

# 某工业地块有机污染场地土壤修复方案设计

李晓纯

上海清宁环境规划设计有限公司, 上海

收稿日期: 2026年3月9日; 录用日期: 2026年4月8日; 发布日期: 2026年5月13日

## 摘要

针对某典型工业地块土壤多环芳烃(PAHs)污染问题, 研究基于前期土壤污染状况调查与风险评估, 明确了修复范围、修复方量及修复目标值。经修复技术比选, 选定异位化学氧化工艺作为修复工艺, 结合污染空间分布特征, 分别选取低浓度、高浓度的PAHs污染土壤开展小试实验, 系统探究过硫酸钠( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ )氧化剂与氧化钙( $\text{CaO}$ )活化剂在不同浓度梯度下对PAHs的去除效果, 以确定实现修复目标的最佳药剂配比与投加参数。基于小试结果形成了系统、经济的场地修复方案, 为同类工业污染地块的治理提供了技术支撑和工程参考。

## 关键词

PAHs污染土壤, 异位化学氧化, 小试试验, 修复方案设计

# Design of a Soil Remediation Scheme for an Organically Contaminated Industrial Site

Xiaochun Li

Shanghai Qingning Environmental Planning and Design Co., Ltd., Shanghai

Received: March 9, 2026; accepted: April 8, 2026; published: May 13, 2026

## Abstract

This study addresses polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) contamination in a typical industrial site. Based on preliminary soil contamination investigation and risk assessment, the remediation scope, volume, and target values were delineated. Ex-situ chemical oxidation was selected as the remedial technology through comparative technical evaluation. According to the spatial distribution characteristics of contaminants, bench-scale experiments were conducted using low- and high-concentration PAH-contaminated soils, respectively. The removal efficiency of PAHs by sodium persulfate ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) oxidant and calcium oxide ( $\text{CaO}$ ) activator was systematically investigated under

varying concentration gradients to optimize reagent dosage ratios and application parameters for achieving remediation targets. A systematic and cost-effective site remediation scheme was developed based on the bench-scale results, providing technical support and engineering reference for the remediation of analogous industrial contaminated sites.

## Keywords

PAH-Contaminated Soil, Ex-Situ Chemical Oxidation, Bench-Scale Experiment, Remediation Scheme Design

Copyright © 2026 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. 概述

以上海为例,在产业升级背景下,多环芳烃(PAHs)污染比重剧增。PAHs 作为典型的持久性有机污染物,因其致癌、致畸、致突变特性,对生态环境和人体健康构成严重威胁,已成为工业地块污染管控与修复的重点对象[1]。在绿色低碳修复与土地高效利用的双重驱动下,如何科学、高效地修复 PAHs 污染土壤,实现污染地块的安全再利用,已成为环境修复领域亟待解决的关键问题[2]。

本研究针对某典型工业退役地块的 PAHs 污染特征,系统阐述了从土壤污染调查、风险评估到异位化学氧化修复工程设计的完整技术路线,以为同类 PAHs 污染工业地块的修复治理提供科学依据与工程参考。

## 2. 地块基本情况

本次研究地块位于上海市,占地面积约 90,054.1 m<sup>2</sup>,地块历史上主要作为住宅、农田和工业企业用地,地块内历史企业类型包括塑料制品厂(行业代码: C2927,属于 15 类工业企业)、建材经营部(行业代码: C5920)、毛纺厂(行业代码: C1721)、粮油管理所(行业代码: C5951),未来开发为一类工业用地,属于《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018) [3]中划分的第二类用地。

经过前期土壤污染状况调查和风险评估,依据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019),以土壤关注污染物苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽的 6 种土壤暴露途径(经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入土壤颗粒物、吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物、吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物、吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物)下,得出苯并[a]芘和二苯并[a,h]蒽超风险可接受水平,苯并[a]芘和二苯并[a,h]蒽基于模型计算的风险控制值均为 1.5 mg/kg。与《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)规定的第二类用地筛选值和第二类用地管制值比较,并结合目标污染物形态与迁移转化规律等,确定本地块土壤中苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽的基坑清理修复目标值和土壤修复目标值均为 1.5 mg/kg,详见表 1。

经调查本区域土壤理化性质如表 2 所示,使用 surfer 软件采用 Kriging 插值法绘制污染物含量等值线图后,得到理论土壤修复范围,结合现场条件,对理论土壤修复范围截弯取直,深度超过 1.5 m 区域采取放坡措施,放坡方量按照截弯取直后方量的 0.1 估算,因此,实际土壤修复方量为 1918.44 m<sup>3</sup>。

**Table 1.** Risk control values of soil priority pollutants (mg/kg)

**表 1.** 土壤关注污染物的风险控制值(mg/kg)

污染物	致癌效应 风险控制值	非致癌效应 风险控制值	筛选值	管制值	风险 控制值	清挖 目标值	修复 目标值
苯并[a]芘	1.51	1.26	1.5	15	1.5	1.5	1.5
二苯并[a,h]蒽	1.51	-	1.5	15	1.5	1.5	1.5

注：筛选值和管制值参照《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)中第二类用地筛选值和管制值。

**Table 2.** Soil physicochemical property table

**表 2.** 土壤理化性质表

平均粒 径 $d_{50}$	含水量 $W_0$ (%)	密度 $\rho_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	干密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	比重 G	饱和度 Sr (%)	孔隙比 $e_0$	孔隙度 $e_r$ (%)	渗透系数 $K_v$ (cm/s)	渗透系数 $K_h$ (cm/s)	有机质 TOC (g/kg)
0.0345	26.3	1.94	1.54	2.71	93.3	0.764	43.3	4.60E-05	7.85E-05	6.74

### 3. 修复技术比选

按照“污染源 - 暴露途径 - 受体”的不同，将污染土壤修复技术分为对污染源进行处理的技术、对暴露途径进行阻断的方法以及降低受体风险的制度控制措施。地块未来开发作为一类工业用地使用，通过工程建设实现暴露途径阻断的污染土壤风险管控技术，或其他实现受体风险控制的制度控制措施，均将对地块开发利用产生一定的限制。因此选用对污染源进行处理的技术进行本地块的修复。

根据地块污染特征及污染分布情况，地块土壤关注污染物为苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽，土壤污染深度在地下 3.0m 以内。地块内为空地，长满杂草，地势较为平坦，施工空间良好，地块邻近周边敏感目标较少，且土壤污染深度浅，方量不大，综合考虑地块未来开发计划，选择异位修复模式较为合适。

有机污染土壤常用的修复技术有热脱附、土壤淋洗、化学氧化、生物堆等技术[4]，具体见表 3 所示。修复技术的选择需要考虑技术适用性、地块污染特征、施工条件、地块开发计划、经济成本等客观因素，在确保达到修复达标的首要前提下，本次研究从技术、经济、环境和安全三个方面对以上修复技术进行比选。

综合对比异位热脱附、异位淋洗、生物堆及异位化学氧化四类，生物堆虽单位治理成本最低，但修复周期长达半年以上；异位热脱附和异位淋洗处理效果稳定，但能耗、药剂及后期废液废气处理成本较高，总体工程投入偏大，而异位化学氧化在保证中高浓度 PAHs 快速去除效果的前提下，药剂投加可控、施工周期较短，二次污染风险相对较小，整体经济性更优，适用于多数有机污染场地的高效低成本修复需求，推荐 PAHs 污染土壤采用异位化学氧化技术。

**Table 3.** Screening of remediation technologies for PAHs-contaminated soil

**表 3.** PAHs 污染土壤的修复技术筛选

评价指标	异位热脱附[5]	异位淋洗	生物堆	异位化学氧化
适用性[6]	适用于挥发性、半挥发性有机污染土壤	处置量大，可去除土壤中大量的污染物，适用于多重污染的土壤	适用于污染土壤，可处理石油烃等易生物降解的有机物	可处理石油烃、BTEX (苯、甲苯、乙苯、二甲苯)、酚类、MTBE (甲基叔丁基醚)、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药等大部分有机物
修复效果				

续表

	不适用于无机物污染土壤(汞除外),也不适用于腐蚀性有机物、活性氧化剂和还原剂含量较高的土壤	需要配套建设设备基础及尾气处理系统	不适用于重金属、难降解有机污染物污染土壤的修复	存在氯代 PAHs、重金属等复合污染时,可能产生二次污染;污染深度 >5 米时,异位开挖成本高,且氧化剂难以均匀分布
土壤类型	对粘滞性土壤处理效率较低	不宜用于土壤细粒(粘/粉粒)含量高于 25% 的土壤	粘土类污染土壤修复效果较差	各种土壤;不适用于重金属污染土壤的修复
技术成熟度	低	中	高	高
操作性	中	难	中	易
环境安全性	中	中	高	中
修复时间[7]	中(3~4 周)	中(3~8 周)	长[8] (半年以上)	短(数周)
修复效益	修复成本[7] 高(600~2000 元/m <sup>3</sup> )	高(800~1800 元/m <sup>3</sup> )	低(600~1200 元/m <sup>3</sup> )	中(500~1500 元/m <sup>3</sup> )
修复效率	中	中	中	高

#### 4. 小试试验设计

因本地块污染物浓度超标范围梯度较大,小试试验采用低浓度和高浓度两个点位进行小试试验。低浓度是指初步调查和详细调查结果中污染物苯并[a]芘浓度超标倍数小于 5,高浓度指污染物(a)芘浓度超标倍数大于 5。采集的污染土壤样品中目标污染物的初始含量测定结果如表 4 所示。

Table 4. Determination results of initial concentrations of target pollutants

表 4. 目标污染物初始浓度测定结果

浓度分类	点位	采样深度	污染物	浓度(mg/kg)	pH
低浓度	XC1	1.5 m	苯并[a]芘	7.8	10
			二苯并[a,h]蒽	2.2	10
高浓度	XC2	1.8 m	苯并[a]芘	16.6	8.69

将采集目标深度的土壤样品(XC1 和 XC2)自然风干后,人工分拣杂物后,粉碎机粉碎、过 5 目筛,贴好标签,样品放于干燥通风处保存。两个点位分别称取 7 份 50 g 风干的污染土样置于样品瓶中,采取一对一平行方式进行小试实验。按照投加比例投加药剂,先添加 CaO 活化剂,搅拌均匀;然后添加 Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 氧化剂,搅拌均匀,控制土壤含水率在 35%左右,静置养护后送检,低浓度土壤样品测定目标污染物苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽、pH 值,高浓度土壤样品测定苯并[a]芘、pH 值。对于养护时间,刘中良[9]表示,反应第 3 天降解率达最大值,7 天内过硫酸钠基本消耗完全,3 天为最佳养护周期,生石灰碱性活化过硫酸钠修复多环芳烃的共性规律显示,2~3 天为主要反应阶段[10][11],延长时无明显效果。综合文献依据,确定养护 3 天。经养护后的土壤经提取-脱水-浓缩-净化-定容后,采用气相色谱-质谱法进行测试,测试方法见表 5,检测结果见表 6 所示。

综合考虑施工成本及绿色低碳修复,低浓度时,氧化剂投加量为 2.5%、活化剂投加量为 2.5%情况下,可将污染物苯并[a]芘和二苯并[a,h]蒽浓度降低至修复目标值以下;高浓度时氧化剂投加量为 5%、活化剂投加量为 5%情况下,可将污染物苯并[a]芘浓度降低至修复目标值以下。

**Table 5.** List of sample testing methods  
**表 5.** 样品检测方法一览表

检测项目	分析方法	设备名称	设备型号	检测因子	检出限	单位
pH	HJ 962-2018 土壤 pH 值的测定电位法	pH 计	PHS-3E	pH	/	/
半挥发性有机物	HJ 834-2017 土壤和沉积物半挥发性有机物的测定气相色谱-质谱法	气相色谱质谱联用仪(GC/MS)	7890B-5977B	苯并[a]芘	0.1	mg/kg
				二苯并[a,h]蒽	0.1	mg/kg

**Table 6.** Formulation ratios of reagents and test results of the lab-scale experiment on contaminated soil  
**表 6.** 污染土壤小试试验药剂配比及试验结果

点位	实验室编号	CaO 添加比例	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> 添加比例	pH	苯并[a]芘	二苯并[a,h]蒽
低浓度(XC1)	1-1	0	0	10	7.8	2.2
	1-2	0.50%	1%	8.36	6.5	1.8
	1-3	1%	1%	9.44	5.2	1.6
	1-4	1%	1.50%	8.86	4.4	1.3
	1-5	1.50%	1.50%	8.71	2.7	0.6
	1-6	2.50%	2.50%	8.68	0.1	ND
	1-7	3%	3%	8.82	ND	ND
高浓度(XC2)	2-1	0	0	8.69	16.6	-
	2-2	2%	2%	8.72	10.5	-
	2-3	3%	3%	8.75	6.1	-
	2-4	3%	4%	8.72	3.9	-
	2-5	4.50%	4.50%	8.69	2.8	-
	2-7	5%	5%	8.8	0.2	-
	2-6	5.50%	5.50%	8.74	ND	-

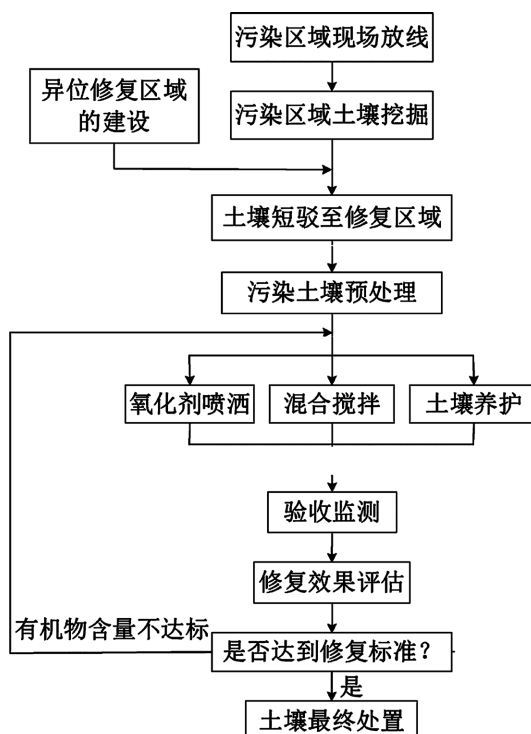
化学氧化技术利用氧化剂与 PAHs 反应将其分解为小分子物质或矿化[12]，达到去除污染物的目的，异位氧化修复过程会产生中间产物，在修复过程中应减少副产物的风险。因此，小试过程中同步检测《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)半挥发性有机物全类指标。检测结果表明，小试土壤样品中，半挥发性有机物低于检出限或与前期调查数据无明显差异，修复过程基本不会造成二次污染。实际修复中应加强修复全过程环境监测，优化氧化体系与药剂投加方式等有效降低二次污染与生态风险。

## 5. 修复方案设计

本地块拟采用异位化学氧化对有机物污染土壤进行修复，修复合格后土壤回填至原基坑，本次研究的修复技术路线见图 1 所示。

### 5.1. 污染土壤清挖、转运与修复

采用机械(挖掘机)为主，人工为辅的方法进行清挖。根据确定的土壤管控范围，利用挖掘机对土壤进行挖掘至管控区域进行暂存，清挖的污染土壤将根据污染物特性(低浓度和高浓度分开修复，污染因子



**Figure 1.** Remediation technology roadmap  
**图 1.** 修复技术路线

苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽可同步修复、检测和验收)分批运送至修复区域,并分区堆放至已经地面硬化修复施工区,并设立现场标识。待浅基坑土壤修复验收合格后再进行深一层基坑的开挖和修复工作,待全部基坑验收合格后进行回填。

### 5.2. 土壤暂存与基坑降排水

根据前期调查现场测量结果,地块内的地下水埋深为 0.826~1.678 m,在土方开挖过程中可能遇到地下水,同时施工期间可能正处于雨季,因此,需要设置降水及排水措施,使基坑开挖和施工达到无水状态。采用明沟排水清除基坑内的积水,在基坑四周内设置明沟、集水井,集水井,具体数量根据地块内的地下水分布情况和水量而定。基坑降排水经收集后进行检测,检测后如果未超过《污水综合排放标准》(DB31/199-2018)三级标准,经混凝、沉淀后纳管排放。若检测超标,基坑降水经芬顿氧化一体式反应塔进行处理,处理达标后纳管排放。

### 5.3. 边坡防护

在开挖的污染土层 0~3.0 m 范围内,土质多为杂填土和粘土,针对 1.5 m 以下区域采用放坡开挖。地块污染土壤紧邻东部水渠,在地块东部水渠处设置钢板桩(长度约 20 m,深度 6.0 m,修复区域深度为 3.0 m,结合地下水流向图,钢板桩深度深于修复深度),切断地块内土壤的接触、联系,同时实现基坑围护作用。

### 5.4. 施工过程

土壤预处理。土壤中含有一些石块、建筑垃圾、树枝等杂物,这会造成土壤与修复药剂接触的面积有限,修复效果不理想。在进行土壤修复之前需要进行筛分,将其中的石块和垃圾等杂物筛选出来,同

时要求筛下 80% 的土块粒径不大于 60 mm。

修复与养护。针对超标土壤，按比例添加  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  氧化剂和  $\text{CaO}$  活化剂，药剂撒至土壤堆体后，再次通过 ALLU 设备混合均匀，将加药后的土壤转移至养护区进行养护，养护时间为 3 天，以确保药剂与污染物有充分的反应时间，以保证修复效果。药剂混合过程中通过洒水的方式控制扬尘，同时调节土壤的湿度，含水率控制在 35%，以达到最佳反应条件。

修复达标土壤回填。修复达标后的土壤进行分层压实后回填至原基坑。

## 6. 结论

本文针对典型 PAHs 污染土壤展开研究，选取异位化学氧化技术作为修复技术，针对不同 PAHs 污染梯度，优化药剂配比，最终确定最佳修复技术比例，为此类污染土壤修复方案的设计提供科学依据和技术指导。由于本研究的小试试验土壤体积小、搅拌充分，且多在恒温、密闭条件下开展，在实际修复过程前应在小试基础上开展中试试验，中试试验应尽量兼顾到地块中不同污染物、不同污染浓度，同时建议做养护时间平行，根据中试结果相应调整药剂浓度，进一步优化工艺参数，提升化学氧化技术的稳定性、经济性与环境安全性，保障修复效果达标。

## 参考文献

- [1] 占升, 郑义, 李森, 等. 不同氧化剂活化过硫酸钠对土壤中多环芳烃降解的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(1): 129-136.
- [2] 贾祥鹏. 东北某石化场地健康风险评估及污染修复方案研究[D]: [硕士学位论文]. 廊坊: 防灾科技学院, 2025.
- [3] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB36600-2018 土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行) [S]. 北京: 中国环境出版集团有限公司, 2018.
- [4] 翟美静, 叶雅丽. 化工污染场地土壤污染特征及修复方案分析[J]. 化工管理, 2021(32): 48-49.
- [5] 陈星, 宋昕, 吕正勇, 等. PAHs 污染土壤的热修复可行性[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 2833-2844.
- [6] 黄伟棋. 建设用地污染土壤与地下水修复技术探讨[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(21): 51-52.
- [7] 左文建, 胡顺磊, 段伟, 等. 基于 AHP 筛选的有机污染土联合修复技术案例研究[J]. 土壤, 2023, 55(2): 390-398.
- [8] 张黎黎. 环境工程中土壤污染修复技术探析[J]. 绿色中国, 2025(8): 109-111.
- [9] 刘中良, 洪小峰, 舒代容. 过硫酸钠对土壤中苯并[a]芘氧化修复条件的初步试验研究[J]. 环境与发展, 2020, 32(12): 114-115+117.
- [10] 周金倩, 马建立, 商晓甫, 等. 过硫酸盐氧化修复多环芳烃污染土壤的研究[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(3): 482-486.
- [11] 邸莎, 张超艳, 颜增光, 等. 过硫酸钠对我国典型土壤中多环芳烃氧化降解效果的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 95-101.
- [12] 韩可笑, 杨书申, 朱俊, 等. 土壤多环芳烃污染与修复研究进展[J]. 河南科技, 2025, 52(10): 97-100.