WANG Yuan-yuan, et al. Research progress of oil-bearing wastewater treatment technique[J]. *Journal of Chemical Industry & Engineering*, 2007, 28(5): 29-32.
- [4] Sasaki K, Noparatnaraporn N, Nagai S. Use of photosynthetic bacteria for the production of SCP and chemicals from organic wastes, in bioconversion of waste materials to industrial products[M]. New York, London, Tokyo: Elsevier Applied Science Publishers, 1991: 223-262.
- [5] Hassan M A, Shirai Y, Kusubayashi N, et al. The production of polyhydroxyalkanoate from anaerobically treated palm oil mill effluent by *Rhodobacter sphaeroides*[J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1997, 83(5): 485-488.
- [6] 姜浩, 高红梅. 固定化微生物技术及其在养殖水体中的应用[J]. 水利渔业, 2005, 25(4): 27-29.  
JIANG Hao, GAO Hong-mei. Immobilization technology of microorganism and application in treatment of aquarium water[J]. *Reservoir Fisheries*, 2005, 25(4): 27-29.
- [7] Nagadomi H, Kitamura T, Watanabe M, et al. Simultaneous removal of chemical oxygen demand(COD), phosphate, nitrate and  $H_2S$  in the synthetic sewage wastewater using porous ceramic immobilized photosynthetic bacteria[J]. *Biotechnology Letters*, 2000, 22: 1369-1374.
- [8] Van Niel C B. Techniques for the enrichment, isolation, and maintenance of the photosynthetic bacteria[J]. *Methods in Enzymology*, 1971, 23: 3-28.
- [9] 谈红. 重量法测定含动、植物油和矿物油废水应注意的问题[J]. 新疆环境保护, 2002, 24(2): 40-42.  
TAN Hong. Matters needing attention of using the gravimetric method determining animal oil, plant oil and mineral oil content in waste water[J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2002, 24(2): 40-42.
- [10] 国家环保局. 水与废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.  
National Environmental Protection Bureau. Measurement methods for water and wastewater analysis[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989.
- [11] 万益群, 肖丽凤. 超临界  $CO_2$  萃取柚子种子油及脂肪酸的气相色谱分析[J]. 分析科学学报, 2007, 23(5): 559-562.  
WAN Yi-qun, XIAO Li-feng. Extraction of grapefruit seed oil with supercritical carbon dioxide and analysis of the fatty acids using GC[J]. *Journal of Analytical Science*, 2007, 23(5): 559-562.
- [12] 田钟荃. 沸石去除饮用水源中有机污染物的展望[J]. 中国给水排水, 1999, 15: 31-32.  
TIAN Zhong-quan. Prospect of eliminating organic pollutant in drinking water by means of zeolite[J]. *China Water & Wastewater*, 1999, 15: 31-32.
- [13] Carbery J B. Model of algal bacterial clay wastewater treatment system[J]. *Water Science and Technology*, 1992, 26: 7-8.
- [14] 李沁华, 张文宇. 聚乙烯醇-海藻酸钙复合材料制备及性质[J]. 暨南大学学报, 2001, 22(3): 81-85.  
LI Qin-hua, ZHANG Wen-yu. Preparation of PVA-alginate-Ca blends[J]. *Journal of Jinan University*, 2001, 22(3): 81-85.
- [15] 刘蕾, 李杰, 王亚娥. 生物固定化技术中的包埋材料[J]. 净水技术, 2005, 24(1): 40-42.  
LIU Lei, LI Jie, WANG Ya-e. The investment materials of bio-immobilized technology[J]. *Water Purification Technology*, 2005, 24(1): 40-42.
- [16] 吕琴, 陈声明. 光合细菌在有机废水处理中的应用[J]. 食品与发酵工业, 1995(6): 66-71.  
LV Qin, CHEN Sheng-ming. Application of photosynthetic bacteria in organic wastewater treatment[J]. *Food and Fermentation Industries*, 1995(6): 66-71.
- [17] Lewin J C. Heterotrophy in diatoms[J]. *J Gen Microbio*, 1953, 9: 305-313.
- [18] 腾农, 徐虹, 欧阳平凯. 油脂废水生物治理法[J]. 南京化工大学学报, 1999, 21(3): 58-61.  
TENG Nong, XU Hong, OUYANG Ping-kai. Study on bio-treatment of oil wastewater[J]. *Journal of Nanjing University of Chemical Technology*, 1999, 21(3): 58-61.
- [19] 关鲁雄, 何爱翠, 钟文毅, 等. 生物降解优势菌株的选育及其含油废水降解性能研究[J]. 能源环境保护, 2007, 21(1): 22-26.  
GUAN Lu-xiong, HE Ai-cui, ZHONG Wen-yi, et al. Culture and biodegradation performance for high-efficiency oil-degradating bacterium[J]. *Energy Environmental Protection*, 2007, 21(1): 22-26.
- [20] 王兰, 廖丽华. 光合细菌的分离鉴定及对养殖水的净化研究[J]. 微生物学杂志, 2004, 24(2): 7-9.  
WANG Lan, LIAO Li-hua. Separation and identification of photosynthetic bacteria (PSB) and purifying effluent aquaculture water[J]. *Journal of Microbiology*, 2004, 24(2): 7-9.
- [21] Takeno K, Yamaoka Y, Sasaki K. Treatment of oil-containing sewage wastewater using immobilized photosynthetic bacteria[J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2005, 21: 1385-1391.
- [22] 郑耀通, 胡开辉. 固定化光合细菌净化养鱼水质的试验[J]. 水产科学, 1999, 6(4): 55-58.  
ZHENG Yao-tong, HU Kai-hui. Purification of water quality by immobilized photosynthetic bacteria for fish culturing[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1999, 6(4): 55-58.