

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.02.020

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. 土壤, 2023, 55(2): 390–398.

基于 AHP 筛选的有机污染土联合修复技术案例研究^①

左文建¹, 胡顺磊^{2*}, 段伟², 刘晓凤², 吴敏², 王志超²

(1 中铁三局集团投资有限公司, 太原 030000; 2 太原理工大学土木工程学院, 太原 030024)

摘要: 为了研究联合修复技术在有机物污染场地中的筛选方法以及修复效果, 以山西某搬迁遗留场地土壤修复工程为案例, 提出了采用层次分析法(AHP)对常用的物理、化学、生物修复技术方法进行优选, 最终确定“常温解吸+异位热脱附+填埋场覆土利用+水泥窑协同处置”的新联合修复模式, 并且研究了该联合修复模式的处理效果及其对环境造成的影响。结果表明, AHP 可用于有机污染场地修复最佳方案的筛选; 采用该联合修复模式费用低、效果好且未对周围环境造成影响。可见该联合修复模式能够有效地处理此类型场地污染土体。该修复模式的成功实施为类似污染场地土壤修复项目提供了借鉴和参考价值, 并在一定程度上控制了土壤资源的流失。

关键词: 有机污染土; 筛选方法; 层次分析法; 联合修复技术; 修复效果

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Case Study of Combined Remediation Technology for Organic Contaminated Soils Based on AHP Screening

ZUO Wenjian¹, HU Shunlei^{2*}, DUAN Wei², LIU Xiaofeng², WU Min², WANG Zhichao²

(1 China Railway Third Bureau Group Investment Co., Ltd., Taiyuan 030000, China; 2 College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To investigate the screening approaches and remediation effects of combined remediation technology in organic contaminated sites, a relocation legacy site soil remediation project in Shanxi was used as a case study. In this paper, the commonly used physical, chemical and biological remediation technologies were screened by analytic hierarchy process (AHP). The new combined remediation model of “room temperature desorption + ectopic thermal desorption + landfill cover soil utilization + cement kiln co-processing” was finally determined. The repair effect of the combined remediation model and its impact on the environment were studied. The results show that AHP can be used for screening the best remediation solution for organic contaminated sites, and the combined remediation model has low cost, good effect and no impact on the surrounding. The combined remediation model is effective in treating contaminated soils at this type of site. The successful implementation of this remediation model provides a guideline for similar remediation projects and controls the loss of soil resources to a certain extent.

Key words: Organic contaminated soil; Screening approach; Analytic hierarchy process; Combined remediation technology; Remediation effect

由于城市的快速发展, 现有居住和商业用地已不能满足使用需求, 需要将原有的工业用地转变为居住和商业用地, 而一些化工企业在其所在地块上长期从事生产化工产品, 导致土壤受到严重的有机污染。有机污染主要包括多环芳烃(PAHs)、石油类、有机农药、合成洗涤剂、酚类等^[1]。有机污染物的挥发性和致癌性会在未来土地再开发利用过程中对人类的身体健

康产生严重威胁。因此我国对有机污染场地的修复越来越重视。

目前用于有机污染场地土壤修复的技术较多, 根据修复点位的不同, 分为原位修复和异位修复, 根据修复原理的不同分为物理法、化学法、生物法等^[2]。热脱附是一项较为成熟的土壤修复技术, Bonnard 等^[3]以及范宇和徐飞^[4]的研究表明热脱附修复技术

①基金项目: 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2019-K-135)和山西省自然科学基金项目(202103021223122)资助。

* 通讯作者(hushunlei97@163.com)

作者简介: 左文建(1980—), 男, 山西汾阳人, 本科, 高级工程师, 主要从事节能环保研究。E-mail: 327791968@qq.com

对于多环芳烃污染较为严重的土壤有非常好的处理效果；Chen 等^[5]研究发现使用添加蛋壳和植物灰的热脱附技术修复污染土，可以提高修复后的土壤质量并提高修复效率。化学氧化技术作为一种高效的修复技术，已经被广泛应用于工程实践。吴昊等^[6]指出活化过硫酸钠原位化学氧化技术对石油类污染场地土壤修复有较好的效果；Suanon 等^[7]通过对原制药厂污染土壤的修复效果探究，得出 TX-100 增强的高级氧化技术是修复有机氯污染土壤的一种可靠方法。与化学氧化等其他技术相比，微生物修复技术能够有效避免二次污染问题，且成本更低，操作性强，更易于维护，已成为石油烃污染土壤修复的研究热点^[8-9]。近年来，水泥窑协同处理技术已被广泛应用于严重污染土壤的处理，整个工艺流程巧妙，避免了料浆的制备，提高了窑系统的效率，且对熟料没有不利影响^[10]。Tian 等^[11]基于双基点(TOPSIS)法研究发现水泥窑协同处理是 OCPs 污染场地的最佳修复技术；Yang 等^[12-13]的研究表明水泥窑协同处理对二噁英类化合物具有很高的破坏效率，是处置固体废物的一种好技术。然而有机物污染土壤往往含有多种有机污染物，修复难度较大，采取单一化的修复技术难以达到预期效果^[14]，而且长期使用物理、化学单一的方法来进行土壤修复，可能会对土壤造成持续性的伤害^[15]。相比单一修复技术，联合修复技术综合了各种技术的长处，充分利用不同方法技术间的协同作用，使其环境适应性和修复效果更为突出^[9]，是有机污染土修复发展中最有前景的一种修复手段。面对众多的修复技术，联合哪种或哪几种修复技术能够实现较好处理效果成为联合模式的关键。

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次，在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法。其优点是系统性强、简洁实用、所需定量数据信息较少，把判断各要素的相对重要性化为简单的权重进行计算。这种思想能处理许多用传统的最优化技术无法着手的实际问题。

本文依托山西某搬迁遗留场地土壤修复工程，对有机污染场地修复技术及修复效果进行研究。通过对常用修复技术的研究总结，基于 AHP 比较筛选出针对该场地有机物污染的高效联合修复技术。通过对该场地修复效果的综合评价及实施要点的分析，旨在验证该联合修复技术的有效性，也为类似污染场地土壤修复项目的工程设计和实施提供参考。

1 工程概况

1.1 场地概况

目标地块原为煤气化工厂区内的选煤厂，占地面积 97 749 m²。场地之前为废弃的耕地，生产经营时间约为 30 a，对周边环境有一定的影响。目前，场地内的建构筑物均已拆除完毕，大部分的建筑垃圾均已清运，原建构筑物所在区域地表仍遗留有薄层建筑垃圾，建筑垃圾主要来源于本地场内建构筑物拆除后遗留的砖块、水泥块及夹杂的粉土。该地块的用地规划类型为居住用地及中小学用地，地块周边现有居民小区、村落，以及规划建立的居民区。

1.2 场地污染现状

该地块的污染主要分为地表以上建筑垃圾污染，以及地表以下土壤污染。根据检测结果，该地块的超标污染物为氯代烃、多环芳烃、石油烃等。污染超标倍数为 0.20 倍 ~ 41.4 倍。其中 5 种污染物的致癌风险超过可接受水平，1 种污染物的非致癌风险超过可接受水平。基坑污染层位主要在 0 ~ 4.0 m，部分点位污染深度达到 5.0 m，污染未涉及到地下水。具体污染物筛选值^[16]及超标情况如表 1 所示。

表 1 污染物超标情况
Table 1 Over standard situation of pollutants

污染物	筛选值 (mg/kg)	最大值 (mg/kg)	最大超标 倍数
苯并[a]蒽	5.5	18.3	2.33
苯并[b]荧蒽	5.5	36.5	5.64
苯并[a]芘	0.55	23.3	41.36
二苯并[a,h]蒽	0.55	4.3	6.82
茚并[1,2,3-cd]芘	5.5	11.9	1.16
萘	25	272	9.88
2-甲基萘	146	269	0.84
咔唑	26.8	34.3	0.28
二苯并呋喃	46	186	3.04
总石油烃(C ₁₀ ~C ₄₀)	826	4 760	4.76
氯仿	0.3	0.703	1.34
四氯化碳	0.9	2.16	1.40
1,2,3-三氯丙烷	0.05	0.676	12.52
1,2-二溴-3-氯丙烷	0.06	0.069	0.20

2 修复方案确定

2.1 修复目标

本地块共需修复 14 种污染物，修复目标值为筛选值^[16](表 1)。地块范围内污染建筑垃圾和污染土壤

的修复总面积为 12 192 m²,需修复总方量为 20 888 m³。

2.2 修复方案遴选

考虑到场地周围存在居民小区、村落等敏感区域,因此修复过程中产生的二次污染特别是废气、扬尘、噪声等应加以重视,所以选择异位修复作为本场地修复的主要思路。根据场地污染现状,初选出 6 种土壤修复技术,并列出了其成熟性、修复周期、修复成本、适用性等指标^[17-24],如表 2 所示。

筛选污染场地修复技术需考虑多重因素,要通过

相关评价指标综合分析每种修复技术方能确定目标污染场地最适合的修复技术。利用 AHP 求出筛选指标权重,并建立修复技术评价矩阵,根据权重与评价矩阵的元素乘积来筛选出最合适的修复技术。

根据各因素对修复技术的影响程度,选取技术成熟度(B1)、修复周期(B2)、经济可行性(B3)、可操作性(B4)、二次污染(B5)这 5 个指标建立修复技术筛选指标体系(A)。结合本场地特点,根据 AHP 比例标度表来建立 A-B 判断矩阵,如表 3 所示。

表 2 常用修复技术的指标
Table 2 Indexes of common repair techniques

技术名称	技术简介	技术成熟性	修复周期	经济可行性	适用性
化学氧化技术	通过在土壤中添加化学氧化剂,使之与污染物发生氧化反应,最终使污染物降解或转化为低毒、低移动性产物	国外已广泛应用于工程实践,国内自 2017 年开始应用	数周,用时较短	处理成本为 500 ~ 1 500 元/m ³	①通常是在原位场地进行修复;②不适用于有机质含量高的污染土壤,主要原因是存在污染反弹以及对污染物去除不彻底;③其对于大面积场地药剂消耗量大,在技术和经济方面代价较大,不适合本场地采用
微生物技术	利用特定微生物,在适宜环境条件下,通过自身的代谢作用,将有机污染物转化成简单无机物	国外已广泛应用于工程实践,国内应用较少	半年以上,用时较长	处理成本为 600 ~ 1 200 元/m ³	①修复周期长;②某些复杂环境条件下难以适用
常温解吸	将土壤堆成条垛状,利用机械进行翻抛,土壤中的挥发性有机污染物类转移到气相,再通过活性炭吸附,达标后排放	国内外应用较广泛	1 周左右,用时较短	处理成本为 200 ~ 600 元/m ³	①操作简单、成本低、工期短;②通常用来处理含有 VOCs 的污染土;③适合大面积修复土壤
异位热脱附	通过直接或间接加热,控制系统温度和物料停留时间有选择地促使污染物气化挥发,达到将污染物与土壤颗粒分离,尾气经后续处理达标排放	国外已广泛应用于工程实践,国内也有较多工程应用	3 ~ 4 周,需要时间较短	处理成本为 600 ~ 2 000 元/m ³	①污染物处理范围宽、处理速率高、设备可移动;②修复后土壤可再利用,适用于本场地有机污染土壤的修复
垃圾填埋场覆土利用	将污染土转运到垃圾填埋场作为覆土再利用	国内外应用较广泛	1 ~ 2 周,用时较短	应用成本为 100 ~ 200 元/m ³ ,主要为运费	对于轻度污染的土壤,采用其他修复技术成本太高,选用作垃圾填埋场覆土,将污染土充分再利用
水泥窑协同处置	利用水泥回转窑内的高温、热容量大、热稳定性好、碱性环境、无废渣排放等特点,在生产水泥熟料的同时,焚烧固化处理污染土壤	国外发展较成熟,国内仅个别城市拥有协同处理污染土壤的水泥窑生产线,本地块所在城市拥有	3 ~ 4 周,需要时间较短	应用成本为 800 ~ 1 000 元/m ³	对于石油烃超标和重度污染的土壤采用物理修复技术会造成修复不彻底,将其进行水泥窑协同处置,处理的土壤全部转化为水泥熟料,无废渣排放,但应特别注意二次污染的防治

表 3 A-B 判断矩阵
Table 3 A-B Judgment matrix

A	B1	B2	B3	B4	B5
B1	1	1/2	2	1	1/3
B2	2	1	4	4	1/2
B3	1/2	1/4	1	1/2	1/8
B4	1	1/4	2	1	1/3
B5	3	2	8	3	1

AHP 的计算步骤^[25]为:

1)对 A-B 判断矩阵的每一列元素进行归一化处理。

$$b_{ij}' = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}} \quad (1)$$

式中: b_{ij} 为元素 i 和元素 j 的重要性之比; b_{ij}' 是 b_{ij} 的归一化结果; n 为元素个数。

2)将每一列经归一化处理后的判断矩阵按行相加。

$$b_i = \sum_{j=1}^n b'_{ij} \quad (2)$$

式中： b_i 为第 i 列归一化后结果之和。

3)对向量 $b=(b_1, b_2, \dots, b_n)^T$ 归一化处理，得到判断矩阵的属性权重向量。

$$\omega_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (3)$$

式中： ω_i 为 b_i 的归一化结果。本研究中求得 $\omega=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T=(0.125, 0.278, 0.059, 0.113, 0.425)^T$ 。

4)通过判断矩阵及其权重向量计算最大特征根。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(B\omega)_i}{n\omega_i} \quad (4)$$

式中： λ_{\max} 为权重向量最大特征根； B 为 A-B 判断矩阵； $(B\omega)_i$ 为第 i 个特征根。本研究中求得 $\lambda_{\max}=5.089$ 。

5)对构造的判断矩阵进行一致性检验，判断其是否为一矩阵。

$$V_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

式中： V_{CI} 为矩阵一致性指标。

通过查表得到相应的平均一致性指标 V_{RI} ，当 $n=5$ 时， $V_{RI}=1.12$ 。利用 V_{CI} 和 V_{RI} 的比值 V_{CR} 来判断

矩阵的一致性比例。

$$V_{CR} = \frac{V_{CI}}{V_{RI}} \quad (6)$$

当 $V_{CR}<0.1$ 时，说明该判断矩阵的一致性可以接受。经计算判断矩阵 A-B 的 V_{CR} 值为 $0.0198 < 0.1$ ，认为该矩阵的一致性可以接受。

将各技术指标根据其优越性分别划分为 5 个等级，并分别赋予 1~5 分，优越性判断等级划分见表 4，并根据表 2 的信息建立修复技术评价集，构建评价矩阵(表 5)。

根据修复技术评价矩阵，得到上述 6 个修复技术的评价集：化学氧化技术评价集 $d_1=(4, 4, 4, 3, 3)$ ；微生物技术评价集 $d_2=(3, 1, 4, 2, 5)$ ；常温解吸技术评价集 $d_3=(5, 5, 5, 5, 4)$ ；异位热脱附技术评价集 $d_4=(5, 4, 3, 5, 4)$ ；垃圾填埋场覆土利用技术评价集 $d_5=(5, 5, 5, 4, 4)$ ；水泥窑协同处置技术评价集 $d_6=(4, 4, 4, 4, 3)$ 。

计算评价结果： $D_1=d_1 \times \omega=3.463$ ； $D_2=d_2 \times \omega=3.239$ ； $D_3=d_3 \times \omega=4.575$ ； $D_4=d_4 \times \omega=4.179$ ； $D_5=d_5 \times \omega=4.463$ ； $D_6=d_6 \times \omega=3.575$ 。由评价结果可知，6 个修复技术的排序为 $D_3 > D_5 > D_4 > D_6 > D_1 > D_2$ 。对于该场地，认为评价结果大于 3.5 的修复技术为有效修复技术，所以适用于本场地的污染土壤修复技术有常温解吸、异位热脱附、填埋场覆土利用和水泥窑协同处置。

表 4 优越性判断等级划分
Table 4 Classification of superiority judgments

等级(分)	技术成熟度	修复周期	经济可行性	可操作性	二次污染
5	国内外应用广泛	1~2 周	低于 600 元/m ³	单一技术	无任何污染
4	国外应用广泛，国内应用较少	3~4 周	600~1 200 元/m ³	2 种配套技术	微量污染
3	国内外应用较少	5~10 周	1 200~2 000 元/m ³	3 种配套技术	中度污染，符合国家标准
2	国外应用较少，国内无工程应用	11 周~6 个月	2 000~3 000 元/m ³	4 种配套技术	中度污染，处理后符合国家标准
1	实验阶段，目前无工程应用	6 个月~1 年	高于 3 000 元/m ³	复杂(5 种以上配套技术)	重度污染

表 5 修复技术评价矩阵
Table 5 Evaluation matrix of repair technology

修复技术	技术成熟度	修复周期	经济可行性	可操作性	二次污染
化学氧化技术(D ₁)	4	4	4	3	3
微生物技术(D ₂)	3	1	4	2	5
常温解吸(D ₃)	5	5	5	5	4
异位热脱附(D ₄)	5	4	3	5	4
垃圾填埋场覆土利用(D ₅)	5	5	5	4	4
水泥窑协同处置(D ₆)	4	4	4	4	3

3 场地修复

该地块红线范围内污染土方量巨大,施工工期较短,污染物种类繁多,采用单一的修复方法无法满足,故选择联合修复技术,不同的修复技术可处置不同特征的污染物,不同浓度的同种类污染物采用的修复技术可能也不相同。根据表 2 中修复技术的适用性,轻度污染土壤运往填埋场用作覆盖用土;常温解吸技术处理含有 VOCs 的污染土;热脱附技术修复中等浓度的污染土壤;水泥窑协同处置技术修复高浓度污染土壤以及石油烃超标土壤。

3.1 修复前试验

考虑到常温解吸技术成本较低且场地待修复面积较大,因此优先采用常温解吸技术进行修复,修复前进行了修复前试验,来探究该技术对现有污染物的修复效果。常温解吸技术适用于 VOCs 的修复,分别取含有一定浓度萘、氯仿、四氯化碳、1,2,3-三氯丙烷、1,2-二溴-3-氯丙烷 5 种 VOCs 的污染土样品,对其采用常温解吸修复工艺,然后取修复后土样采用标准^[16]推荐的检测方法进行实验室检测,各污染物修复前后浓度对比如图 1 所示。

由试验结果可知,对于含有萘的污染土壤,采用常温解吸技术修复效果不佳。因此,应根据萘的不同浓度采用填埋场资源化用土、异位热脱附或水泥窑协同处置对含有萘的污染土壤进行处理处置。

3.2 污染土修复

根据土壤的污染类型、可挥发性与修复难易程度,在修复之前对待修复的污染土壤按照有关污染物

标准^[16]进行了精细化划分(表 6),以满足不同修复技术对污染物种类和污染浓度的要求。

修复前对基坑进行清挖,对建筑垃圾进行筛分,根据污染土种类以及表 2 中各修复方法的适用性,并考虑污染土中萘的含量,选用相应的技术处理,总的修复技术路线如图 2 所示。其中常温解吸和热脱附后的土壤经实验室检测合格后可以进行再利用,具体工艺如图 3 所示。

常温解吸技术施工难度低、经济性好,适合处理大面积污染土;热脱附作为一种非燃烧技术,对环境影响较小、污染物处理范围宽、修复更彻底;水泥窑协同处置是水泥工业提出的一种新的废弃物处置手

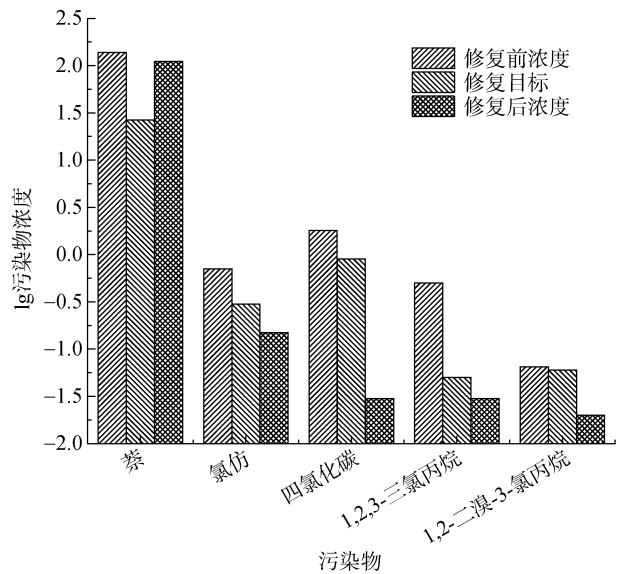


图 1 VOCs 修复前后浓度

Fig. 1 Concentrations of VOCs before and after repair

表 6 污染土分类
Table 6 Classification of contaminated soil

大类	小类	分类标准
I 类	Ia 类	石油烃超标
	Ib 类	石油烃未超标
II 类	IIa 类	污染浓度大于场地修复目标值, 小于 GB36600 ^[16] 中二类用地筛选值
	IIb 类	污染浓度大于 GB36600 中二类用地筛选值, 小于 GB36600 中一类用地管制值
	IIc 类	污染浓度大于 GB36600 中一类用地风险管制值
III 类	IIIa 类	污染浓度大于场地修复目标值, 小于 GB36600 中二类用地筛选值, 石油烃未超标
	IIIb 类	污染浓度大于 GB36600 中二类用地筛选值, 小于 GB36600 中一类用地管制值
	IIIc 类	污染浓度大于 GB36600 中一类用地风险管制值

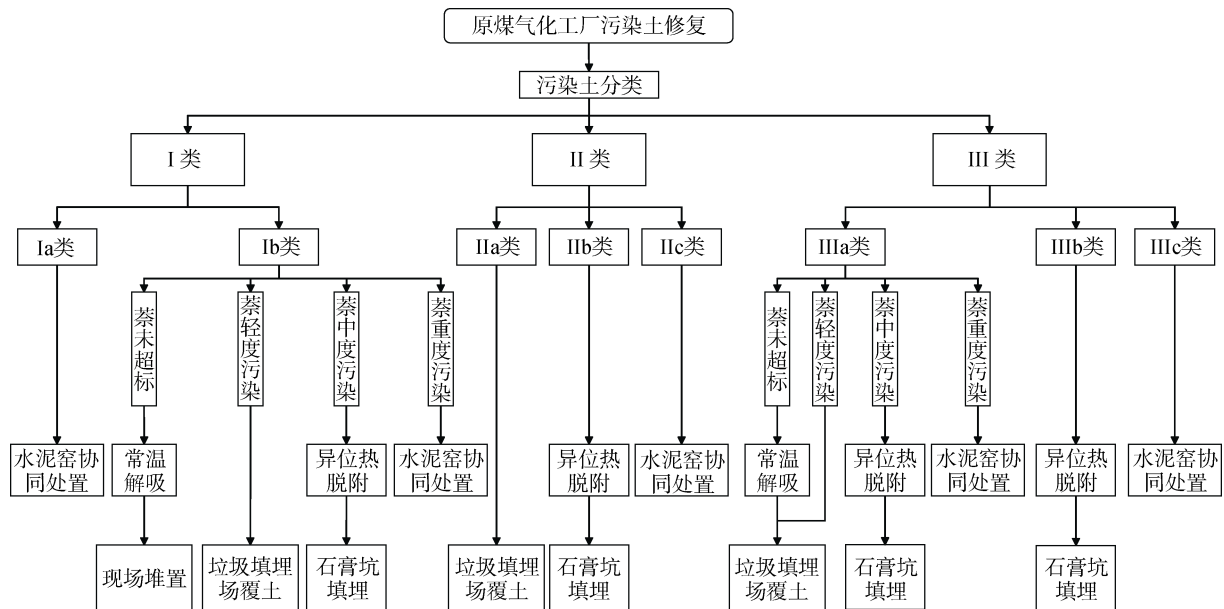


图 2 修复技术路线图

Fig. 2 Roadmap of repair technology

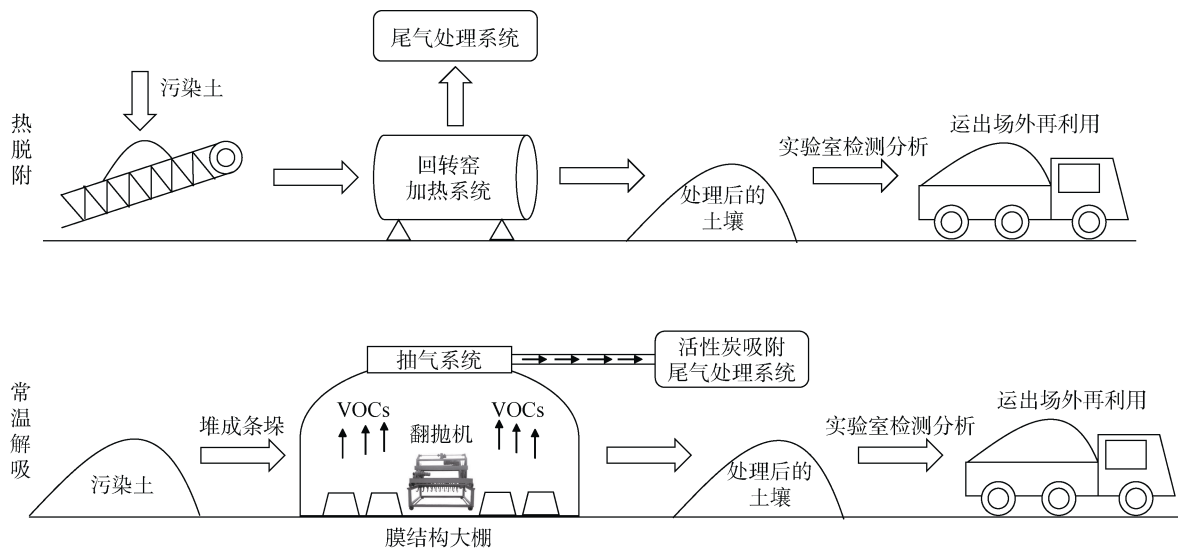


图 3 热脱附和常温解吸技术工艺

Fig. 3 Technology of thermal desorption and room temperature desorption

段,它能够在进行水泥熟料生产的同时实现对固体废物的无害化处置过程,并能够分解高浓度的污染物,三者结合并以低成本、高效率的填埋场覆土利用为辅助,优势互补,组成一种新的联合修复模式。

4 修复效果评估

4.1 布点与采样

根据 HJ 25.5—2018《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行)》^[26]中的要求进行基坑以及修复后土壤的布点。该地块共布设基坑坑底采样点 46 个,侧壁采样点 68 个。共采集 153 个样品,其

中平行样 15 个;共采集修复后土壤 29 个样品,包含平行样 5 个。

4.2 实验分析与结果

采用标准^[16]推荐的分析方法,对 14 种污染物进行检测。检测结果显示,有 3 个基坑点位的样品存在超标现象,超标污染物为苯并[a]芘,其余基坑点位以及修复后土壤的检测结果均合格。需要对以上超标采样点位所代表的基坑底部和侧壁继续扩挖,扩挖后再取该点位样品进行第二次检测,第二次检测结果均合格,3 个点位扩挖前后检测结果如表 7 所示。

表 7 扩挖前后污染物浓度(mg/kg)
Table 7 Concentrations of pollutants before and after expansion

基坑点位	C ₁₀ ~C ₄₀	萘	2-甲基萘	苯并[a]芘	茚并[1,2,3-cd]芘	二苯并[a,h]蒽	咔唑	评估结果
JK8K-3C03	ND	0.83	1.12	2.7	1.4	ND	ND	不合格
JK8K-6C02	147	7.95	2.76	1.3	1.8	0.5	0.3	不合格
JK8K-6D01	ND	0.86	0.38	1.0	1.0	0.3	0.2	不合格
JK8K-3C03 扩挖	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	合格
JK8K-6C02 扩挖	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	合格
JK8K-6D01 扩挖	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	合格
修复目标值	826	25	146	0.55	5.5	0.55	26.8	

注：“ND”表示未检出该污染物。

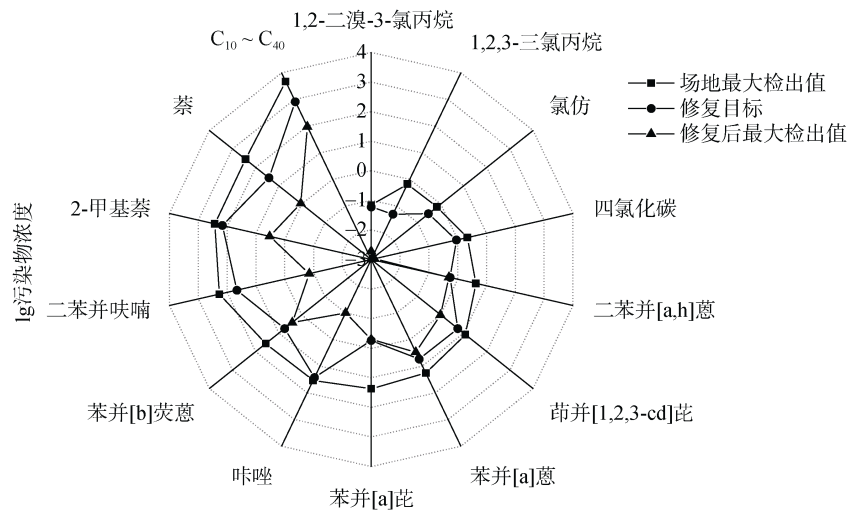


图 4 各污染物修复前后浓度

Fig. 4 Concentration of each pollutant before and after repair

综合两次数据分析结果,本地块基坑清挖效果达到标准。进行常温解吸和热脱附后的土壤样品中各污染物最大检出值均低于修复目标值,符合修复治理要求,无需继续修复。各污染物修复效果如图 4 所示。修复后的土壤可以进行再次利用,一定程度上控制了土壤资源流失。

4.3 二次污染评估

对环境的友好性也是评价修复技术好坏的一种尺度,修复方案的效果不仅取决于对污染物的去除程度,也取决于是否对环境产生二次污染。本工程采取了一系列二次污染防治措施,其中最为突出的是对废气的监测和处理。根据监测范围大小、污染物的空间分布特征、气象因素综合考虑确定废气监测采样点。

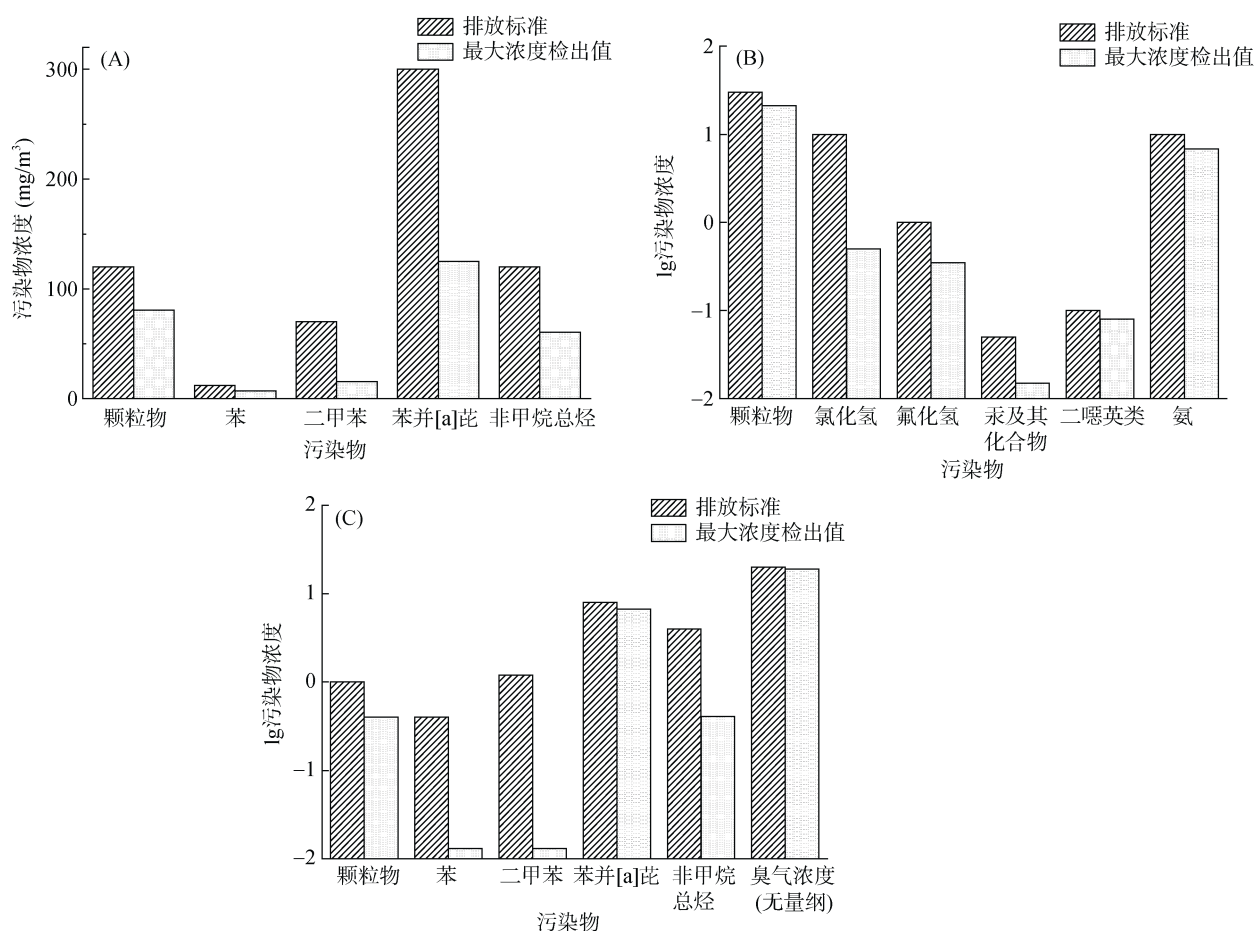
根据监测数据,与 GB 16297—1996《大气污染物综合排放标准》^[27]、GB 14554—1993《恶臭污染物排放标准》^[28]以及 GB 30485—2013《水泥窑协同处置固体废物污染控制标准》^[29]中规定的排放标准进行比较,结果显示所有检测的排放项目浓度值均低于相应的排放标准,各检测项目排放标准和最大检出

浓度对比如图 5 所示。

结合以上试验结果,在该联合修复模式下,该地块清挖效果达到目标要求,土壤异位修复效果达到目标要求,施工过程未对周围环境造成不良影响。该模式工期短、效率高、经济性好,其修复效果良好且对环境的影响较小,具有较好的推广价值,能够为其他类似污染场地修复提供案例支撑。事实证明,单一的修复方法都有各自的缺点,因此应综合各种技术的优点和长处,取长补短,采用联合修复技术修复被有机物污染的土壤无疑是最有效的修复方式。而基于 AHP 的筛选方法可以有效应用于筛选有机污染土壤修复技术。

5 结论

1) 基于 AHP 进行筛选,采用常温解吸+填埋场覆土利用+异位热脱附+水泥窑协同处置的联合修复模式为该场地最佳模式,该模式工期短、效率高、经济性好,修复后的场地污染物浓度均低于控制标准且对环境的影响较小,表明基于 AHP 的筛选方法可以应用



(A. 常温解吸和热脱附尾气; B. 水泥窑尾气; C. 无组织废气; 其中, 苯并[a]芘、汞及其化合物的浓度单位为 ng/m^3)

图5 各监测项目浓度对比

Fig. 5 Comparison of concentrations of each monitoring item

于筛选有机污染土壤修复技术, 具有较好的推广价值, 能够为其他类似污染场地修复提供案例支撑。

2) 对于有机物污染场地, 有机污染物种类繁多, 施工工期较短, 采用单一的修复方法无法满足, 而联合修复技术可充分利用不同方法技术之间的协同作用, 因此选择联合修复技术是最有效的一种修复手段。

3) 对于周围存在居民小区、村落等敏感区域的场地, 修复过程中产生的二次污染特别是废气、扬尘、噪声等会对其造成很大影响, 因此适合采用异位修复技术。

4) 对于含有萘的污染土壤, 采用常温解吸的方式修复后的浓度为修复目标值的 4 倍以上, 修复效果不佳。应根据萘的不同浓度采用填埋场资源化用土、异位热脱附或水泥窑协同处置对污染土壤进行处理处置。

参考文献:

- [1] 胡正, 沈青. 原位热脱附技术在有机污染地块中的修复效果研究[J]. 环境科技, 2020, 33(6): 30–34.
- [2] 刘惠, 陈奕. 有机污染土壤修复技术及案例研究[J]. 环境工程, 2015, 33(S1): 920–923.
- [3] Bonnard M, Devin S, Leyval C, et al. The influence of thermal desorption on genotoxicity of multipolluted soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(5): 955–960.
- [4] 范宇, 徐飞. 多环芳烃污染土壤修复技术应用对比研究[J]. 建筑科技, 2019, 3(6): 52–55.
- [5] Chen W, Chen M Q, Sun C, et al. Eggshell and plant ash addition during the thermal desorption of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated coke soil for improved removal efficiency and soil quality[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(10): 11050–11065.
- [6] 吴昊, 孙丽娜, 王辉, 等. 活化过硫酸钠原位修复石油类污染土壤研究进展[J]. 环境化学, 2015, 34(11): 2085–2095.
- [7] Suanon F, Tang L, Sheng H J, et al. Organochlorine pesticides contaminated soil decontamination using TritonX-100-enhanced advanced oxidation under electrokinetic remediation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393: 122388.

- [8] 罗俊鹏, 赵一澍, 廖晓勇, 等. 化学预氧化-生物强化-生物刺激对土壤中菲降解的联合效应[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2521–2529.
- [9] 潘云飞, 唐正, 彭欣怡, 等. 石油烃污染土壤微生物修复技术研究现状及进展[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4562–4572.
- [10] Li Y Q, Wang H Z, Zhang J, et al. Application of POPs-contaminated soil in the cement industry with high pollutant destruction efficiency//Hu ZQ. Legislation, technology and practice of mine land reclamation[M]. Florida, USA: CRC Press, 2014: 473–478.
- [11] Tian J P, Huo Z, Ma F J, et al. Application and selection of remediation technology for OCPs-contaminated sites by decision-making methods[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(11): 1888.
- [12] Yang L L, Zhao Y Y, Shi M W, et al. Brominated dioxins and furans in a cement kiln co-processing municipal solid waste[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 79: 339–345.
- [13] Yang L L, Zheng M H, Zhao Y Y, et al. Unintentional persistent organic pollutants in cement kilns co-processing solid wastes[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 182: 109373.
- [14] 陈正梁. 有机物污染土壤修复技术的应用概述[J]. 环境与发展, 2020, 32(3): 84–85.
- [15] 张军, 王硕. 有机物污染土壤修复技术研究现状[J]. 山东化工, 2019, 48(21): 55–56, 59.
- [16] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准: GB 36600—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [17] Aydin S, Karaçay H A, Shahi A, et al. Aerobic and anaerobic fungal metabolism and Omics insights for increasing polycyclic aromatic hydrocarbons biodegradation[J]. Fungal Biology Reviews, 2017, 31(2): 61–72.
- [18] 李爱民, 杨福胜, 郝帅, 等. 基于热脱附法的汞污染土壤修复研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(3): 433–438.
- [19] 袁静, 王青玲, 侯金玉, 等. 亚油酸钠刺激多环芳烃污染土壤微生物修复的机理研究[J]. 土壤, 2020, 52(5): 948–955.
- [20] Yang Z Z, Wang C, Wang J F, et al. Investigation of formation mechanism of particulate matter in a laboratory-scale simulated cement kiln co-processing municipal sewage sludge[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 234: 822–831.
- [21] 吴嘉茵, 方战强, 薛成杰, 等. 我国有机物污染场地土壤修复技术的专利计量分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(8): 2015–2024.
- [22] 杨珍珍, 耿兵, 田云龙, 等. 土壤有机污染物电化学修复技术研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1110–1122.
- [23] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137–1142.
- [24] 韩伟, 叶渊, 焦文涛, 等. 污染场地修复中原位热脱附技术与其他相关技术耦合联用的意义、效果及展望[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2302–2310.
- [25] 吴敏. 工业污染场地修复技术的筛选——以福建省泉州市某工业污染场地为例[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 195–199.
- [26] 生态环境部. 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则: HJ 25.5—2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [27] 国家环境保护局. 大气污染物综合排放标准: GB 16297—1996 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [28] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 恶臭污染物排放标准: GB 14554—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [29] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 水泥窑协同处置固体废物污染控制标准: GB 30485—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.