

# 高效石油降解菌群的构建及其耐盐性能研究

李彦<sup>1,2</sup>, 李红<sup>1,2</sup>, 王帆<sup>1,2</sup>, 屈撑囤<sup>1,2\*</sup>

(1. 西安石油大学, 陕西省油气田环境污染控制技术与储层保护重点实验室, 陕西 西安 710065;  
2. 西安石油大学化学化工学院, 陕西 西安 710065)

**摘要:**以原油降解率为目标, 考察了 5 株石油烃降解菌对原油的降解情况, 确定铜绿假单胞菌、氧化微杆菌、中间苍白杆菌 3 株菌接种量以体积比 1:1:1 混合后, 原油降解率最高达 74.16%。其中, 铜绿假单胞菌、氧化微杆菌对饱和烃均有明显的降解作用, 中间苍白杆菌只能降解部分烷烃。探究了不同盐度对筛选出的 3 株菌的影响, 结果表明, 当液体培养基中盐质量浓度从 10 g/L 上升到 50 g/L 时, 3 株菌均能生长, 随着含盐质量浓度的增加, 菌株浓度依次减少, 生长活性减弱, 细胞膜通透性变大, 细胞失水, 导致细胞表面出现褶皱和凹痕, 细胞壁变薄, 细胞质减少, 严重影响了细胞的活性。

**关键词:**含油污水; 石油烃降解菌; 原油降解率; 微观结构

中图分类号: Q89

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)05-0114-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.05.024

## Construction of high-efficiency petroleum degradation microbiol consortium and study on its salt tolerance property

LI Yan<sup>1,2</sup>, LI Hong<sup>1,2</sup>, WANG Fan<sup>1,2</sup>, QU Cheng-tun<sup>1,2\*</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory for Environmental Pollution Control Technology and Reservoir Protection of Oil & Gas Field, Xi'an 710065, China; 2. College of Chemistry & Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Taking the degradation rate of crude oil as target, the degradation of crude oil by five strains of petroleum hydrocarbon-degrading bacteria is investigated. It is determined that the highest degradation rate of crude oil reaches 74.16% when *Pseudomonas aeruginosa*, *Microbacterium oxidans*, and *Ochrobactrum intermedium* are mixed at a ratio of 1:1:1. Among them, both *Pseudomonas aeruginosa*, and *Microbacterium oxidans* have obvious degradation effect on all saturated hydrocarbons. *Ochrobactrum intermedium* can only degrade some alkanes. Subsequently, the effect of different salinity on these three strains of bacteria is investigated. It is shown that all three strains can grow when salt content in the liquid medium increases from 10 g·L<sup>-1</sup> to 50 g·L<sup>-1</sup>. As the salinity increases, the bacterial concentration decreases in sequence, the growth activity decreases, the permeability of the cell membrane becomes greater, and the cell loses water, resulting in wrinkles and dents on the cell surface. Cell wall becomes thinner and cytoplasm drops, which affects seriously the activity of the cell.

**Key words:** oily wastewater; bacteria for degrading petroleum hydrocarbon; degradation rate of crude oil; micro structure

油田开发后期注水开发已成为油田增产稳产的重要技术, 注水开发的同时产生了大量的含油污水, 污水的有效处理及处理后水资源的再利用对油区生态环境有着极其重要的影响, 含油污水处理后回注是其最佳选择。目前对含油污水中石油烃的去除方法有增溶、蒸发、光化学分解和微生物降解等<sup>[1-3]</sup>, 其中, 生物法具有成本低、操作简便、无二次污染等优点, 是含油污水处理技术中最有发展前景的处理技术<sup>[4-6]</sup>。然而含油污水的含盐量普遍较高, 常规

微生物难以适应, 在一定程度上影响了其在含油污水污泥处理中的应用。优选耐盐微生物菌种及其组合是微生物处理含油污水、污泥能否规模化应用的关键。

近 10 年来, 国内外科研人员开展了大量油田含油污水及海洋石油污染的微生物处理研究工作, 研究表明, 石油烃的生物降解率和盐度存在密切关系。Badejo 等<sup>[7]</sup>研究了 NaCl 对分枝杆菌 (*Mycobacterium* sp) 降解菲的影响, 在高达 1 mol/L NaCl 的条件下,

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2021-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51974245, 21808182); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2019JM472, 2019JM506)

作者简介: 李彦 (1968-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事油气田环境保护方面的研究, liyan85@xsyu.edu.cn; 屈撑囤 (1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事油气田环境保护技术领域的研究, 通讯联系人, xianquct@163.com。

该菌株对非的降解效果显著降低。刘永波等<sup>[8]</sup>从石油污染土壤中筛选出1株轻度嗜盐菌 *Alcaligenaceae.sp.*, 在 NaCl 质量分数为 3%、柴油质量浓度为 400 mg/L 时, 96 h 柴油生物降解率可达 60.425%。笔者以含油污水为研究对象, 利用 5 株单菌株筛选出 1 组高效降解石油菌群, 初步研究了筛选菌株的耐盐特性, 以期为微生物处理高含盐含油污水提供理论基础与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 菌种来源

石油烃降解菌来源于课题组前期从陕北吴起采油厂石百万联合站里的含油污泥中筛选分离得到, 分别为 A-寡养单胞菌 (*Stenotrop Homonas*)、B-铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*)、C-氧化微杆菌 (*Microbacterium oxydans*)、D-中间苍白杆菌 (*Ochrobactrum intermedium*)、E-侧孢短芽孢杆菌 (*Brevibacillus laterosporus*)。

#### 1.1.2 培养基

LB 培养基: NaCl 10.0 g、酵母浸粉 5.0 g、蛋白胨 10.0 g、蒸馏水 1 000 mL、pH 7.2, 121℃ 灭菌 30 min。该培养基用于菌种的活化和斜面保存。

无机盐液体培养基:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.5 g、 $\text{K}_2\text{HPO}_4$  4.8 g、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  1.0 g、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.002 g、 $\text{MgSO}_4$  0.2 g、柠檬酸钠 0.5 g、酵母浸粉 0.1 g、蒸馏水 1 000 mL。

原油降解培养基: 无机盐液体培养基 1 000 mL、原油 1 g, 121℃ 灭菌 30 min。该培养基用于石油降解率的测定。

葡萄糖无机盐培养基: 无机盐液体培养基 1 000 mL、葡萄糖 20 g, 115℃ 灭菌 20 min。该培养基用于菌株的耐盐驯化。

### 1.2 原油降解率的测定

将活化后的单菌株在 LB 培养基中隔夜培养后, 各菌液以 2 mL 的接种量接种至常温原油降解培养基中, 在 37℃、180 r/min 的摇床里培养 7 d, 以  $\text{CCl}_4$  作为萃取溶剂, 通过 OIL-460 型红外测油仪测定原油降解率, 计算原油降解率:

$$\text{降解率} = [(C_0 - C_1)/C_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $C_0$  为培养基中加入的初始原油质量浓度, mg/L;  $C_1$  为接入菌株降解 7 d 后培养基中原油质量浓度, mg/L。

### 1.3 原油组分的 GC-MS 分析

将培养 7 d 后的原油降解培养基中样品转移至分液漏斗中, 用 100 mL  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  (原油培养基与  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  的体积比为 1:1) 充分润洗培养基后将溶液转移至分液漏斗中, 充分震荡分液漏斗 3 min, 使原油溶解至  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  中, 静置 10 min, 取下层有机相, 加入适量无水  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  以去除有机相中水分, 最后用针筒式滤膜过滤器吸取 1 mL 溶液至样品瓶中。

GC-MS 运行条件: 采用 FID (氢焰离子化) 检测器, 色谱柱为 HP-PONA (50 m×200  $\mu\text{m}$ ×0.5  $\mu\text{m}$ ), 升温程序为: 初始柱温为 80℃, 恒温 5 min, 以 5℃/min 的升温速率升至 165℃, 恒温保持 2 min; 再以 5℃/min 升温至 300℃, 保持 10 min, 进样口温度为 250℃, 分流比为 50:1。

### 1.4 菌株生长曲线的测定

挑取单菌接入到 100 mL LB 培养基中富集培养 24 h, 接入 1 mL 菌液至 NaCl 质量浓度为 10 g/L 的葡萄糖无机盐培养基中进行培养, 再依次接入 NaCl 质量浓度为 20、30、40、50 g/L 的培养基中培养, 利用比浊法每隔 6 h 测量微生物的生长, 观察菌株的生长情况。

### 1.5 菌株细胞膜通透性的测定

将各菌株以 1 mL 接种量接入不同盐含量葡萄糖无机盐培养基中, 于 37℃、180 r/min 条件下培养至对数期, 取菌悬液于 4 000 r/min 转速下离心 15 min, 收集沉淀菌体, 用蒸馏水清洗菌体 3 次, 然后滤纸吸干水分。称取各盐度下 0.1 g 菌体放入 50 mL 小烧杯中, 加入 15 mL 蒸馏水, 静置 30 min 后, 利用 DDS-11A 型电导仪测定电导率 ( $L_1$ )。然后于 100℃ 水浴加热 15 min 以灭掉菌体活性, 待温度冷却至室温, 再测其电导率 ( $L_2$ )<sup>[9]</sup>, 计算细胞膜的相对通透性:

$$\text{细胞膜的相对通透性}(\%) =$$

$$(L_1 - \text{蒸馏水电导值}) / (L_2 - \text{蒸馏水电导值}) \quad (2)$$

### 1.6 菌株细胞微观结构观察

以铜绿假单胞菌为例, 将菌株在不同 NaCl 质量浓度的葡萄糖无机盐培养基中培养至对数期收集菌体, PBS 缓冲溶液洗 1~2 次后收集菌体沉淀, 置于 1.5 mL 离心管中, 加入 2.5% 戊二醛溶液, 冰箱中固定过夜, 离心倒掉固定液, 加入 1% 锇酸溶液固定 1~2 h, 分 2 份, 1 份在临界点干燥、喷金, 在 SU8010 型扫描电镜上观察; 另 1 份用包埋剂包埋, 样品经切片、染色后在 H-7650 型透射电镜中进行观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单菌株及菌株复配降解率测定结果

各菌株能够降解的主要组分可能不同,以原油为唯一碳源,7d 后 5 株菌单独存在和组合后对原油的降解率如表 1 和表 2 所示。

表 1 各单菌株对原油降解率的影响

菌种	寡氧单胞菌	铜绿假单胞菌	氧化微杆菌	中间苍白杆菌	侧孢短芽孢杆菌
降解率/%	49.91	62.40	57.38	54.65	60.22

表 2 菌株间不同组合对原油降解率的影响

混合菌株	A+B	A+C	A+D	A+E	B+C
混合比例	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
降解率/%	57.74	61.79	48.29	64.34	67.66
混合菌株	B+D	B+E	C+D	C+E	D+E
混合比例	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
降解率/%	63.30	58.18	63.05	60.16	67.25
混合菌株	A+B+C	A+B+D	A+B+E	A+D+E	A+C+D
混合比例	1:1:1	1:1:1	1:1:1	1:1:1	1:1:1
降解率/%	66.17	63.63	68.76	65.66	64.84
混合菌株	A+C+E	B+C+D	B+C+E	B+D+E	C+D+E
混合比例	1:1:1	1:1:1	1:1:1	1:1:1	1:1:1
降解率/%	63.59	74.16	61.16	66.23	56.28
混合菌株	A+B+C+D	A+B+C+E	A+B+D+E	A+C+D+E	B+C+D+E
混合比例	1:1:1:1	1:1:1:1	1:1:1:1	1:1:1:1	1:1:1:1
降解率/%	55.34	64.98	60.16	53.10	63.77
混合菌株	A+B+C+D+E				
混合比例	1:1:1:1:1				
降解率/%	58.08				

注:A:寡养单胞菌,B:铜绿假单胞菌,C:氧化微杆菌,D:中间苍白杆菌,E:侧孢短芽孢杆菌。

从表 1 中可以看出,在投加单一菌种菌液时,寡养单胞菌(A)、铜绿假单胞菌(B)、氧化微杆菌(C)、中间苍白杆菌(D)和侧孢短芽孢杆菌(E)对原油的降解率分别为 49.91%、62.40%、57.38%、54.65%、60.22%。从表 2 中可以看出,进行复配后的大部分混合菌对原油的降解率在 60% 以上,相对于单菌降解效果显著。在所有复合菌中,降解效果最好的是

铜绿假单胞菌(B)、氧化微杆菌(C)和中间苍白杆菌(D)的混合,其原油降解率为 74.16%,降解率较 3 株单菌有明显提高,说明此 3 株菌在环境中有一定的协同作用。

铜绿假单胞菌(B)、氧化微杆菌(C)和中间苍白杆菌(D)体积比对原油的降解结果如表 3 所示。

表 3 3 株菌体积比对原油降解率的影响

体积比	1:1:1	1:2:2	1:4:4	2:1:1	2:1:2
降解率/%	74.16	69.06	67.03	71.82	66.85
体积比	2:4:1	4:1:4	4:2:1	2:2:1	
降解率/%	69.48	64.59	63.50	72.61	

由表 3 可知,铜绿假单胞菌(B)、氧化微杆菌(C)和中间苍白杆菌(D)的接种量体积比为 1:1:1、2:1:1 和 2:2:1 时原油降解率都在 70% 以上,其中 1:1:1 降解效果最佳,降解率为 74.16%。

### 2.2 原油组分 GC-MS 分析结果

以质谱谱库 NIST MS 检索结果进行定性分析,结果如图 1~图 5 所示。由图 1~图 5 中可以看出,原油的 GC-MS 分析结果表明,原油组分主要为 C<sub>10</sub>~C<sub>27</sub>之间的直链烷烃。对微生物降解后原油的对比分析得出:铜绿假单胞菌(B)和氧化微杆菌(C)均对饱和烃的降解作用显著,图谱中代表直链烷烃的峰数量减少,峰值下降,说明在这 2 株单菌的作用下,直链烷烃的种类和含量均明显减少。中间苍白杆菌(D)降解后的饱和烃组分中,C<sub>10</sub>和 C<sub>27</sub>的直链烷烃已完全消失,对 C<sub>16</sub>、C<sub>19</sub>、C<sub>21</sub>和 C<sub>23</sub>的直链烷烃没有明显的降解作用,同时图谱中有 C<sub>8</sub>、C<sub>13</sub>和 C<sub>17</sub>的直链烷烃生成,说明这 2 株菌能够利用长链烷烃组分进行生长代谢,将长链烷烃降解为中短链烷烃。从图 5 中可以看出,B、C 和 D 3 株单菌混合后的残油组分中,仅剩 C<sub>10</sub>和 C<sub>23</sub> 2 种烷烃未完全降解,C<sub>10</sub>的存在是由于长链烷烃被降解时,断裂成数量较

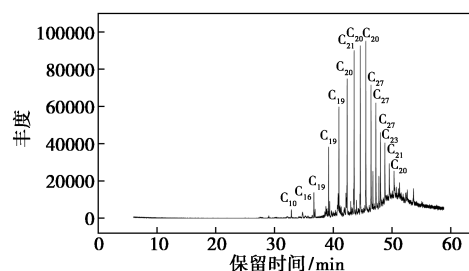


图 1 原油降解前的分析结果

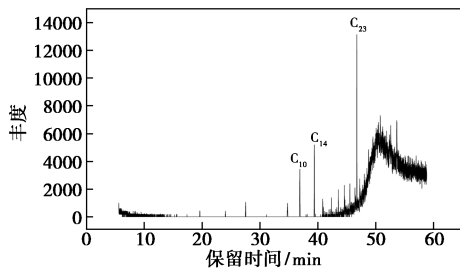


图2 铜绿假单胞菌(B)对降解后原油的分析结果

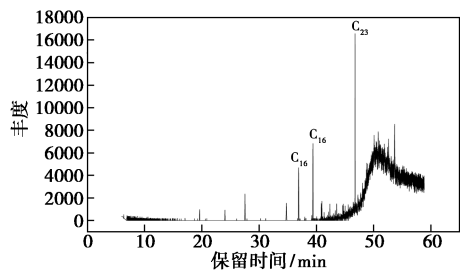


图3 氧化微杆菌(C)对降解后原油的分析结果

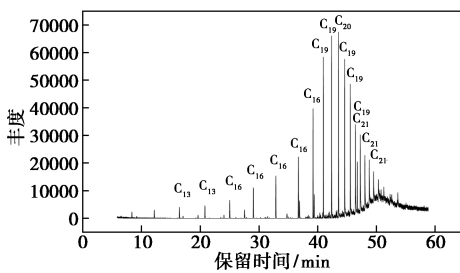


图4 中间苍白杆菌(D)对降解后原油的分析结果

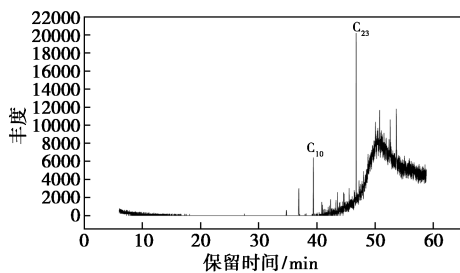


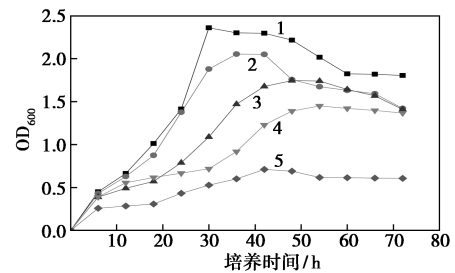
图5 B、C和D菌混合后对降解后原油的分析结果

多的  $C_{10}$  未被及时降解。与单一菌株图谱比较,  $C_{23}$  在3株菌单独降解原油时, 未能全部被降解, 因此, 3株单菌混合后  $C_{23}$  仍未被完全降解。总体而言, 3株菌混合后降解原油时无明显的抑制作用, 更趋于相互协同。

### 2.3 菌株耐盐特性

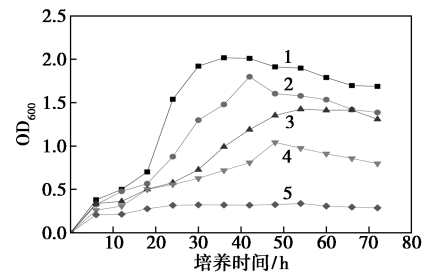
筛选出的铜绿假单胞菌、氧化微杆菌、中间苍白

杆菌在 NaCl 质量浓度分别为 10、20、30、40、50 g/L 条件下的生长情况如图 6~图 8 所示。



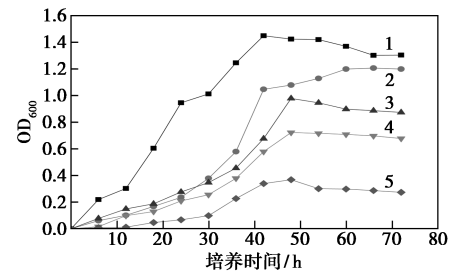
1—10 g/L; 2—20 g/L; 3—30 g/L; 4—40 g/L; 5—50 g/L

图6 铜绿假单胞菌在不同盐质量浓度培养基中生长曲线



1—10 g/L; 2—20 g/L; 3—30 g/L; 4—40 g/L; 5—50 g/L

图7 氧化微杆菌在不同盐质量浓度培养基中生长曲线



1—10 g/L; 2—20 g/L; 3—30 g/L; 4—40 g/L; 5—50 g/L

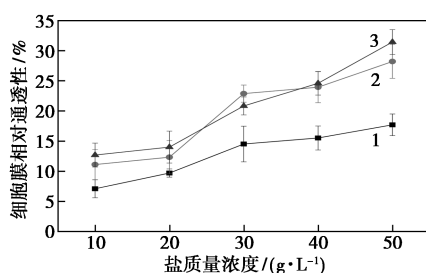
图8 中间苍白杆菌在不同盐质量浓度培养基中生长曲线

从图 6~图 8 中可以看出, 铜绿假单胞菌、氧化微杆菌和中间苍白杆菌均能在含盐质量浓度为 10 g~50 g/L 的培养基中生长。其中, 铜绿假单胞菌在耐盐驯化过程中适应性最强, 与其余 2 株菌相比, 无论是进入对数期生长期还是菌体生长情况都有明显优势, 而中间苍白杆菌在驯化阶段适应性始终表现较弱。随着盐度的升高, 3 株菌菌浓降低, 生长速率明显变慢。这是因为盐度升高对细菌生长速率具有一定的冲击, 细菌用于生长繁殖的营养物质和能量会增加, 细胞会产生新的酶系统, 合成特定溶

质以此适应新环境,该过程需要微生物对细胞能量重新分配,所以用于生长繁殖的能量变小,生长速率减慢<sup>[10]</sup>。

#### 2.4 盐质量浓度对菌株细胞膜通透性的影响

细胞膜的通透性能够反映细胞所处的生理状态,一般细胞膜的通透性变化越小,表示细胞应对外界不利环境时,维持正常生理活动的的能力越强<sup>[11]</sup>。采用电导率法测定 3 株菌在不同盐度下细胞膜通透性的变化规律,结果如图 9 所示。



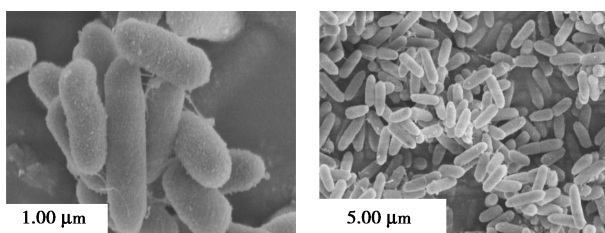
1—铜绿假单胞菌;2—氧化微杆菌;3—中间苍白杆菌

图 9 不同质量浓度下 3 株菌的细胞膜通透性

由图 9 中可以看出,3 株菌的细胞膜通透性随着盐度增加呈递增趋势。当盐质量浓度由 10 g/L 增加到 50 g/L 时,铜绿假单胞菌、氧化微杆菌和中间苍白杆菌 3 株菌细胞膜相对通透性分别由 7.10%、11.12%、12.69% 增加到 17.71%、28.21%、31.44%,其中铜绿假单胞菌相比其余 2 株菌的增幅相对较小,表明铜绿假单胞菌耐盐性优于氧化微杆菌和中间苍白杆菌。研究表明,耐盐菌株细胞在高盐度冲击下,会通过复杂的调渗机制,如短期内在体内积累某些相溶性溶质来适应环境,以维持细胞的正常生长代谢活动,因而其细胞膜相对通透性并无明显幅度的增加。

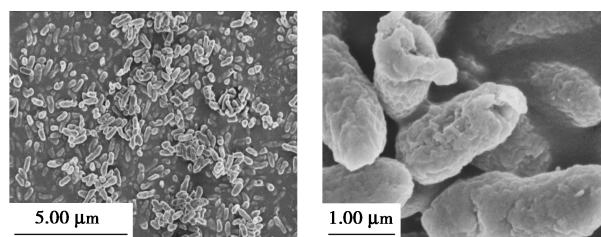
#### 2.5 盐质量浓度对菌株细胞形态的影响

不同盐度下,微生物细胞形态也会呈现出多样性。为了观察盐质量浓度对耐盐菌株细胞形态的影响,以耐盐性较好的铜绿假单胞菌为例,观察了葡萄糖培养基中盐质量浓度分别为 10、30 g/L 和 50 g/L 时菌株成熟细胞的表征,结果如图 10 所示。



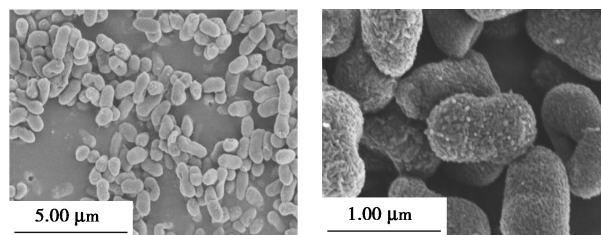
(a) 10 g/L NaCl

(b) 10 g/L NaCl



(c) 30 g/L NaCl

(d) 30 g/L NaCl



(e) 50 g/L NaCl

(f) 50 g/L NaCl

图 10 铜绿假单胞菌在培养基中生长的细胞的 SEM 图

从图 10(a)、图 10(b)中可以看出,细胞表面光滑,大小基本均匀,细胞形状为棒状,表现出很好的细胞生长同步性;从图 10(c)、图 10(d)中可以明显看出,随着培养基中含盐质量浓度上升到 30 g/L,细胞的表面开始出现褶皱,细胞形状仍为棒状;从图 10(e)、图 10(f)中可以看出,当培养基中含盐质量浓度上升到 50 g/L 时,细胞表面凹痕十分明显,表面粗糙度增大,细胞形状仍未改变。这是由于铜绿假单胞菌在高盐环境中时,细胞内渗透压低于细胞外渗透压,引起细胞脱水,导致细胞变小。实验结果表明,细胞未受到高盐胁迫时,表面较为光滑、大小均匀,生长状态良好;一旦受到外界高盐度胁迫,细胞表面粗糙,并出现凹痕,这主要是由于高渗透压可以改变细胞膜的表面结构,进而引起铜绿假单胞菌的细胞表面的褶皱和凹陷,甚至细胞破裂及骨架塌陷,最终导致细胞死亡。晏荣军<sup>[12]</sup>利用原子力显微镜(AFM)观察了淡水生长的棕囊藻和海水培养棕囊藻细胞,也得到了相似的结果。Alexis 等<sup>[13]</sup>使用苯甲酸酯作为唯一碳源,利用激光扫描共聚焦显微镜(LSCM)观察到铜绿假单胞菌处于高盐环境中时,由于渗透压胁迫,导致生物膜厚度减少大约 50%。

#### 2.6 盐质量浓度对菌株细胞内部结构的影响

通过透射电镜(H-7650 型)观察葡萄糖培养基中盐质量浓度分别为 10、30 g/L 和 50 g/L 时菌株细胞的内部结构,结果如图 11 所示。

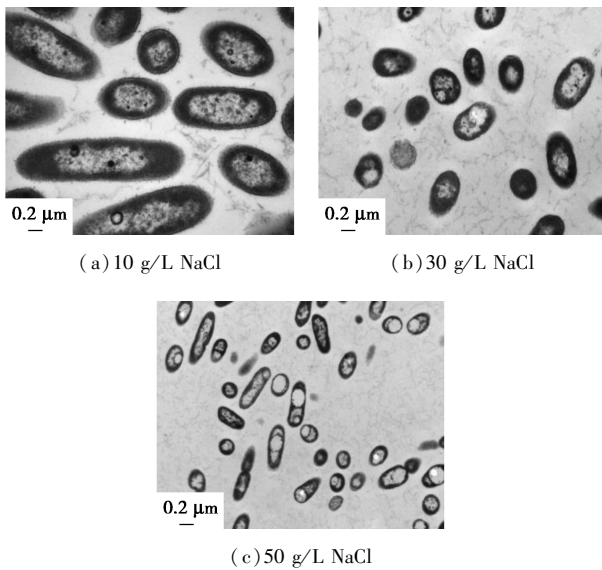


图 11 铜绿假单胞菌在培养基中生长的细胞的 TEM 图

从图 11 中可以看出,当铜绿假单胞菌在含盐质量浓度为 10 g/L 的葡萄糖培养基中生长时,细胞膜及细胞壁结构完整且紧密结合,内部细胞质均匀,细胞形态规则。当含盐质量浓度升为 30 g/L 时,细胞的内部开始发生变化,菌体内结构不清且见不到其他细胞器轮廓,细胞质明显减少,细胞内的颗粒物颜色变浅。当培养基中的盐质量浓度升高至 50 g/L,铜绿假单胞菌细胞受盐质量浓度影响破坏较为明显,细胞壁明显变薄,但仍然保持完整,细胞质减少得更为明显,且有的细胞中间出现中空、空泡现象。这是由于细胞受到高盐胁迫后,干扰了细胞膜的选择透过性功能,导致细胞膜的相对通透性增大,细胞质及其他细胞内物质外流。

### 3 结论

(1) 铜绿假单胞菌、氧化微杆菌和中间苍白杆菌接种量以体积比 1:1:1 的比例混合后,原油的降解率达到最高 74.16%。GC-MS 分析结果表明,中间苍白杆菌只能降解部分烷烃,而铜绿假单胞菌和氧化微杆菌则对饱和烃有明显的降解作用。

(2) 当培养基中含盐质量浓度从 10 g/L 上升到 50 g/L 时,铜绿假单胞菌、氧化微杆菌和中间苍白杆菌均表现出较好的耐盐性,各菌菌浓较前一梯度减少,生长活性减弱。3 株菌的细胞膜通透性呈递

增趋势。

(3) 观察铜绿假单胞菌细胞形态和内部结构表明,随着盐质量浓度增加,细胞失水,导致细胞表面出现褶皱和凹痕,细胞壁变薄,细胞质减少,严重影响了细胞的活性。

### 参考文献

- [1] Fingas M F. Modeling oil and petroleum evaporation [J]. *Journal of Petroleum Science Research*, 2013, 2(3): 104-115.
- [2] Zhang Baiyu, He Zhang, Chen Bing, *et al.* Photocatalytic degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in offshore produced water: Effects of water matrix [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2016, 142(11): 04016054.
- [3] Shanti Lamichhane, Bal Krishna K C, Ranjan Sarukkalige. Surfactant-enhanced remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 199(sep.1): 46-61.
- [4] Strong P J, Burgess J E. Treatment methods for wine-related and distillery wastewaters: A review [J]. *Bioremediation Journal*, 2008, 12(2): 70-87.
- [5] Margesin R, Schinner F. Bioremediation (natural attenuation and biostimulation) of diesel-oil-contaminated soil in an alpine glacier skiing area [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(7): 3127-3133.
- [6] 涂书新, 韦朝阳. 我国生物修复技术的现状与展望 [J]. *地理科学进展*, 2004, (6): 21-33.
- [7] Badejo A C, Badejo A O, Shin K H, *et al.* A gene expression study of the activities of aromatic ring-cleavage dioxygenases in mycobacterium gilvum PYR-GCK to changes in salinity and pH during pyrene degradation [J]. *Plos One*, 2013, 8(2): 1-8.
- [8] 刘勇波, 温玉娟, 任何军. 嗜盐石油烃高效降解菌 *Alcaligenaceae.sp. ZR-1* 的选育与降解特性 [J]. *轻工科技*, 2018, (6): 106-107.
- [9] 信欣. 耐盐菌株特性及其在高盐有机废水生物处理中的应用 [D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
- [10] Kempf B, Bremer E. Meeting the testing challenge: Today and tomorrow [J]. *Microelectronics Reliability*, 1998, 23(6): 319-330.
- [11] 张云起, 刘世琦, 杨凤娟, 等. 耐盐西瓜砧木筛选及其耐盐机理的研究 [J]. *西北农业学报*, 2003, 12(4): 105-108.
- [12] 晏荣军. 球形棕囊藻与溶藻细菌的关系研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2006.
- [13] Bazire A, Farès Diab, Jebbar M, *et al.* Influence of high salinity on biofilm formation and benzoate assimilation by *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2007, 34(1): 5-8. ■