



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202204117 中图分类号 X32 文献标识码 A

呼红霞, 吕静, 刘锋平, 等. 环境技术验证在污染土壤修复领域的应用——以原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术为例[J]. 环境工程学报, 2023, 17(1): 207-217. [HU Hongxia, LV Jing, LIU Fengping, et al. Application of environmental technology verification in contaminated soil remediation—a case study of the coupled in-situ thermal desorption, horizontal well and chemical oxidation remediation technology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(1): 207-217.]

## 环境技术验证在污染土壤修复领域的应用——以原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术为例

呼红霞<sup>1,2</sup>, 吕静<sup>2,3</sup>, 刘锋平<sup>1,2</sup>, 李静文<sup>2,3</sup>, 张岩坤<sup>1,2</sup>, 段松青<sup>4</sup>, 孙宁<sup>1,2</sup>,  
丁贞玉<sup>1,2,✉</sup>, 李书鹏<sup>2,3</sup>

1. 生态环境部环境规划院, 北京 100012; 2. 污染场地安全修复技术国家工程实验室, 北京 100015; 3. 北京建工环境修复股份有限公司, 北京 100015; 4. 山西省生态环境监测和应急保障中心 (山西省生态环境科学研究院), 太原 030027

**摘要** 环境技术验证评价方法能够科学、客观地评价生态环境创新技术, 促进新技术的推广应用。基于焦化污染地块修复技术验证评价方法, 对原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术在山西某焦化污染地块上应用的可行性、绿色性、资源能源消耗等方面进行了验证评价。结果表明, 该技术可以在一个修复周期内 (3 个月) 将焦化污染地块中多环芳烃质量浓度降低到修复目标值, 达到修复效果。修复系统运行过程中产生的废气、废水、噪声等污染物经处理后均满足相应排放要求。通过对修复过程中固废产生量、耗水量、耗电量、运行成本等指标的核算, 可知该技术具有资源能源消耗较少、处理成本较低、针对不可开挖地块的修复具有较强适用性等特点。原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术可应用于焦化污染地块包气带污染土壤的修复治理工作。

**关键词** 环境技术验证; 焦化污染地块; 土壤修复技术

由于城市化发展与产业结构升级调整, 我国工业企业关停或搬迁遗留的 (疑似) 污染地块超过  $50 \times 10^4$  块, 存在较大的潜在环境风险, 引发了社会的高度关注<sup>[1]</sup>。焦化污染地块是我国典型的污染地块类型, 其特点是地块占地面积大、污染类型典型、污染程度较重。其中, 主要特征污染物包括苯系物、多环芳烃和重金属<sup>[2]</sup>, 对于它们的去除是污染地块环境管理的重点和难点。在我国污染地块治理修复和开发利用的实践过程中, 先后出现了北京焦化厂、重庆钢铁集团、武汉东钢、广东白鹤洞钢铁、山西煤气化厂、杭州钢铁厂等一批典型的焦化生产区遗留地块, 引起行业和社会的高度关注。根据全国重点行业企业用地调查的初步成果, 纳入调查的钢铁与焦化类型的地块在 7 种主要类型地块中排名第 3, 地块数量 (含在产和遗留地块) 初步估计近千余块, 土壤修复技术需求强烈。

环境技术验证 (Environmental Technology Verification, ETV) 评价, 是一种典型的第三方评价制度, 受环境保护技术开发者 (所有者)、使用者或其他相关方委托, 按照规定的验证评价标准、规

收稿日期: 2022-04-18; 录用日期: 2022-11-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC1803004)

第一作者: 呼红霞 (1987—), 女, 硕士, 高级工程师, [huhx@caep.org.cn](mailto:huhx@caep.org.cn); ✉通信作者: 丁贞玉 (1982—), 女, 博士, 研究员, [dingzy@caep.org.cn](mailto:dingzy@caep.org.cn)

范和程序,综合运用技术原理分析、测试、数理统计以及专家评价等方法,对所委托技术的技术性能、污染治理效果以及运行维护情况进行验证<sup>[3-4]</sup>。以美国、加拿大为代表的发达国家于20世纪90年代中期开始,致力于建立并实施ETV评价制度,以助力环保创新技术的推广应用<sup>[5-6]</sup>。2013年,中国环境科学学会组织完成了我国首例ETV验证案例<sup>[7]</sup>,对于我国环境保护领域内全面开展环境保护技术验证具有重要的意义。随后,在水处理、医疗废物处理以及大气治理等领域均开展过一定的案例研究,2021年曹云霄等<sup>[8]</sup>开展了摩擦热处理技术的技术验证工作,验证结果表明,摩擦热处理技术是一种切实有效的医疗废物消毒处理新型技术,能有效推动该技术的市场应用。截至目前,在土壤修复领域内,尚未开展过相关案例研究。

本研究依据《焦化污染地块修复技术验证评价规范》(T/CPCIF 0197-2022)<sup>[9]</sup>,以原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术为研究对象,从技术可行性、绿色性以及资源能源消耗等方面进行验证评价,为原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术提供有效的第三方评价结论,助力其推广应用。

## 1 技术原理及创新性

### 1.1 技术原理及工艺流程

原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术是将热传导加热(TCH)、土壤气相抽提(SVE)、蒸汽强化抽提(SEE)、原位化学氧化(ISCO)等修复技术进行耦合形成的修复技术体系,针对土壤污染呈水平带式分布或不可开挖地块的有机类污染物修复具有较强适用性。其中,蒸汽/药剂注入井、抽提井均可采用水平井形式,相较于垂直井,其在土壤中热扩散面积更大,加热效率更高,修复成本更低。

原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术包括氧化药剂注射系统、热传导加热系统、蒸汽发生系统、水平井管网系统、尾气处理系统及尾水处理系统。热传导加热<sup>[10]</sup>是热量通过传导的方式由热源传递到污染区域从而加热土壤和地下水的处理过程。该过程可以通过电能直接加热的方式对加热井进行加热,也可以通过燃气等能源产生的高温热烟气或蒸汽等介质对加热井进行加热。土壤气相抽提<sup>[11]</sup>是通过专门的地下抽提(井)系统,利用真空或注入空气产生的压力迫使非饱和区土壤中的气体发生流动,从而将其中的挥发性有机污染物和半挥发性有机污染物脱除,以达到清洁土壤的目的。蒸汽强化抽提<sup>[10]</sup>是通过将高温水蒸气注入污染区域,加热土壤、地下水,从而强化目标污染物抽提效果的处理过程。原位化学氧化<sup>[12]</sup>是通过向土壤或地下水的污染区域注入氧化剂或还原剂,通过氧化作用,使土壤或地下水中的污染物转化为无毒或毒性相对较小的物质。

针对焦化污染地块包气带高浓度苯系物和多环芳烃污染,该耦合技术可根据污染类型分阶段实施。其中,第一阶段工作原理是组合应用热传导加热(TCH)与土壤气相抽提(SVE)技术先对污染土壤进行加热(低温,40~60℃),加热可促进部分轻质多环芳烃、苯系物向气相中的迁移,通过气相抽提的作用,去除土壤中大部分的苯系物及部分多环芳烃;第二阶段的工作原理是耦合应用蒸汽加热(SEE)、原位化学氧化(ISCO),通过蒸汽加热促进吸附在土壤固体颗粒上的有机污染物解吸至液相及气相,并通过气相抽提进一步去除低沸点有机物,同时,将氧化药剂(过硫酸盐)注射至污染区域并通过蒸汽加热将热量传递给过硫酸盐,热活化过硫酸盐,促进生成硫酸根自由基,提高氧化剂反应活性,进而促进污染土壤中多环芳烃、苯系物的氧化降解,最终实现对浅层多环芳烃、高浓度苯系物污染土壤的修复。原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术实现了单一技术之间的优势互补,为降低修复能耗和修复成本提供了一种可能性。该耦合技术的工艺流程如图1所示。

## 1.2 技术创新性

原位热脱附技术和原位化学氧化技术是有机污染场地修复中常用的技术，单一原位热脱附技术对污染物去除率较高，但存在能耗大、修复成本高的问题<sup>[13]</sup>；单一原位化学氧化技术具有处理成本低的优势，但针对土壤中高浓度多环芳烃污染存在对污染物去除不彻底、氧化药剂用量大<sup>[14]</sup>等问题。与单一热脱附或单一原位化学氧化修复技术相比，原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术实现了单一技术之间的优势互补，为降低修复能耗和修复成本提供了一种可能性。该耦合技术存在以下创新点。

1) 应用耦合修复技术，可提高修复效率，降低修复成本。原位热脱附与原位化学氧化耦合联用技术，可通过原位热脱附去除大部分的 VOCs 和短链石油烃，并通过氧化剂（过硫酸盐）集中靶向修复 PAHs 污染，减少了其它有机污染物对氧化药剂的消耗。另一方面，高温促进了 PAHs 等污染物从固相到液相的溶出，并对过硫酸钠药剂实现热激活强化，提高了药剂对污染物的氧化效率。相较单一技术可降低热脱附温度、减少能耗，土壤余热可增强后续化学氧化药剂的活性，在降低修复成本的同时，进一步提高修复效率。

2) 蒸汽/药剂注射、气相抽提均采用水平井形式，实现一井多用，减少材料损耗，便于管理。本耦合技术创新应用双层缠丝滤料井管作为水平井，实现蒸汽注射、药剂注射以及气相抽提。这种水平井管内外壁均由不锈钢缠丝构成，缠丝间隙形成筛缝，管内外壁之间填充滤料，施工时无需套管，施工简便、迅速。因水平井管耐高温、耐腐蚀，可根据修复需求兼做蒸汽/药剂注射井及抽提井，实现一井多用，便于集约化管理。采用水平井形式可显著增加与土壤的接触面积，提高原位热脱附修复过程中热传递效率和原位氧化修复过程中的药剂输送效率，降低布井数量，减少地表修复设施数量，减少材料损耗，降低修复成本。

3) 本耦合技术采用水平井形式，针对水平方向扩散范围广或者建构物下方污染修复或风险管控具有一定优势。目前，修复工程中用于蒸汽注射、药剂注射及气相抽提的井形式通常为垂直井，而关于水平井的研究起步较晚，国内尚无水平井蒸汽加热等相关工程实施案例可循，本耦合技术中水平井的应用可为工程案例实施提供参考。垂直井设计、施工简便，单位延米建井及安装成本较低，针对污染垂向分布复杂的场地具有较强的适用性，但针对污染呈水平带式分布或存在地表障碍物的污染地块，垂直井的劣势开始凸显。针对水平方向扩散范围较广的污染羽，水平井形式可显著增加与土壤的接触面积，采用少量水平井便能使药剂覆盖污染羽，达到更好的修复效果；另外，针对在产企业隐患排查或者自行监测过程中、场地调查后等发现的存在于不可移动/拆除建构物（比如建筑物、道路等）下方的污染修复或风险管控，水平井具有明显的技术优势。水平井与垂直井修复示意图见图 2。

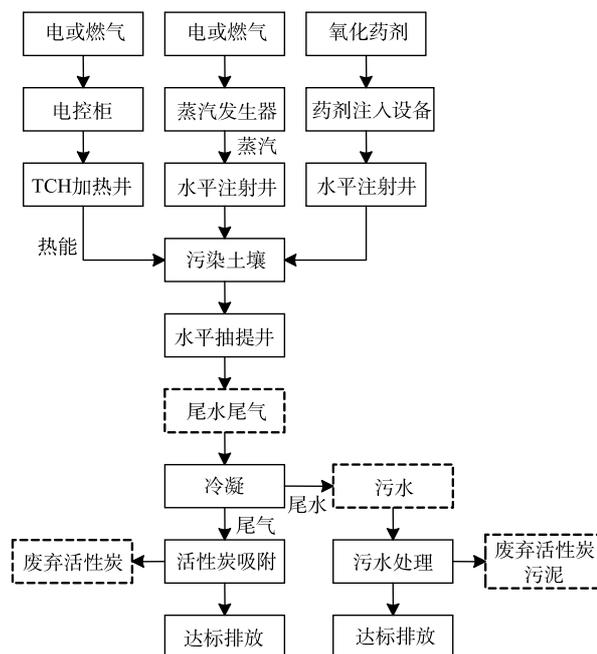


图 1 原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of the coupled in-situ thermal conduction and desorption, horizontal well and chemical oxidation remediation technology

## 2 技术验证评价方案

根据《环境管理环境技术验证》(GB/T 24034)<sup>[16]</sup>《焦化污染地块修复技术验证评价规范》(T/CPCIF 0197-2022)<sup>[9]</sup>的验证评价要求,对原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术验证评价方案进行了设计,基于验证评价目标和技术特点,设定了检测指标、布点采样与分析方法。

### 2.1 验证地块介绍

示范场地位于山西某焦化地块,污染面积约700 m<sup>2</sup>,最大污染深度为3 m,主要污染物有苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽等。地块勘探范围内的地层划分为人工堆积层和第四纪沉积层2大类,并按土层的物理性质指标、渗透性指标等,进一步划分为7个大层及其亚层。其中,0~10.0 m污染层位为第一层人工填土层、第二层中粗砂(Q<sub>4</sub><sup>al+pl</sup>)、第三层粉土层(Q<sub>4</sub><sup>al+pl</sup>),地下水埋深为24.6~25.5 m。地块目标污染物质量分数见表1。

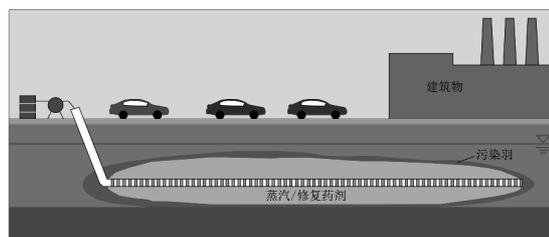
### 2.2 验证技术现场应用介绍

耦合修复技术中水平井管网系统布设在污染土壤区域范围,由多段耐高温、耐腐蚀的长度为2~3 m的预制滤料水平井管顺次连接形成,管壁上均匀分布有筛缝,其铺设方式采用非开挖式拉管施工工艺。预制滤料水平井管根据使用功能不同,可划分为注射井和抽提井,其在污染土壤中分布方式如图3所示。

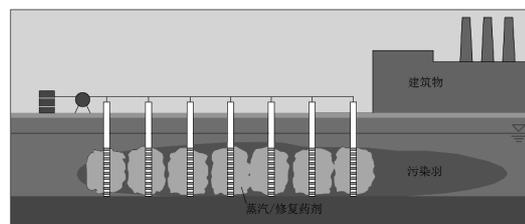
在蒸汽加热阶段,蒸汽发生系统产生的高温蒸汽通过输送管道进入水平注射井管,由井管筛缝进入土壤,将土壤加热至所需温度,促进土壤中污染物的挥发;挥发出来的污染物在系统末端引风机的作用下,经筛缝进入水平抽提井管,然后经管道输送至尾气处理单元处理达标后排放。

在原位化学氧化阶段,通过氧化药剂注射系统将氧化药剂输送至水平注射井管,由井管筛缝进入土壤,在热激活作用下与土壤中污染物发生反应。该氧化药剂注射系统为一体化撬装模块,由药剂搅拌系统、空压机、隔膜泵、仪表、控制系统等组成,水平井系统上安装有压力监测仪表,实时监测注射压力变化情况。

抽提系统由尾气处理系统中的引风机带动,使目标修复区域形成负压环境,将尾水尾气通过水平井抽提井管抽出,然后进入后端尾水尾气系统中处理达标后排放。验证现场见图4。



(a) 水平井修复示意图



(b) 垂直井修复示意图

图2 水平井与垂直井修复示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 2 Horizontal and vertical well remediation diagram

表1 目标污染物质量分数表  
Table 1 Concentrations of target pollutants mg·kg<sup>-1</sup>

地块名称	苯并(a)蒽	苯并(a)芘	茚并(1,2,3-cd)芘	二苯并(a,h)蒽	苯并(b)荧蒽
312	21.7	20.5	3.6	4.1	27.4
313	3.6	7.4	2.4	1.5	13.7
314	7.7	5.6	3	1.7	7.2
316	4.1	7.6	6.7	1.8	8.6
317	10.5	10	10	2.3	10.8
318	0.7	0.8	0.9	0.2	0.9
319	1.1	1.3	1.3	0.7	1.2

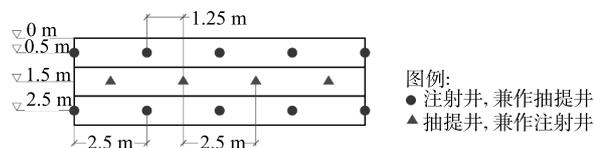


图3 水平井剖面布设示意图

Fig. 3 Profile of horizontal wells

### 2.3 检测指标设计

本次技术验证效果计划从环境效果、工艺运行和维护管理 3 个方面进行评价，结合污染地块和修复技术的实际情况，测试对象和具体测试参数如表 2 所示。

依据《焦化污染地块修复技术验证评价规范》(T/CPCIF 0197-2022)<sup>[9]</sup>，本验证技术环境效果指标计划采取现场测试的方式开展，工艺



图 4 验证现场

Fig. 4 The verification scene

表 2 山西示范地块修复技术验证参数设计

Table 2 Parameter design for remediation technology verification at the demonstration site in Shanxi

测试指标类别	测试对象	具体测试参数
	土壤污染物	苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽
	大气污染物	颗粒物、苯、二甲苯、非甲烷总烃、苯并(a)芘、臭气浓度
环境效果指标	水污染物	pH、悬浮物、化学需氧量、石油类、苯并(a)芘
	噪声	等效连续声级 (dB)
	固体废物	产生量
工艺运行指标	运行参数	温度、影响半径
维护管理指标	能耗	燃气使用量、耗水量、耗电量
	物耗	氧化药剂等

运行指标和维护管理指标计划采取台账法、现场查看等方式开展，绿色性指标主要是指修复系统运行过程中大气污染物排放、废水排放以及产生噪声等情况。

### 2.4 检测点位布设

修复效果布点依据《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》(HJ25.5)<sup>[17]</sup>和《焦化污染地块风险管控与修复效果评估技术规范》(T/CPCIF 0198—2022)<sup>[9]</sup>开展，尽量布设在修复效果薄弱区(冷点)。验证地块污染土壤面积约 700 m<sup>2</sup>，按照 10 m×10 m 布点，共布设 7 个点位。由于水平井(抽提井/加热井)埋设深度为 0.5、1.5 和 2.5 m，本验证技术修复效果采样深度设置为 0.2、1、2 和 3 m 处。同时，为了考察本验证技术不对周边土壤造成二次污染，在地块边界外 1 m 处布设 5 个点位、采样深度为 1 m，土壤修复效果布点图见图 5，绿色性监测布点图见图 6。



图 5 山西示范地块土壤修复效果布点图

Fig. 5 Distribution of remediation results monitoring points for the demonstration site in Shanxi

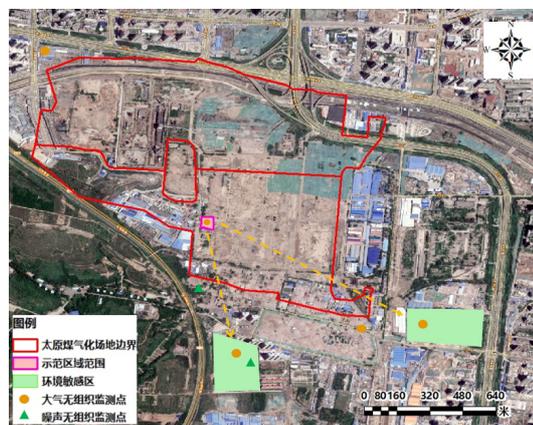


图 6 绿色性监测布点图

Fig. 6 Distribution of greenness monitoring points

## 2.5 采样及分析方法

根据原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术的特点和评价目标,在技术验证评价测试阶段,采集土壤、大气(有组织废气和无组织废气)、废水和噪声样品,并设计针对性的检测方案。土壤样品在整个系统运行完成后,在平面及不同深度采集;周边土壤样品在整个系统运行前和运行结束后分别采样检测;大气(有组织废气和无组织废气)、废水、噪声等样品在整个系统运行过程中进行采样,具体见表3。采用《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600)<sup>[18]</sup>、《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166)<sup>[19]</sup>、《地下水质量标准》(GB/T 14848)<sup>[20]</sup>等标准规定的检测方法对土壤、废气、废水、噪声等样品进行检测。

表3 技术验证评价样品采集一览表  
Table 3 List of samples collected for technology verification and evaluation

监测分类	采样点	测试指标	样品数量	监测频率	验证方式
修复效监测	地块内土壤	苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽	28	1	现场检测
周边土壤环境监测	地块周边土壤	苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽	10	2	现场检测
水环境监测	场区	pH、悬浮物、化学需氧量、石油类、苯并(a)芘	1	1	现场检测+台账法
大气环境监测	场区及周边	VOCs(以非甲烷总烃计)、颗粒物、苯、二甲苯、苯并(a)芘、臭气浓度	5	1	现场检测
	排气筒	VOCs(以非甲烷总烃计)、颗粒物、苯、二甲苯、苯并(a)芘、臭气浓度	1	1	现场检测
噪声环境监测	场区及周边	等效连续A声级	2	1	现场检测
固体废物	—	—	—	—	台账法

## 3 检测结果与评价分析

### 3.1 土壤修复效果评价

基于ETV检测方案设计,在整个系统运行完成后,采用钻机对平面及不同深度各土壤点位进行采样,共采集土壤样品28个,检测指标为苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽,具体检测结果见图7所示。结果表明,修复结束后,目标污染物苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽均达到了地块修复目标值。

基于ETV检测方案设计,为了考察本验证技术不对周边土壤造成二次污染,在验证地块周边1 m外布设了5个点位,在整个系统运行前和运行结束后分别采样检测,共采集土壤样品10个,检测指标为苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽,具体检测结果如图8所示。结果表明,系统运行前,个别点位存在一定的超标情况,但修复结束后,目标污染物苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘和二苯并(a,h)蒽均达到了一类用地筛选值。这表明,该技术不仅未对周边土壤造成二次污染,且对周边土壤污染具有一定的改善效果。初步分析,其可能的原因是在施工过程中,采取了边界处减少蒸汽注射、加强气相抽提与药剂注射等施工措施,使得二次污染得到有效控制。

### 3.2 绿色性效果评价

1) 废气。针对验证现场废气排口的大气污染物排放情况,连续进行了4批次样品采集及检测,每批次分别检测颗粒物、苯、二甲苯、VOCs(以非甲烷总烃计)、苯并(a)芘等污染物的质量浓度和排放速率以及臭气浓度。检测结果如表4所示。由表4可知,在原位热脱附-水平井-化学氧

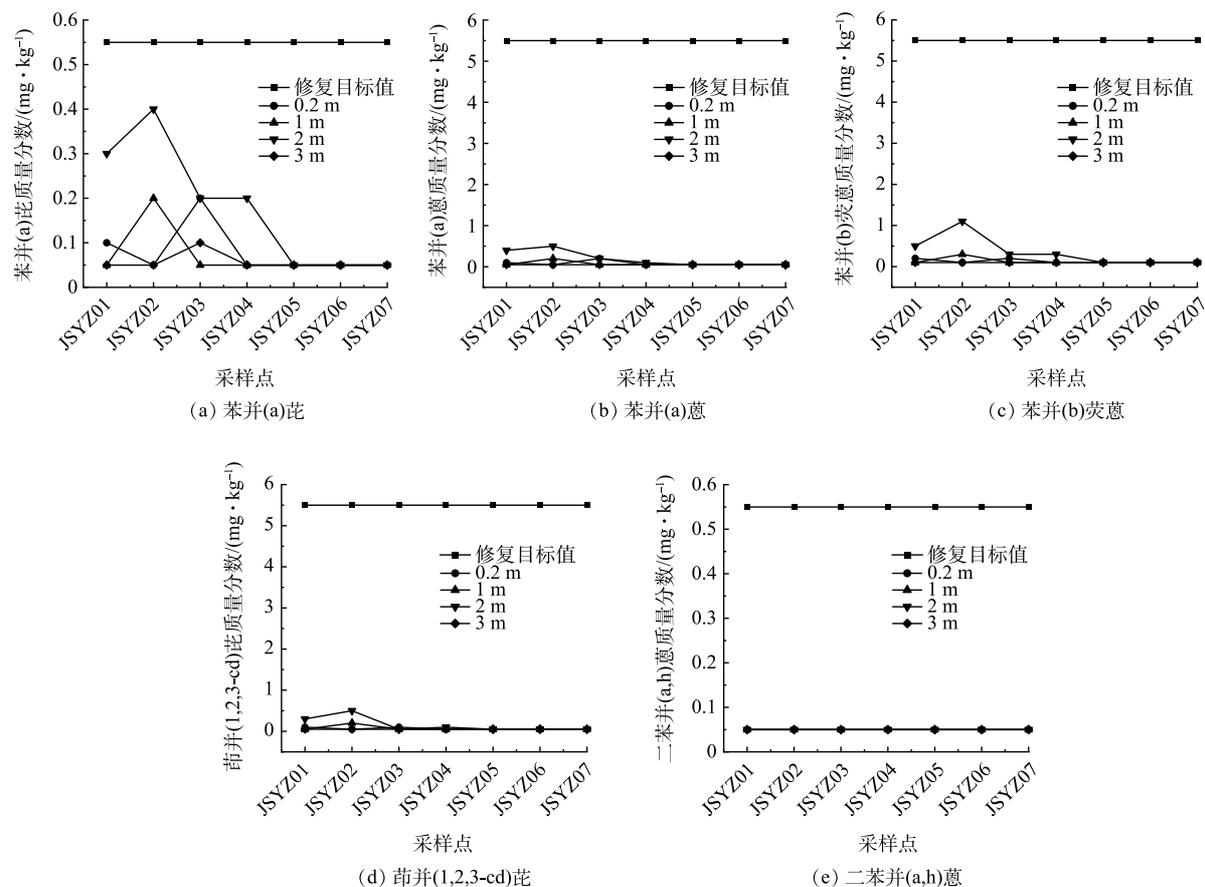


图 7 修复结束后不同深度目标污染物达标情况

Fig. 7 Compliance of target pollutants at different depths after the remediation

化耦合修复技术的应用过程中，有组织排放大气污染物中颗粒物、苯、二甲苯、VOCs(以非甲烷总烃计)、苯并(a)芘排放质量浓度及排放速率均低于《大气污染物综合排放标准》<sup>[21]</sup>相关排放限值要求，臭气浓度低于《恶臭污染物排放标准》<sup>[22]</sup>中相关排放限值，工艺废气均可达标排放。

针对验证现场无组织排放废气，根据相关规定以及周边敏感点识别情况，在验证场地边界上风向、下风向、验证区域中心以及周边敏感点共设置了5个监测点位，并连续检测了4批次，分别检测颗粒物、VOCs(以非甲烷总烃计)、苯并(a)芘、苯和二甲苯污染物的排放质量浓度和臭气浓度。无组织排放检测结果如表5所示(以第1批次为例)。由表5可知，验证技术应用过程中厂界和周边敏感点大气污染物颗粒物、VOCs(以非甲烷总烃计)、苯并(a)芘、苯和二甲苯无组织排放的排放质量浓度均低于《大气污染物综合排放标准》<sup>[21]</sup>相关限值要求，臭气浓度低于《恶臭污染物排放标准》<sup>[22]</sup>中相关排放限值。

2) 废水。针对验证现场产生废水的情况，在设备排口进行了连续3批次的样品采集及检测，其中pH的检测结果为7.1~7.2，满足6~9的限值范围要求。废水中污染物检测指标包括悬浮物、化学需氧量、石油类和苯并(a)芘，具体检测结果见表6所示。结果表明，在原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术应用过程中，废水中污染物排放质量浓度满足《污水综合排放标准》<sup>[23]</sup>中三级标准的相关要求。对设备废水排口进行废水排放量检测，结果显示每批次产生废水量约5 m<sup>3</sup>。

3) 噪声。针对示范场地现场情况，在示范场地南侧边界处和周边敏感点处进行噪声检测。检测结果如表7所示，结果表明，在原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术应用过程中，验证场地南侧边界处及周边敏感点裕峰花园处噪声检测结果均低于《工业企业厂界环境噪声排放标准》<sup>[24]</sup>

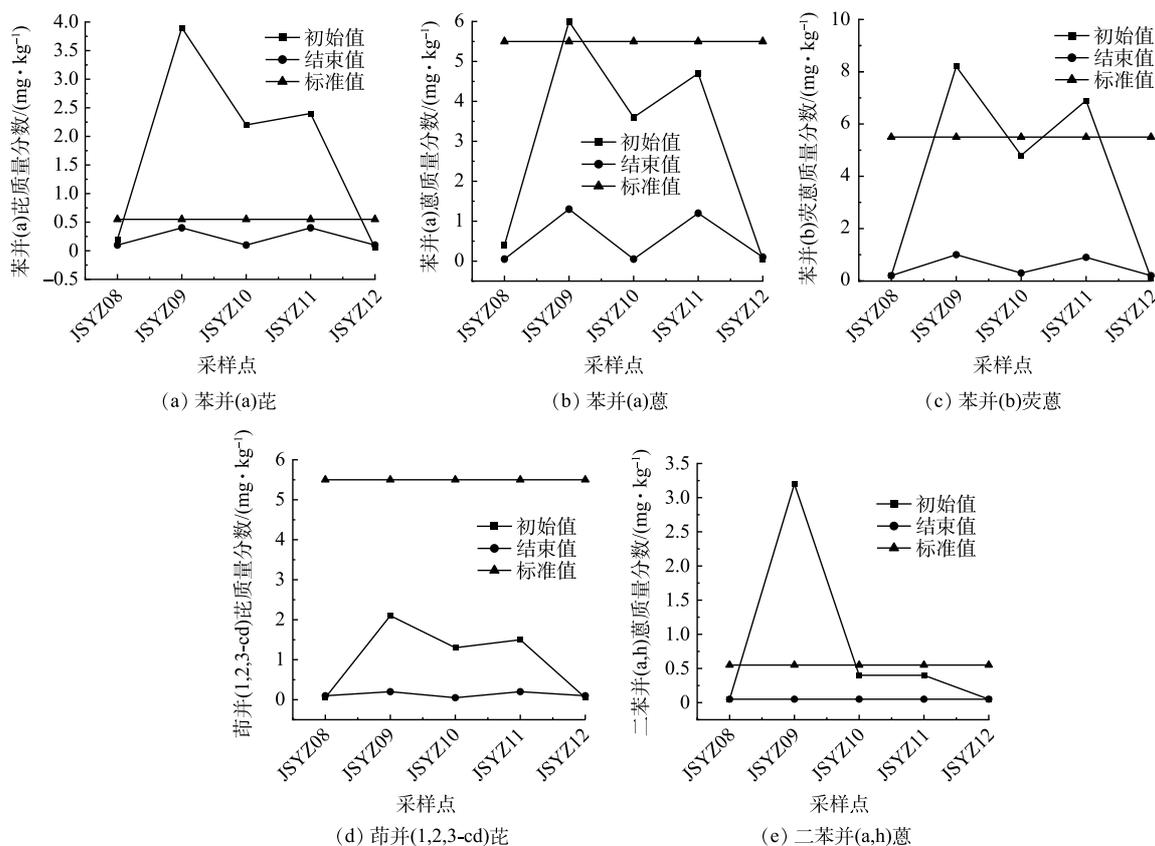


图8 地块周边目标污染物质量分数变化情况

Fig. 8 Changes in the concentrations of target pollutants around the site

表4 固定源废气监测结果

Table 4 Monitoring results of exhaust gas emissions from stationary sources

监测次数或 排放限值	颗粒物		苯		二甲苯		VOCs (非甲烷总烃)		苯并(a)芘		臭气 浓度* (无量纲)
	质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	排放速率/ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )									
第1次	6.2	$2.44\times 10^{-2}$	$1.8\times 10^{-3}$ L	$<7.09\times 10^{-6}$	$1.8\times 10^{-3}$ L	$<7.09\times 10^{-6}$	1	$4.16\times 10^{-3}$	19	$7.90\times 10^{-5}$	54
第2次	7.8	$3.05\times 10^{-2}$	$1.8\times 10^{-3}$ L	$<7.04\times 10^{-6}$	$1.8\times 10^{-3}$ L	$<7.04\times 10^{-6}$	1.02	$4.24\times 10^{-3}$	12	$4.99\times 10^{-5}$	97
第3次	5.3	$2.08\times 10^{-2}$	$1.8\times 10^{-3}$ L	$<7.05\times 10^{-6}$	$1.8\times 10^{-3}$ L	$<7.05\times 10^{-6}$	0.87	$3.62\times 10^{-3}$	11	$4.57\times 10^{-5}$	72
第4次	6.4	$2.51\times 10^{-2}$	$1.8\times 10^{-3}$ L	$<7.06\times 10^{-6}$	$1.8\times 10^{-3}$ L	$<7.06\times 10^{-6}$	0.96	$3.99\times 10^{-3}$	14	$5.82\times 10^{-5}$	74
排放限值	120	3.5	12	0.5	70	1	120	10	300	$0.050\times 10^{-3}$	2 000

备注: 1)  $1.8\times 10^{-3}$  L中 $1.8\times 10^{-3}$ 表示苯的检出限, L表示检测结果低于方法检出限; 2) 二甲苯的组分为邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯, 各组分的检出限为 $1.8\times 10^{-3}$   $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 且均未检出。

中4类功能区昼间噪声限值70 dB和夜间噪声限值55 dB。

4) 固体废物。原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术修复过程中产生的固废废物主要为废活性炭, 经核算, 共产生废活性炭约3.5 t(未吸附饱和)。

### 3.3 运行维护检测结果评价

1) 运行参数。该耦合技术可根据污染类型分阶段实施, 其中, 第一阶段组合应用热传导加热(TCH)与土壤气相抽提(SVE)技术, 实现土壤中挥发性有机污染物的去除; 第二阶段组合应用蒸汽加热(SEE)与原位化学氧化(ISCO), 在土壤快速、均质升温后, 实现高效热激活化学氧化。根据

表 5 无组织废气监测结果

Table 5 Monitoring results of uncontrolled exhaust gas emissions

采样地点	颗粒物/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	VOCs (非甲烷总烃)/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	苯并(a)芘/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	苯/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	二甲苯/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	臭气浓度* (无量纲)
1#: 修复区域技术验证中心	0.352	0.32	ND	$1.5\times 10^{-3}\text{L}$	$1.5\times 10^{-3}\text{L}$	15
2#: 裕峰花园	0.302	0.25	ND	$1.5\times 10^{-3}\text{L}$	$1.5\times 10^{-3}\text{L}$	<10
3#: 公园美地小区	0.434	0.32	ND	$1.5\times 10^{-3}\text{L}$	$1.5\times 10^{-3}\text{L}$	<10
4#: 项目场地边界下风向	0.517	0.44	ND	$1.5\times 10^{-3}\text{L}$	$1.5\times 10^{-3}\text{L}$	<10
5#: 项目场地边界上风向	0.417	0.28	ND	$1.5\times 10^{-3}\text{L}$	$1.5\times 10^{-3}\text{L}$	18

备注：1)  $1.5\times 10^{-3}\text{L}$  中  $1.5\times 10^{-3}$  表示苯的检出限，L 表示检测结果低于方法检出限；2) 二甲苯的组分为邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯，各组分的检出限为  $1.5\times 10^{-3}\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，且均未检出。

实际运行参数记录，并结合验证地块污染状况，该耦合技术在此地块的应用主要集中于第二阶段，即组合应用蒸汽加热 (SEE) 和原位化学氧化 (ISCO)，在土壤快速、均质升温后，实现高效热激活化学氧化。

根据实际运行记录参数，在原位蒸汽加热强化抽提阶段，通过蒸汽发生器产生高温蒸汽，经水平注入井注入至土壤中，当蒸汽注入运行 20 h 后，周边土体升温至 50~80 °C，蒸汽扩散影响半径达到 1.8 m；停止蒸汽注入约 3~5 d 后，土壤温度稳定在 40~50 °C，为后续氧化药剂的热激活氧化提供了有力保障。然后，通过原位注入系统向土壤中注入过硫酸钠溶液，设计药剂投加比为 1%~2%，注射完毕后养护两周，随后，对土壤中目标污染物进行检测分析。结果显示，土壤中污染物浓度均达到地块修复目标值。

2) 处理规模。本验证评价案例所采用的原位热脱附-水平井-化学氧化修复系统，单批次可处理 2 100  $\text{m}^3$  污染土壤，单批次处理周期为 3 个月。

3) 资源能源消耗。原位热脱附-水平井-化学氧化修复系统运行过程中需消耗水、电、燃气、氧化药剂等资源或能源，因此，对其资源能源消耗量进行核算。经核算，该技术处理 1  $\text{m}^3$  污染土壤的耗水量为 0.25 t，耗电量为 19  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，耗气量为 9.4  $\text{m}^3$ ，过硫酸钠氧化药剂消耗量为 18 kg，处理 1  $\text{m}^3$  污染土壤的资源能源消耗成本约为 270 元。以上核算结果表明，该耦合技术具有资源能源消耗较少、处理成本较低的特点。

## 4 结论

1) 通过对原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术的验证评价，证实该技术是一种切实有效的焦化污染地块修复组合技术。

2) 验证测试结果表明，原位热脱附-水平井-化学氧化耦合修复技术不仅能够有效降低焦化污染地块中 PAHs 的浓度，同时修复过程中污染物排放达标，资源能源消耗较少，修复成本较低，环境

表 6 废水监测结果

Table 6 Wastewater monitoring results

监测次数或 排放限值	pH	悬浮物/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	化学需氧量/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	石油类/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	苯并(a)芘/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
第 1 次	7.1	8	26	0.21	0.004L
第 2 次	7.2	6	32	0.2	0.004L
第 3 次	7.1	7	28	0.2	0.004L
排放限值	6~9	400	500	20	0.03

表 7 噪声监测结果

Table 7 Noise monitoring results dB

监测点位	昼间		夜间	
	实测值	排放限值	实测值	排放限值
1#: 场地南侧边界	57.0	70	53.3	55
2#: 裕峰花园	52.6	70	43.7	55

备注：1) 监测时昼间风速 1.4  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、风向 30 度，夜间风速 1.0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、风向 60 度，多云；2) 检测时间为 2021 年 09 月 26 日。

效益和社会效益显著,可应用于京津冀地区焦化污染地块,尤其是修复不可移动/拆除建构物(比如建筑物、道路等)下方的污染区域。

3) 环境技术验证评价能够为土壤修复新技术(组合技术)的推广应用提供有效助力,其科学、客观的评价方法能够使更多的土壤修复新技术得到客观、公正的评价,进而有效促进新技术的推广应用。

## 参 考 文 献

- [1] 陈梦舫. 我国工业污染场地土壤与地下水重金属修复技术综述[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 327-335.
- [2] 楼春, 钟茜. 焦化厂场地土壤污染分布特征分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(4): 177-179.
- [3] 刘平, 王睿, 韩佳慧, 等. 我国环境技术验证评价制度建设探析[J]. 环境保护科学, 2014, 40(2): 86-89.
- [4] 冯钦忠, 陈扬, 刘俐媛, 等. 医疗废物高温干热处理技术应用案例研究[J]. 环境工程, 2017, 35(增): 438-443.
- [5] 刘平, 邵世云, 王睿, 等. 环境技术验证评价体系研究与案例应用[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2161-2166.
- [6] 杨颖显, 王文冬. 环境技术验证(ETV)研究[J]. 黑龙江科技信息, 2013(27): 99.
- [7] 中国环境科学学会. 国内首例ETV验证案例完成: 水蚯蚓原位消解污泥技术 [EB/OL]. [2013-04-15]. [http://www.chinacses.org/zxpj/jisy/gzdt\\_153/201304/t20130415\\_633891.shtml](http://www.chinacses.org/zxpj/jisy/gzdt_153/201304/t20130415_633891.shtml).
- [8] 曹云霄, 陈伟星, 于晓东, 等. 环境技术验证在医疗废物消毒处理领域的应用——以摩擦热处理技术为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 2985-2995.
- [9] 中国石油和化学工业联合会. 关于批准发布《绿色设计产品评价技术规范氯化聚乙烯》等 14 项团体标准的公告(2022年第 02号)[EB/OL]. 2-04-14.
- [10] AZIZAN N A, KAMARUDDIN S A, CHELLIAPAN S. Steam-enhanced extraction experiments, simulations and field studies for dense non-aqueous phase liquid removal: a review[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 47: 05012.
- [11] 王澎, 王峰, 陈素云, 等. 土壤气相抽提技术在修复污染场地中的工程应用[J]. 环境工程, 2011, 29(S1): 171-174.
- [12] CHEN L W, HUA X, CAI T, et al. Degradation of triclosan in soils by thermally activated persulfate under conditions representative of in-situ chemical oxidation (ISCO)[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 369: 344-352.
- [13] 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.
- [14] STROO H F, LEESON A, MARQUSEE J A, et al. Chlorinated ethene source remediation: Lessons learned[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(12): 6438-6447.
- [15] EPA. Horizontal Remediation Wells [EB/OL]. [2020-6-16]. [http://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/horizontal\\_remediation\\_wells/cat/overview/](http://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/horizontal_remediation_wells/cat/overview/).
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 环境管理 环境技术验证: GB/T 24034-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [17] 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(试行): HJ 25.5-2018[S]. 2018.
- [18] 生态环境部. 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 36600-2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [19] 环境保护部. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166-2004[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.
- [20] 生态环境部. 地下水质量标准: GB/T 14848-2017[S]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
- [21] 国家环境保护局. 大气污染物综合排放标准: GB 16297-1996 [EB/OL]. [1997-01-01]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjbh/dqgdwrywrwpfbz/199701/t19970101\\_67504.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjbh/dqgdwrywrwpfbz/199701/t19970101_67504.shtml)
- [22] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 恶臭污染物排放标准: GB 14554-1994[EB/OL]. [1994-01-15]. [http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjbh/dqgdwrywrwpfbz/199401/t19940115\\_67548.shtml](http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjbh/dqgdwrywrwpfbz/199401/t19940115_67548.shtml).
- [23] 国家环境保护局. 污水综合排放标准: GB 8978-1996[EB/OL]. [1998-01-01] [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/swrwpfbz/199801/t19980101\\_66568.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/swrwpfbz/199801/t19980101_66568.shtml)
- [24] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 工业企业厂界环境噪声排放标准: GB 12348-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

(责任编辑: 金曙光)

## Application of environmental technology verification in contaminated soil remediation—a case study of the coupled in-situ thermal desorption, horizontal well and chemical oxidation remediation technology

HU Hongxia<sup>1,2</sup>, LV Jing<sup>2,3</sup>, LIU Fengping<sup>1,2</sup>, LI Jingwen<sup>2,3</sup>, ZHANG Yankun<sup>1,2</sup>, DUAN Songqing<sup>4</sup>, SUN Ning<sup>1,2</sup>, DING Zhenyu<sup>1,2,\*</sup>, LI Shupeng<sup>2,3</sup>

1. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. National Engineering Laboratory for Site Remediation Technologies, Beijing 100015, China; 3. BCEG Environmental Remediation CO., LTD, Beijing 100015, China; 4. Shanxi Province Ecological Environmental Monitoring and Emergency Support Center (Shanxi Academy of Ecological Environmental Sciences), Taiyuan 030027, China

\*Corresponding author, E-mail: dingzy@caep.org.cn

**Abstract** Environmental technology verification (ETV) can facilitate the promotion and application of new technologies through scientific and objective evaluation of innovative environmental technologies. Based on the verification and evaluation methods for coking-contaminated site remediation technologies, this paper verified and evaluated the feasibility, greenness, resource and energy consumption, and other dimensions of the coupled in-situ thermal conduction and desorption, horizontal well and chemical oxidation remediation technology when applied to a coking-contaminated site in Shanxi province. The results showed that the technology could achieve the desired remediation results by reducing the PAH concentrations at the contaminated site to the remediation target value within a remediation cycle (three months). The pollutants such as exhaust gas, wastewater and noise generated during the remediation process were emitted or discharged in accordance with relevant requirements. According to the calculations of the amount of solid waste, water and electricity consumption, operating costs, etc. incurred in the remediation process, the technology features low resource and energy consumption, low treatment costs and strong applicability to the remediation of sites that cannot be excavated. This verification and evaluation case study suggested that the coupled in-situ thermal conduction and desorption, horizontal well and chemical oxidation remediation technology could be applied to the remediation of aeration zone contaminated soil at coking-contaminated sites.

**Keywords** environmental technology verification (ETV); coking-contaminated site; soil remediation technologies