

# 微生物微电解质体系降解压裂返排液沉降底泥中苯并(a)芘的应用研究

李秀敏<sup>1</sup>, 卞卫国<sup>2\*</sup>, 程璇<sup>1</sup>, 李延隆<sup>3</sup>, 马庆国<sup>4</sup>, 王磊<sup>3</sup>, 刘向阳<sup>2</sup>, 云箭<sup>1</sup>, 张芳袁<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京

<sup>2</sup>中科院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐

<sup>3</sup>中国石油集团渤海石油装备有限公司, 辽宁 盘锦

<sup>4</sup>中国石油长庆油田分公司, 陕西 延安

Email: \*bianwg@ms.xjb.ac.cn, \*fyzhang@ms.xjb.ac.cn

收稿日期: 2021年7月15日; 录用日期: 2021年8月16日; 发布日期: 2021年8月24日

## 摘要

苯并(a)芘是一种致癌物、致畸原和诱变剂, 是毒性最大的多环芳烃。本文利用微生物微电解质体系降解压裂返排液沉降底泥中的苯并(a)芘, 通过对微生物的生长过程的观察与压裂返排液沉降底泥中苯并(a)芘含量的变化, 优选出有效的菌群实验配比及微电解质环境。

## 关键词

苯并(a)芘, 微生物, 微电解质

# Application of Microbial Micro-Electrolyte System to Degrade Benzo(a)Pyrene in Sediments of Fracturing Flowback Fluid

Xiumin Li<sup>1</sup>, Weiguo Bian<sup>2\*</sup>, Xuan Cheng<sup>1</sup>, Yanlong Li<sup>3</sup>, Qingguo Ma<sup>4</sup>, Lei Wang<sup>3</sup>, Xiangyang Liu<sup>2</sup>, Jian Yun<sup>1</sup>, Fangyuan Zhang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>China National Petroleum Corporation Safety and Environmental Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing

<sup>2</sup>Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang

<sup>3</sup>China National Petroleum Corporation Bohai Petroleum Equipment Co., Ltd., Panjin Liaoning

<sup>4</sup>Petro China Changqing Oilfield Company, Yan'an Shaanxi

Email: \*bianwg@ms.xjb.ac.cn, \*fyzhang@ms.xjb.ac.cn

Received: Jul. 15<sup>th</sup>, 2021; accepted: Aug. 16<sup>th</sup>, 2021; published: Aug. 24<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

文章引用: 李秀敏, 卞卫国, 程璇, 李延隆, 马庆国, 王磊, 刘向阳, 云箭, 张芳袁. 微生物微电解质体系降解压裂返排液沉降底泥中苯并(a)芘的应用研究[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(4): 792-799. DOI: 10.12677/aep.2021.114093

## Abstract

Benzo(a)pyrene is a carcinogen, teratogen and mutagenic agent. It is the most toxic polycyclic aromatic hydrocarbon. In this paper, a microbial micro-electrolyte system was used to degradation of Benzo(a)pyrene in the sedimentation sediment of fracturing flowback fluid. By observing the growth process of microorganisms and the change of Benzo(a)pyrene content in the sedimentation sediment of fracturing flowback fluid, the effective microbial flora experiment ratio and micro-electrolyte environment were optimized.

## Keywords

Benzo(a)Pyrene, Microorganism, Micro-Electrolyte

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

苯并(a)芘(BaP)作为强致癌性多环芳香烃(PAHs)的代表已被许多国家和国际环保卫生机构确认为重点监测的危险物[1]-[11]。我国 1997 年 1 月 1 日起实施的《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996)规定大气中苯并芘含量为 0.01  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下。1998 年 1 月 1 日起实施的《污水综合排放标准》(GB8978-1996)规定工业污水中苯并芘排放标准为 0.03  $\mu\text{g}/\text{L}$  以下。1998 年 8 月 1 日起实施的《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618-2018)规定农用地土壤中苯并(a)芘含量为 0.55  $\text{mg}/\text{kg}$  以下。2013 年 6 月 1 日起实施的《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB2762-2012)规定谷物, 肉类和水产及其制品中并(a)芘含量为 5  $\mu\text{g}/\text{kg}$  以下。2017 年 4 月 30 日发布、并于 2017 年 5 月 30 日实施的新疆维吾尔自治区地方标准 DB 65/T 3997-2017《油气田钻井固体废物综合利用污染控制要求》和 DB 65/T 3999-2017《油气田含油污泥及钻井固体废物处理处置技术规范》明确将固体废弃物中污染物苯并(a)芘含量规定了限值为: 0.7  $\text{mg}/\text{kg}$ 。

在油气田压裂生产过程中苯并(a)芘随废弃物分布于大量的钻屑和土壤中[12]-[20]。油气田中的固体废弃物主要是包括含油污泥, 压裂返排液沉降底泥, 钻井固体废物, 废弃油基泥浆及岩屑, 废弃磺化泥浆及岩屑。这些固体废弃物中不仅含有苯并(a)芘和其他污染物, 而且还含有大量的可回收资源。如果这些固体废弃物中的污染物不处理将对环境造成极大的危害, 通过合适的处理方法去除这些固体废弃物中污染物, 将实现资源的再回收与利用。油气田固体废物处理主要通过化学热洗处理, 焚烧处理, 热裂解处理以及生物技术处理。目前苯并(a)芘的降解主要还是以真菌、细菌等天然环境中筛选出的菌种为主[21]-[30]。

本文是以倍活产品(针对石油烃类物质以及其他油性物质去除研究的生物制剂)配合工业菌剂在微电解质的环境下达到对压裂返排液沉降底泥中的苯并(a)芘的有效降解。通过微生物修复实验优先出的配比方案, 通过 14 天的微生物培养, 苯并(a)芘含量降到 0.280  $\text{mg}/\text{kg}$ , 达到了排放标准要求。

## 2. 实验部分

### 2.1. 仪器与药品

主要仪器如表 1, 药品如表 2。

**Table 1. Main instruments****表 1. 主要仪器**

仪器	规格(型号)	厂家(产地)
索氏提取器(脂肪提取器)	Buchi 自动索氏抽提装置 E-812	BUCHI 步琦实验室设备贸易有限公司(瑞士)
液相色谱系统	Agilent 1290	赛默飞世尔科技公司(美国)
赛默飞 Thermo TSQ 三重四极杆液质联用仪	TSQ QUANTUM	安捷伦科技有限公司(德国)

**Table 2. Main drugs****表 2. 主要药品**

试剂	厂家
正己烷	深圳市中盛科仪科技有限公司
丙醇	佛山予华仪器科技有限公司
活性铁粉	灵寿县强东矿产品加工厂
活性炭	河南弘之源净水材料有限公司

## 2.2. 供试菌种

MicroPlex-COD (菌种 A) (表 3)是由微生物菌种、酶制剂和营养物质专业配比的产品,其中微生物菌种是从大自然中筛选出的 6 款芽孢杆菌和 1 款铜绿假单胞菌混合的工程菌。酶制剂由蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶、脲酶、纤维素酶和硝酸盐还原酶合理比例配比。MicroPlex-COD 具备多种有机物降解能力,广泛应用于固废和废水处理,能够分解表面活性剂、碳氢化合物、酚类化合物、酮以及不易分解的有机物。可以提高微生物生长速度和使用率,对油田开发产生的固体废弃物有良好的降解效果,将有机类的固废转化成微生物生长繁殖所需的营养物质,从而达到减少固废的目的。

**Table 3. MicroPlex-COD characteristics****表 3. MicroPlex-COD 特点**

外观形态	棕色、粉末状
组分	微生物菌种、酶制剂、营养物质
菌数	$>1 \times 10^9$ CFU/g
保质期	2 年
包装规格	22.5 kg/桶
应用行业	石油炼化、造纸、制浆、化工、煤化工、印染、化纤、纺织、市政、工业园区等污水处理厂

MicroPlex-Oil (菌种 B) (表 4)是针对石油烃类物质以及其他油性物质去除研究的生物制剂,它由自然中筛选的微生物菌种,天然的油性物质吸收剂和无机营养物质专业配比混合组成。MicroPlex-Oil 主要用于浮油的吸收,石油类物质以及其他油性物质的降解。它对多种油类、溶剂、单体石油衍生物等油性物质的去除效果很好。MicroPlex-Oil 可直接使用在油性物质上,对油性物质有良好的吸附/降解作用。油田固废所附着的油性物质基本为大分子有机物,很难被微生物直接吸收利用, MicroPlex-Oil 则可将其进行分解成便于吸收的小分子,从而促进废弃物被分解吸收。

**Table 4.** Characteristics of MicroPlex-Oil**表 4.** MicroPlex-Oil 的特点

外观形态	棕色、粉末状
外观形态	褐色、粉末状
组分	天然吸附剂、筛选的微生物菌种、有机无机营养物质
保质期	2 年
包装规格	11.3 kg/桶
应用行业	石油炼化、造纸、制浆、化工、煤化工、印染、化纤、纺织、市政、工业园区等污水处理厂

工程菌 C (菌种 C) 是一种试验菌剂，形态外观为橘黄色的液体，有较强气味。

### 2.3. 分析方法

#### 2.3.1. 固体样品的抽提

- 1) 称取适量冻干后的土壤样品 20 克，放入索氏提取器盛放样品的漏斗纸筒里。
- 2) 往索氏提取器提取装置里加入正己烷，丙酮 1:1 的分析醇 150 ml。
- 3) 调好索氏提取器的提取程序 2 小时加热萃取，45 分钟液洗，20 分钟干燥。
- 4) 提取程序结束后将提取液放入浓缩杯中。
- 5) 将 20 g 土壤样品的索氏提取液浓缩至 1 毫升待测油脂。

索氏提取器通过利用溶剂回流及虹吸原理，使待提取固体物质持续被纯溶剂萃取，不仅减少溶剂的使用，而且萃取效率又高。需要将固体物质磨碎再萃取，使萃取更充分。然后，把固体物质放置于提取器中的滤纸筒内，提取器的下端与盛有浸出溶剂的提取筒相连，上面接回流冷凝管。通过加热提取器中的溶剂，使溶剂沸腾，蒸气通过连接管上升，进入到冷凝管中，被冷凝后滴入提取器中，溶剂和固体接触进行萃取，当提取器中溶剂液面达到虹吸管的最高处时，含有萃取物的溶剂虹吸回到烧瓶，因而萃取出了一部分物质。然后提取筒内的浸出溶剂继续蒸发、冷凝、浸出、回流，如此重复，使固体物质不断为纯的浸出溶剂所萃取，将萃取出的物质富集在提取筒中。

#### 2.3.2. 苯并(a)芘含量的测试

高效液相色谱法(High Performance Liquid Chromatography\HPLC)又称“高压液相色谱”、“高速液相色谱”、“高分离度液相色谱”、“近代柱色谱”等。它是在生化和分析化学中常用的柱层析仪。

高效液相色谱是色谱分析法中的一个重要组成部分，通过在流动相组成单一成分或多组分的液体成分将固定相中的待检测成分分离出，待检测成分通过检测组分进行检测，形成色谱柱来分析。该方法可以解决多领域内分析检测工作，是一项十分重要的分析分离技术。

高效液相色谱仪操作步骤如下：

- 1) 流动相经过过滤，通过检测需要选择合适的滤膜。
- 2) 流动相先经过抽滤，然后超声脱气 10~20 分钟。
- 3) 打开 hplc 工作站(包括计算机软件和色谱仪)，流动相管道合适的连接，然后与检测系统连接。
- 4) 进入 hplc 控制界面主菜单，点击 manual，进入手动菜单。
- 5) 根据菜单栏进行色谱分析。

### 2.4. 微生物降除实验

微生物修复物化因素主要包括温度，PH，C、N、P 等无机因素，氧气，铁碳微电解材料等。

#### 1) 温度

温度对微生物的影响极其重要，绝大多数微生物在较低的温度下(-30℃)活性几乎为零，在温度过高时微生物会失活，只有在适宜的温度条件下，微生物活性才能达到最高，本方案采用 24℃。

#### 2) pH

过酸或过碱条件下微生物都会失活，一般微生物降解能力最强时 pH 约为 6~8。

#### 3) C、N、P 等无机因素

在微生物降解代谢过程中需要适宜的 C、N、P 等无机因素，可以添加适宜的 C、N、P，例如硫酸铵、磷酸二氢钾、尿素等。本方案采用 300 mg/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 100 mg/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 的营养液作为微生物 C、N、P 的原料。

#### 4) 氧气

微生物的活性主要是依据氧气和二氧化碳吸收和消耗在一定时间内的通气量。厌氧微生物和好氧微生物对氧气的需求量不同，过高或高低的氧气都会抑制微生物的活性，本文微生物培养在恒温培养箱中，并不控制氧气量。

#### 5) 铁碳微电解材料

铁碳微电解主要是指活性铁粉和活性炭构成的微小电极在水污染治理中应用及其广泛。还原铁对微生物的降解作用主要体现在硝基苯的降解，活性炭不仅可以吸附水和土壤中的有机物质，而且还能使土壤的孔隙增加能有利于通氧，此外活性炭能吸附部分有害物质使其难以释放到空气中，因此更有利于微生物的降解作用。

选取苯并(a)芘含量为 1.227 mg/kg 的压裂返排液沉降底泥进行微生物降解实验。分别设置对照区 0 不做任何处理；修复区 1 定期投加菌剂 A + 菌剂 B；修复区 2 定期投加菌剂 A + 菌剂 B + 活性剂；修复区 3 定期投加菌剂 A + 菌剂 C；修复区 4 定期投加菌剂 A + 菌剂 C + 活性剂；修复区 5 定期投加菌剂 A + 菌剂 B + 菌剂 C；修复区 6 定期投加菌剂 A + 菌剂 B + 菌剂 C + 活性剂(表 5)。在不同的修复区加入不同菌种配比组合和活性剂做正交实验，菌种 A 加入量从 2 mg 开始以后每组实验增加投放量 4 mg，做到菌种最高加入量 38 mg。菌种 B 加入量从 1 mg 开始以后每组实验增加投放量 2 mg，做到菌种最高加入量 19 mg。菌种 C 加入量从 1 mg 开始以后每组实验增加投放量 2 mg，做到菌种最高加入量 19 mg。活性炭/铁粉(1:1)加入量从 10 mg 开始以后每组实验增加投放量 10 mg，做到最高加入量 100 mg。(表 5)

**Table 5.** Experimental division and drug ratio

**表 5.** 实验分区与药品配比

样品编号	样品重量(g)	菌种 A (mg)	菌种 B (mg)	菌种 C (mg)	活性炭/铁粉(1:1) (mg)
对照区 0	400.00	0	0	0	0
修复区 1	400.00	2-38	1-19	0	0
修复区 2	400.00	2-38	1-19	0	10-100
修复区 3	400.00	2-38	0	1-19	0
修复区 4	400.00	2-38	0	1-19	10-100
修复区 5	400.00	0	1-19	1-19	0
修复区 6	400.00	0	1-19	1-19	10-100

### 3. 结果与讨论

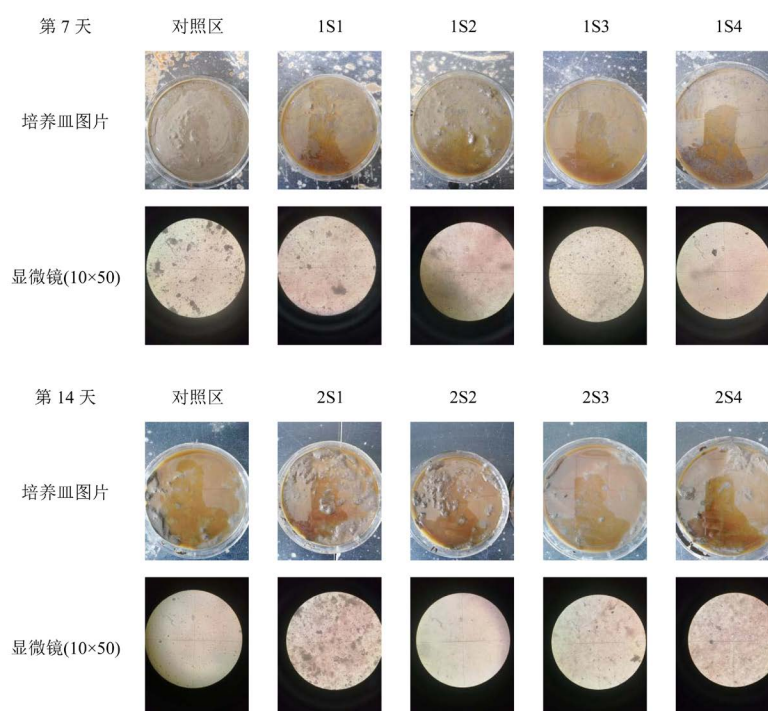
实验过程中，对 60 组不同菌种和活性剂配比的实验组里菌群生长情况较好的修复 1 区(S1)，修复 2

区(S2), 修复 3 区(S3)和修复 4 区(S4)中微生物生长较好的四组(菌种配比表 6)分别进行 7 天, 14 天和 21 天试验跟踪观察与测试(图 1, 图 2)。

**Table 6.** Experimental zones with good microbial growth and drug ratio

**表 6.** 微生物生长较好的实验分区与药品配比

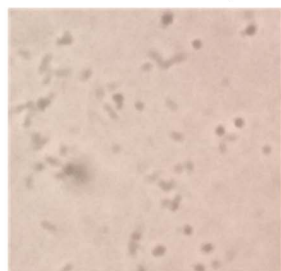
样品编号	样品重量(g)	菌种 A (mg)	菌种 B (mg)	菌种 C (mg)	活性炭/铁粉(1:1) (mg)
对照区 0	400.00	0	0	0	0
S1	400.00	14	7	0	0
S2	400.00	14	7	0	80
S3	400.00	14	0	7	0
S4	400.00	14	0	7	80



**Figure 1.** Photos of samples and microorganisms under microscope

**图 1.** 样品及显微镜下微生物照片

S4样品第7天显微镜 (10×50)



S4样品第14天显微镜 (10×50)



**Figure 2.** Comparison of microbial micrographs

**图 2.** 微生物显微照片对比

通过实验观察发现, S1, S2, S3 和 S4 四个修复样品的微生物生长状态良好, 通过 7 天与 14 天采样显微镜下观察发现, 微生物有明显生长。特别是 S4 号样品, 微生物生长覆盖样品表面。分别采集 7 天和 14 天的 S1, S2, S3 和 S4 样品进行苯并(a)芘含量的测试, 结果如表 7。通过观察, 14 天后样品微生物开始萎缩, 因此不再进行苯并(a)芘的采样测试。

**Table 7.** Test data of Benzo(a)pyrene content in samples (1S0, 1S1, 1S2, 1S3 and 1S4 represent test samples sampled on day 7, 2S0, 2S1, 2S2, 2S3 and 2S4 represent test samples sampled on day 14)

**表 7.** 样品苯并(a)芘含量的测试数据(1S0, 1S1, 1S2, 1S3 和 1S4 代表第 7 天采样测试样品, 2S0, 2S1, 2S2, 2S3 和 2S4 代表第 14 天采样测试样品)

序号	样品编号	检测结果 ( $\mu\text{g/mL}$ )	样品重量 ( $\text{mg/kg}$ )	苯并(a)芘含量 ( $\mu\text{g/g}$ )	苯并(a)芘含量 ( $\text{mg/kg}$ )
1	1S0	18.886	15.060	0.627	0.627
2	2S0	21.495	15.030	0.715	0.715
3	1S1	11.546	12.140	0.475	0.475
4	1S2	19.521	15.000	0.651	0.651
5	1S3	15.528	10.000	0.979	0.979
6	1S4	22.797	13.000	0.776	0.776
7	2S1	24.457	15.090	0.810	0.810
8	2S2	20.245	15.000	0.675	0.675
9	2S3	21.447	15.010	0.714	0.714
10	2S4	8.405	15.000	0.280	0.280

通过微生物修复实验我们优先出 S4 的配比方案实验, 通过 14 天的微生物培养, 苯并(a)芘含量降到 0.280  $\text{mg/kg}$ , 达到了标准要求的排放浓度以下。

#### 4. 结论

我们以倍活产品(针对石油烃类物质以及其他油性物质去除研究的生物制剂)配合工业菌剂在微电解质的环境下对油田压裂返排液沉降底泥中的苯并(a)芘进行实验降除研究。通过微生物修复实验优选出有效降解方案。研究发现, 油田压裂返排液沉降底泥苯并(a)芘超标的样品通过 14 天的微生物培养, 苯并(a)芘含量降到 0.280  $\text{mg/kg}$ , 达到了排放标准要求。本研究为后期油田压裂生产中的环境排放达标提供了有效的解决方案。

#### 基金项目

低碳与清洁发展关键技术研究与应用“储层改造返排液循环利用及资源化技术与示范应用”(2016E-12); 煤层气勘探开发关键技术研究与应用“煤层气与煤系地层天然气综合开发技术研究”(2017E-1406)。

#### 参考文献

- [1] 傅娟, 蒋义国, 陈家堃, 等. 致癌物诱导恶变细胞中线粒体高变区序列分析[J]. 中国公共卫生, 2006, 22(7): 816-817.
- [2] 段小丽, 魏复盛. 苯并(a)芘的环境污染、健康危害及研究热点问题[J]. 世界科技研究与发展, 2002, 24(1): 11-17.
- [3] 杨兆海, 郑杰, 陶江川, 等. 苯并芘诱发的人支气管癌细胞系 p53 基因突变的研究[J]. 实验动物科学与管理, 1996(3): 12-15.

- [4] 罗皓, 唐焕文, 杜进林, 等. 苯并(a)芘的毒性及其致癌机制研究现状[J]. 实用预防医学, 2011, 18(4): 772-773.
- [5] 王丹, 曹维强, 王静. 食品安全隐患——苯并(a)芘的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(1): 132-135.
- [6] 袁达齐. 防治苯并(a)芘致癌的几点建议[J]. 环境保护, 1982(2): 6-7.
- [7] 李永红, 金银龙. 苯并(a)芘致癌机制研究新进展[J]. 医学研究杂志, 2011, 40(8): 152-154.
- [8] 陈炳卿, 于守洋. 苯并(a)芘对食品的污染与致癌[J]. 中国农村医学, 1981(2): 27-28.
- [9] 邱洪斌, 王跃新, 王建杰. 城市街道大气颗粒物有害成分及来源的研究[J]. 佳木斯医学院学报, 1997(1): 12-14.
- [10] 李海明, 陈鸿汉, 郑西来, 等. 地下水中苯并(a)芘来源探讨[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 21-24.
- [11] 冯承莲, 夏星辉, 周追, 等. 长江武汉段水体中多环芳烃的分布及来源分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1900-1908.
- [12] 李颖, 陈曦, 李秀敏, 等. 化学热洗处理含油污泥工程应用[J]. 油气田环境保护, 2018, 28(1): 14-16, 60.
- [13] 马江平, 赵红刚, 王峰, 等. 化学热洗—重金属固化法处理含油污泥实验研究[J]. 油气田环境保护, 2015, 25(3): 18-20, 72.
- [14] 刁潘. 化学热洗—生物降解联合处理含油污泥[D]: [硕士学位论文]. 南充: 西南石油大学, 2014.
- [15] 张磊, 仝坤, 王星晖, 等. 超声波技术处理含油污泥研究进展[J]. 油气田环境保护, 2015, 25(6): 73-76, 87.
- [16] 马娜, 李咏梅, 顾国维. 难降解有机污染物的生物治理技术进展[J]. 工业水处理, 2002, 22(10): 1-4.
- [17] 李凯峰, 温青, 夏淑梅. 石油污染土壤的生物处理技术[J]. 应用科技, 2002, 29(10): 62-64.
- [18] 包木太, 王兵, 李希明, 等. 含油污泥生物处理技术研究[J]. 自然资源学报, 2007, 22(6): 865-871.
- [19] Gu, Q., *et al.* (2009) Development of a Rat Model by 3,4-Benzopyrene Intra-Pulmonary Injection and Evaluation of the Effect of Green Tea Drinking on P53 and Bcl-2 Expression in Lung Carcinoma. *Cancer Detection and Prevention*, **32**, 444-451. <https://doi.org/10.1016/j.canep.2009.04.002>
- [20] Su, F., Xie, Y. and Fang, Z. (2013) Effects on the Courtship Behavior of Mosquitofish (*Gambusia affinis*) Exposed to 3,4-Benzopyrene(BaP) and Cadmium(Cd<sup>2+</sup>). *Journal of Biology*, **30**, 5-10.
- [21] Gu, Q., *et al.* (2018) A Comparison between Lung Carcinoma and a Subcutaneous Malignant Tumor Induced in Rats by a 3,4-Benzopyrene Injection. *International Journal of Clinical and Experimental Pathology*, **11**, 3934-3942.
- [22] De la Serna, J., Gomez, A.M. and Fernandez Patier, R. (1980) Effect of Sunlight on the Concentrations of 3,4-Benzopyrene in the Atmosphere of Madrid. *Revista de Sanidad e Higiene Publica*, **54**, 1243-1256.
- [23] Fan, R., Liu, Y. and Zhang, X. (2019) Isolation and Degradation Characteristics of Haloalkaliphilic High Molecular-Weight Polycyclic Aromatic Hydrocarbon-Degrading Bacteria. *Journal of Agro-Environment Science*, **38**, 1280-1287.
- [24] Li, M., *et al.* (2019) Review on the Microbial Biodegradation and Metabolism of Autotoxic Phenolic Acids. *Asian Journal of Ecotoxicology*, **14**, 72-78.
- [25] Li, S., *et al.* (2019) Advances in Molecular Detection on Aromatic Bioremediation. *China Environmental Science*, **39**, 2577-2587.
- [26] Tang, T., *et al.* (2019) Research Progress on Biodegradation and Transformation Pathways of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section*, **35**, 403-413.
- [27] Wang, Y., *et al.* (2019) Advances in Research on Activators Promoting Microbial Degradation of Dyes. *Chemical Industry and Engineering Progress*, **38**, 2968-2976.
- [28] Xiao, D., *et al.* (2019) Biochar Enhances Microbial Degradation of High Concentration Phenol in Simulated Wastewater. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **39**, 2108-2116.
- [29] Xue, C., *et al.* (2019) The Microbiological Degradation and Adsorption Performance of Diethyl Phthalate. *Environmental Pollution & Control*, **41**, 526-530, 535.
- [30] Zang, S., *et al.* (2018) Protein Response of Bacterial Enzymes Involved in Degradation during BaP Degradation. *Chinese Journal of Ecology*, **37**, 3086-3091.