

# 生物堆技术在某苯并[a]芘污染场地的中试研究

黄春敏 商宏华 姚文冲

杭州臻尚环境科技有限公司 杭州 310000

**摘要:** 苯并[a]芘是高活性的间接致癌物,也是污染场地中常见的污染因子。本中试研究基于某苯并[a]芘污染场地,建立200m<sup>3</sup>的生物堆反应系统,进行120天的微生物修复,运行结束后,各采样点苯并[a]芘浓度均低于修复目标值。本中试研究为苯并[a]芘污染场地修复提供了新的修复思路。

**关键词:** 生物堆技术; 苯并[a]芘; 土壤修复

## Pilot study on bioreactor technology in a benzo [a] pyrene contaminated site

Chunmin Huang, Honghua Shang, Wenchong Yao

Hangzhou Zhenshang Environmental Technology Co., Ltd. Hangzhou 310000

**Abstract:** Benzo[a]pyrene is a highly active indirect carcinogen and a common pollution factor in soil remediation. Based on a benzo[a]pyrene contaminated site, a 200 m<sup>3</sup> bioreactor system was established for 120 days of bioremediation. After the operation, the concentration of benzo [a] pyrene in all sampling sites was lower than the target value of remediation. This pilot study provided a new idea for remediation of benzo [a] pyrene contaminated sites.

**Keywords:** Bioreactor technology; Benzo[a]pyrene; Soil remediation

### 1 背景概况

随着工农业生产和城市化发展,土壤污染问题越发凸显。生物修复技术是一种绿色、可持续的修复技术,具有良好的应用前景。生物堆技术是最常用的异修复技术,即将污染土壤挖掘出来,补充适量水分、养分和氧气后,利用微生物降解土壤中污染物质的修复方法。影响生物堆技术修复效果的关键技术参数包括:污染物的生物可降解性、污染物的初始浓度、土壤通气性、土壤营养物质含量、土著微生物数量、土壤含水率、土壤温度和pH、运行过程中堆体内氧气含量等。

苯并[a]芘,也称3,4-苯并[a]芘,是多环芳烃物质中毒性最大、致癌性最强的物质。土壤中苯并[a]芘主要来源于矿物油或大气中矿物燃料及其它有机质不完全燃烧产物沉降,根据仲冉<sup>[1]</sup>等报道,土壤中的苯并[a]芘含量受产业类型、发展程度、土地规模影响,华北、东北地区主要受老工业基地影响,燃煤、化工为主的第二产业会产生较多的苯并[a]芘,东部沿海、珠三角苯并[a]芘主要受轻工业影响,土壤中苯并[a]芘含量整体较小。

苯并[a]芘污染土壤的常用修复方法包括热脱附技

术、化学氧化技术,生物技术通常因为土壤修复项目工期紧张,应用较少。但是国内已经有多个团队正在进行苯并[a]芘污染土壤的新型修复技术研发,朱利中团队<sup>[2]</sup>正在研究化学氧化-微生物耦合修复技术,董星辰<sup>[3]</sup>分离筛选获得降解苯并[a]芘的假单胞菌并研究其代谢机理,为后续生物修复提供技术支撑。孙红文研究了苯并[a]芘的新型表面活性剂强化电动生物修复技术,刘鑫等研究了苯并[a]芘的植物修复技术。对于微生物修复的研究,也有多个团队正在进行:蒋慕贤团队、赵秀兰团队等研究了生物堆修复多环芳烃类污染土壤;谢林培<sup>[4]</sup>等通过添加表面活性剂、通风等方法强化生物堆修复多环芳烃污染土壤效率;曾光明<sup>[5]</sup>团队研究了多环芳烃与重金属的微生物转化机制,并进行堆肥化验证。但是上述生物修复研究均针对多环芳烃大类,本中试是针对苯并[a]芘单一污染场地,只关注污染因子苯并[a]芘,具有更强的针对性。

### 2 中试实验

#### 2.1 中试材料

本中试实验场地污染范围内土壤特性:第1层:素

填土，厚度约0.5m，土壤颜色较杂，灰杂色为主，稍密，湿，土质均匀性较差；第2层：粘质粉土，厚度约0.5m，土质均匀性一般；第3层：砂质粉土厚度5~8m，灰色，湿，稍密，含少量粘性土及云母碎屑，切面粗糙，无光泽，干强度及韧性低，摇振反应迅速。全场分布均匀。因此选择土质均一的第三层土壤进行中试实验。

本中试研究基于苯并[a]芘污染场地，结合前期苯并[a]芘污染土壤小试实验获得的实验参数，进行中试试验。

本中试采用的菌种为合作单位提供的、有机物高效降解菌种BZ01，已应用于国外多个有机污染场地的修复，产品是无毒、无腐蚀性、无酸性、无病原体、可生物降解的纯天然环境友好型生物修复剂。

## 2.2 中试方法

### 2.2.1 生物堆系统组成

生物堆系统包括：堆台系统、土壤堆体、通风系统、检测系统、尾气处理系统等，具体组成如下所示。

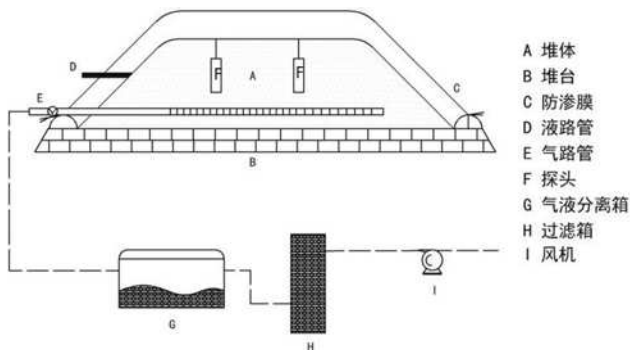


图1 生物堆结构示意图

### 2.2.2 生物堆建设方法

(1) 场地准备。充分考虑场地面积、临水临电接入、土壤运输便利性、温度、环境变化等因素。

(2) 生物堆的基础。包括硬化地面、HDPE膜、导排系统等部分。

(3) 曝气系统建设。由于主管、歧管、支管、气液分离箱、旋风分离器、鼓风机、活性炭罐、水泵及液体储集罐组成。本中试生物堆体共设9根支管，垂直与生物堆的长边，每根支管由1.5m长的PVC管材（管径75mm）和5m长的割缝PVC花管组成（管径75mm），花管末端加盖。本曝气系统科切换进行气体抽提和空气注入，气体抽提时连接后续的废气处理系统。

(4) 养分、水分输送系统建设。保证堆内有足够的水和养分来保障微生物的生长和生物降解。

(5) 菌种活化。将BZ01菌种液体加入等比例的BZ01菌种配套营养液（营养液C：N：P比例为100：10：1），再按1：200的比例用清水稀释；彻底搅拌1分钟，

混合均匀后置于阴凉干燥处；每隔2-3小时再搅拌1分钟，16-24小时后，再次用力充分搅拌后准备喷洒在受污染土壤上。

(6) 土壤与微生物混合。首先进行土壤预处理，筛分去除建渣等杂质，加入适量肥料，均匀翻抛，将活化好菌种均匀喷洒在土壤中。

(7) 堆体建设。通过装载机将土壤转运至生物堆系统，注意避开已经搭设的气路管路、监测管路等。土壤转运完成后进行土壤修坡、覆盖、防渗、管路连接等，完成生物堆系统建设。本项目最终形成的堆体形状：上底面长20m，宽4m；下底面长20m，宽6m；高度1.5m；堆体方量为200m<sup>3</sup>，垂直于生物堆的长边共设9根气路管路、9根注药管路。

### 2.2.3 生物堆修复

生物堆堆体建设完成后即进入生物修复阶段，通过监测探头密切监测土壤中的水分、氧气及温度变化。本中试控制生物堆堆体氧气含量10%以上，若低于控制值，立即通入空气；水分含量会随着通气和抽提而降低，及时补充水分，保持堆体土壤中水分含量30%左右。同时堆体温度高于55℃，则通入水或营养液降温。生物修复过程中若土壤堆体中CO<sub>2</sub>浓度明显提高，说明微生物进行好氧降解速度提升；若土壤气体浓度较长时间不变，可能生物修复已经完成。

中试期间，定期进行土壤养分补充，定期进行取样检测，分析土壤中苯并[a]芘浓度。

## 3 中试实验结果

### 3.1 生物堆体重氧气含量

氧气是微生物生长、好氧降解过程中核心的因素之一，因此本中试重点关注生物堆堆体中的氧气含量。因生物堆气路管距堆体底部0.3m（堆体总高度1.5m）、且气路管路间隔2m布设、堆体用HDPE膜覆盖等原因，生物堆堆体内不同点位的氧气含量差异较大，如下表所示。

表2 生物堆体中不同点位土壤氧气含量

编号	点位高度	氧气含量		
		1	2	3
1	0~0.3m	19%	18%	18%
2	0.3~0.6m	20%	19%	18%
3	0.6~0.9m	18%	16%	14%
4	0.9~1.2m	16%	13%	12%
5	1.2~1.5m	14%	11%	11%

说明：点位高度为点位距离堆体底部的高度，下同。

由上表可知，土壤堆体氧气含量可以维持10%以上，但是土壤堆体中不同点位的氧气含量差异较大，离

气路管越远, 土壤氧气含量越低。

### 3.2 不同点位苯并[a]芘最终检测结果

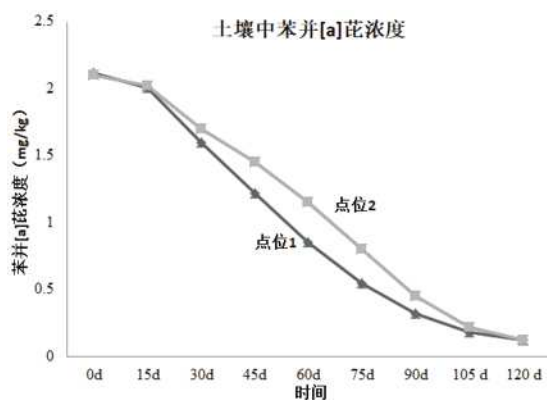
由于生物堆体并非完全均质, 氧气含量、温度、养分等均能影响微生物活性, 因此在堆体中不同点位, 土壤中苯并[a]芘浓度不同。修复完成后测得的苯并[a]芘浓度如下表所示。

编号	点位高度	苯并[a]芘浓度 (mg/kg)			
		修复前	修复后		
1	0~0.3m	2.14	0.14	0.13	0.11
2	0.3~0.6m	2.12	0.11	0.12	0.10
3	0.6~0.9m	2.09	0.03	0.02	0.05
4	0.9~1.2m	2.09	0.02	0.08	0.05
5	1.2~1.5m	2.10	0.18	0.20	0.24

由上表可知, 经过120天修复后, 土壤中的苯并[a]芘浓度大幅下降, 所有检测值都降至修复目标值0.55mg/kg (GB36600中建设用地第一类筛选值) 以下, 其中, 点位高度0.6~0.9m的点位苯并[a]芘浓度最低, 为0.02mg/kg, 说明生物堆修复对于苯并[a]芘污染土壤的有效性。由于氧气、营养等因素的影响, 总体来看, 堆体中部苯并[a]芘的降解率高, 堆体四周降解率略低。

### 3.3 苯并[a]芘降解过程

本中试选择2个点位 (前期预留取样孔) 进行生物修复过程中苯并[a]芘浓度监测, 监测结果如下图所示:



由上图可知, 0~15d微生物进入土壤中进行适应、繁殖, 随着时间推移, 降解活力增强, 90d以后, 微生物活力慢慢减弱, 苯并[a]芘降解速度越来越慢。点位1、

点位2的点位高度分别为0.6~0.9m、0.9~1.2m, 对照两个点位的降解曲线, 点位1含氧量高于点位2, 且点位1距离液路管近, 各项指标控制最好, 因此, 降解率更高, 前期降解速度更快, 75天左右土壤就将至修复目标值以下。点位2较点位1降解速度低, 75天后的降解速度高于点位1, 即降解延迟。由此可见, 精确的条件控制有利于提升微生物修复效率。

## 4 结果与展望

本中试研究基于某苯并[a]芘污染场地, 经120天生生物堆修复, 所有土壤中苯并[a]芘浓度均降至修复目标值以下。

本中试监测了苯并[a]芘的降解过程, 但是由于生物堆体的不均一性, 监测结果不能完全反应所有点位的降解过程。不同点位受氧气、营养、水分的因素影响, 降解过程可能存在较大的差异。

本中试未对温度进行严格的控制, 仅当温度高于55℃时进行降温处理。温度过高导致微生物不可逆生长, 影响降解效率, 但是温度降低, 也会影响微生物的生长代谢。本中试期从3月初到7月初, 环境温度差别很大, 且昼夜温差较大, 一定程度影响了微生物降解效率。

本中试为苯并[a]芘污染场地修复提供了新的修复思路, 若进一步推广应用应进一步优化控制参数。

### 参考文献:

- [1]仲冉, 杨凤, 丁克强, 等. 苯并[a]芘污染土壤现状及修复技术研究进展[J]. 环境科技学, 2021, 34(1): 76-80.
- [2]徐申. 化学氧化-微生物耦合修复BaP污染土壤初探[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [3]董星辰, 张晓昀, 王亚男, 等. 高效降解苯并[a]芘假单胞菌的分离、鉴定与应用[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(3): 1-7.
- [4]谢林培, 祝冲之, 张晓东, 等. 强化生物堆法修复多环芳烃污染土壤的初步研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(1): 96-102.
- [5]牛秋雅. 基于堆肥化和高效降解菌的多环芳烃降解研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2103.