

---

# 《多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术指南》

## 编制说明

（征求意见稿）

《多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术指南》编制组

二〇二三年十二月

---

# 目 次

<b>1 任务来源</b> .....	<b>3</b>
<b>2 标准制定必要性</b> .....	<b>3</b>
<b>3 主要工作过程</b> .....	<b>4</b>
<b>4 国内外相关标准的研究</b> .....	<b>6</b>
4.1 国外相关标准的研究.....	6
4.2 国内相关标准的研究.....	6
<b>5 标准编制的基本原则和技术路线</b> .....	<b>7</b>
5.1 标准定位.....	7
5.2 编制原则.....	7
5.3 编制工作的技术路线.....	8
<b>6 指南主要内容</b> .....	<b>8</b>
6.1 范围.....	8
6.2 规范性引用文件.....	9
6.3 术语和定义.....	9
6.4 通用原则.....	9
6.5 技术方案.....	10
6.6 二次污染防治.....	13
6.7 修复效果评估.....	13
<b>7 环境、社会及经济效益</b> .....	<b>13</b>
7.1 环境与社会效益.....	13
7.2 经济效益.....	14

---

## 1 任务来源

2022年2月，北京化工大学向中华环保联合会提交了《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》立项申请表，分别于2022年2月和6月，经两次专家评审，于2022年6月该项团体标准获得批准立项，项目信息在全国团体标准信息平台网站（<http://www.ttbz.org.cn>）予以公示。2023年6月18日对指南草案稿进行了专家预评审，建议将名称修改为《场地多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术指南》，同年8月2日专家评审会建议将名称修改为《多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术指南》。

《多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术指南》的编制是依据科技部国家重点研发计划项目“基于‘大智物云’的焦化污染场地生物修复一体化智能装备研究”（2020YFC1807900）的考核指标要求。标准编制组成员单位是在此重点研发专项相关课题参研单位的基础上，同时面向社会广泛征集、严格筛选部分其他参编单位后确定的。北京化工大学是本指南的技术负责单位，并承担总体编写任务，中华环保联合会负责标准的过程管理，其他参编单位有天津壹鸣环境污染防治有限公司、武汉大学、天津大学、北京建工环境修复股份有限公司等企事业单位。

## 2 标准制定必要性

中国是全球土壤污染较严重的国家之一，生态环境部2006年的调查数据显示，土壤污染以重金属和有机污染为主，其中有机污染类型中多环芳烃类污染场地最多，占54.9%，与欧美有机污染场地中氯代烃类污染场地占比最多不同。为切实加强土壤污染防治，改善土壤环境质量，2016年5月国务院印发《土壤污染防治行动计划》，从十个方面落实土壤污染防治，到2030年，污染地块安全利用率达到95%以上；同年，为贯彻落实国务院《土壤污染防治行动计划》，加强污染地块环境保护监督管理，防控污染地块环境风险，生态环境部发布《污染地块土壤环境管理办法（试行）》（环境保护部令第42号），对污染地块进行了明确规定，提出将陆续发布污染场地调查、监测、风险评估与治理修复、污染物

---

监测方法等行业标准，不断完善我国土壤标准体系。2018年，生态环境部与国家市场监督管理总局先后联合发布了《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB15618-2018）和《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018），进一步完善了土壤污染防治标准；同年，《中华人民共和国土壤污染防治法》发布，填补了我国土壤污染防治法律的空白，更有利于将土壤污染防治工作纳入法制化轨道，以遏制当前土壤环境恶化的趋势，并为推进生态文明建设，实现绿水青山、建设美丽中国添砖加瓦。

石化、焦化、钢铁等企业场地土壤受多环芳烃污染严重，企业搬迁遗留土壤需要进行修复后方可再利用。土壤多环芳烃污染修复技术有物理法、化学法和生物法。物理法主要指客土、隔离法、溶剂萃取、通气法等；化学法主要有化学氧化、电化学分解、热解焚烧等；生物法主要是利用微生物的特殊功能对污染土壤进行修复。目前，多环芳烃土壤污染以化学氧化和高温焚烧为主。以双氧水、过硫酸盐和臭氧等为氧化剂的化学氧化法处理土壤中的多环芳烃，氧化剂投加量大，处理成本高。高温焚烧处理土壤中的多环芳烃，能耗高，且破坏土壤原有结构和组分。利用微生物降解土壤中的多环芳烃，成本低，但周期长。采用化学氧化和生物降解相结合的生物强化修复技术处理修复焦化污染场地土壤，在节省氧化剂用量的同时，加速后续生物处理进程，缩短修复周期，降低修复总成本。

因此，通过梳理国内外现有的焦化污染场地修复技术，结合科研成果和工程实践经验，对焦化污染场地修复技术进行分类指导十分必要。焦化污染场地生物强化修复技术与其他修复技术比较，在适用范围、污染负荷要求，工艺设计均具有自己的特点，有必要拟定相应指南，指导该技术在焦化污染场地修复顺利实施，更好地服务于我国有机污染场地修复实践。

### 3 主要工作过程

2020年12月，科技部下达国家重点研发计划项目“基于‘大智物云’的焦化污染场地生物修复一体化智能装备研究”各课题任务书，其中课题2“生物修复强化工艺及智能化设备研发”的考核指标之一为编制《多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术指南》。

---

2021年1-5月，成立编制组，开展文献资料调研工作。召开多次研讨会，形成了化学氧化协同生物堆和化学氧化协同生物反应两种焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术方案，进一步确定指南大纲，明确了指南的适用范围。

2021年6-12月，编制《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》初稿及《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》立项申请表。

2022年2月，编制组向中华环保联合会提交了《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》立项申请表。

2022年2月，中华环保联合会组织专家对《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》立项可行性进行了论证，并提出修改意见。

2022年3-5月，编制组根据专家意见，对《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》初稿进行了完善。

2022年6月，编制组向中华环保联合会提交了《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》修改稿，并召开了专家论证会。当月，该项团体标准获得批准立项。

2022年7月-2023年5月，编制组吸收“基于‘大智物云’的焦化污染场地生物修复一体化智能装备研究”项目组的研发成果，进一步完善指南内容并形成《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》征求意见稿，同时完成《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》编制说明。

2023年6月，编制组向中华环保联合会提交《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》草案稿和《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复技术指南》编制说明，召开指南预评审会。与会专家建议将标准题目修改为《场地多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术指南》。

2023年8月，编制组向中华环保联合会提交《场地多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术指南》草案稿和《场地多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术指南》编制说明，召开指南评审会。评审专家一致同意，将标准名称定稿为《多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术指南》。

---

## 4 国内外相关标准的研究

### 4.1 国外相关标准的研究

发达国家对土壤保护的相关立法比较早，如美国 1935 年就颁布的《土壤保护法》及 1980 年颁布的《超级基金法》，欧盟 1972 年颁布的《欧洲土壤宪章》，荷兰 1987 年出台的《土壤保护法》，德国 1998 年颁布的《联邦土壤保护法》。对污染土壤的治理，各国投入了大量人力物力，对治理技术也给出了些指导性文件。如美国环保署针对土壤石油污染，分别于 2001、2004 年先后出台了《海滨及淡水湿地生物修复指南》、《石油污染盐碱地生物修复指南》，在 2005 年的《土壤生物修复指南》对包括多环芳烃、石油烃的有机污染土壤的修复给出了修复实施方案。到目前为止，还未查阅到国外焦化污染场地生物强化修复的相关标准。

### 4.2 国内相关标准的研究

针对有机污染场地修复和开发利用，生态环境部发布了《土壤环境质量 建设用土壤污染风险管控标准（试行）》(GB36600-2018)，对建设用土壤多环芳烃筛选值和管制值做出了规定。针对焦化污染场地土壤修复和开发利用，中国石油和化学工业联合会相继发布了《焦化污染地块风险管控与修复效果评估技术规范》、《焦化污染地块修复技术验证评价规范》；地下水污染防治与修复产业联盟发布了《焦化污染地块治理修复二次污染防治技术指南》和《焦化污染地块修复后再开发利用环境监管技术指南》。针对有机污染土壤修复仅见生态环境部发布的《污染土壤修复工程技术规范 生物堆》。目前为止，尚未见团标、行标及国标对我国焦化污染土壤生物强化修复技术发布过规范性或指导性标准。

综上，国内外均未发现焦化污染土壤生物强化修复技术的相关标准。因此，通过本团体标准的制定、实施和完善有望进一步形成行业标准。

---

## 5 标准编制的基本原则和技术路线

### 5.1 标准定位

本指南提供了多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术的工艺构成、工艺运行过程中必要指标的检测与过程控制、工艺运行和修复效果评估要点，为有关污染治理企业进行焦化污染场地修复时，能否选择生物强化修复技术提供决策依据。也为企业快速、高效完成生物强化修复技术工艺设计提供指导，为环境管理部门判断生物强化修复技术运行可靠性提供参考。通过本指南的制定、实施和完善有望进一步形成行业标准。

### 5.2 编制原则

#### （1）问题导向原则

焦化污染土壤中的多环芳烃无论是化学法还是生物法均难降解，化学法成本较高，生物法处理周期较长。为降低焦化污染土壤修复时间，节省处理成本，通过化学氧化与生物降解耦合，构成多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术。编制组基于现有的科研及工程实践，编制《多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术指南》，以便更好地服务于我国焦化污染场地修复工作。

#### （2）科学合理原则

指南内容经过实验室研究和实际污染场地实践，使指南有较强的科学性和指导性。

#### （3）政策相符原则

本指南所涉及的技术用于土壤修复，为环保产业相关技术，属于国家鼓励发展的产业。本指南对技术实施过程中的废气、废水及噪声排放符合国家标准规定。

#### （4）客观公正原则

指南编制过程按要求执行，指南内容按标准规定起草，确保标准编制的客观公正。

### 5.3 编制工作的技术路线

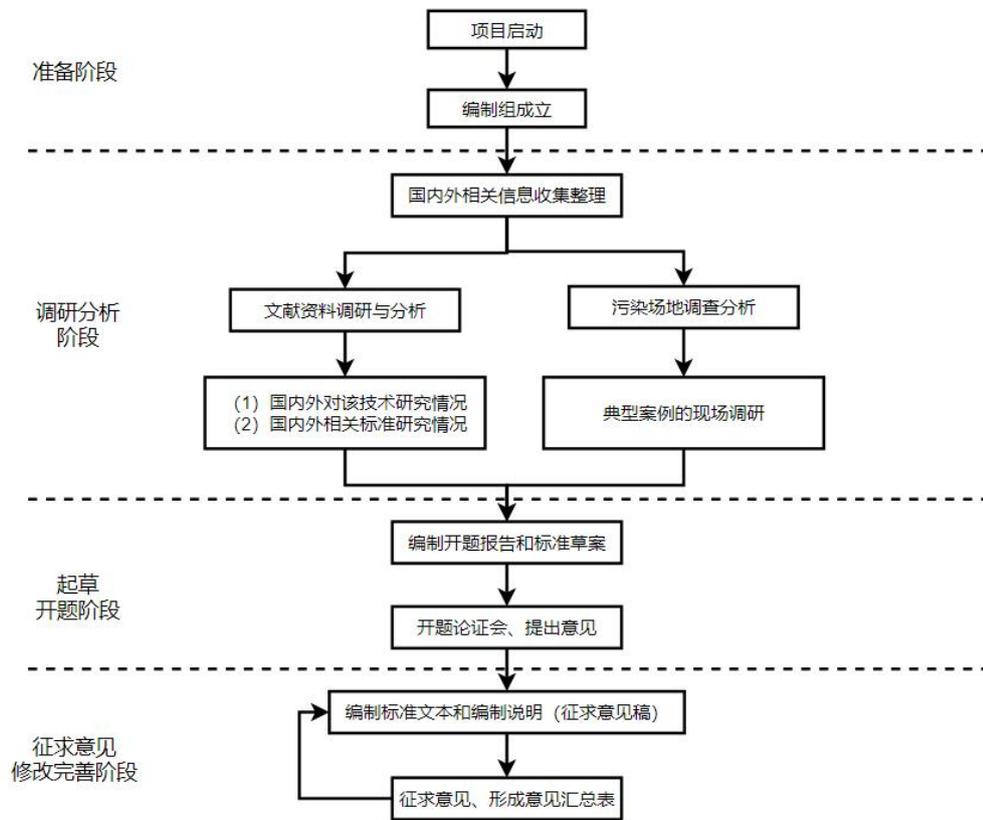


图 5.1 技术路线图

## 6 指南主要内容

### 6.1 范围

土壤中的多环芳烃浓度过高会抑制微生物的生长，不适于采用生物法处理。本指南提出的多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术适用于中低浓度多环芳烃污染土壤的修复，或者经过化学氧化预处理后，土壤中的多环芳烃浓度下降至不抑制微生物生长的浓度，这样的土壤修复也适用本指南提出的多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术。

土壤修复委托单位、环保管理部门也可参考本指南中的技术参数，判断目标土壤是否适宜采用多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术。

---

## 6.2 规范性引用文件

引用了与本标准密切相关的法规、规范、标准和文件，其中现行的《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》是制定本标准修复目标的法律依据。多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术实施可能产生二次污染（废水，废气，噪声等），其防治方面的规定引用了现行的国家及部级标准和技术规范。

## 6.3 术语和定义

为了使标准内容易于理解，标准在直接引用《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》（HJ 682-2019）相关术语的基础上，补充了与本标准相关的术语和定义 2 个：土壤异位强化生物修复、泥浆生物反应器。

## 6.4 通用原则

在焦化污染土壤修复时的一般性注意问题，如技术工艺及其参数选择考虑的问题，技术成熟可靠、技术先进、兼顾经济性和安全性问题，工艺设计需贯彻的绿色修复理念等。

多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术对土壤中的污染物及其污染负荷有一定要求。通过土壤调查和文献查阅确定了焦化场地土壤中的主要污染物为多环芳烃，除此之外，石油烃、联苯、重金属也是常见污染物。考虑到微生物生长所需环境的特殊性，作为有毒污染物的多环芳烃在土壤中的浓度不能超过微生物的耐受限度，否则微生物无法正常生长，达不到去除污染物的目的，故土壤中的多环芳烃负荷以不抑制多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术中所使用微生物的生长为宜。

该指南涉及到的常用技术，如生物堆技术，在相关标准有规定，为便于使用者理解和采用，也在该部分内容中列出。

---

## 6.5 技术方案

### 6.5.1 技术方案概述

有机污染土壤的生物修复以微生物修复为主，分为原位修复和异位修复。原位修复利用土壤原有土著微生物或接种外源微生物，采用添加营养物质、空气注入、表面活性剂增效等强化手段，加速微生物代谢，缩短土壤修复周期。异位修复则是将污染土壤收集后集中处理，目前主要有生物堆和生物反应器两种工艺。生物堆技术，将污染土壤堆积于设有渗滤液收集系统和强化通风系统的场地，接种必要的好氧微生物并提供适量的水分和养分，通过强化通风系统补充氧气，利用好氧微生物的代谢作用降解土壤中有机污染物的土壤修复技术。生态环境部2023年2月发布的《污染土壤修复工程技术规范 生物堆（HJ1283-2023）》及其编制说明，对生物堆修复有机污染土壤的适用范围有详细描述。生物堆也可采用通风和营养物质强化，加速生物反应。另一种异位土壤修复技术为生物反应器，将污染土壤置于反应器中，与适量水、养分及药剂混合，并接种必要的好氧微生物，通过搅拌强化生物反应，加速土壤中有机污染物降解的土壤修复技术。相比生物堆，生物反应器易于操作，强化手段更多，目前常用的生物反应器为泥浆反应器。在泥浆反应器中，土壤为流化状态，加入的外源微生物、营养物质、表面活性剂及其他强化药剂易于混合均匀，且污染物易于被微生物捕获，土壤修复周期大幅缩短。

本指南给出的多环芳烃污染土壤异位强化生物修复技术分别基于生物堆技术和生物反应器技术，采用化学氧化预处理，结合外源微生物、营养物质、表面活性剂及药剂强化。

### 6.5.2 工艺适用条件

化学氧化协同生物堆工艺适用于有机质含量较高的壤土、黏土等，土壤pH在7左右为宜。主要是因为外源物质加入生物堆很难快速混合均匀，否则混合工段能耗较高，故如果土壤中本身有机质含量较高的壤土和粘土，不需要或只需要

---

添加少量外援营养物质。另外，如果土壤 pH 显著偏离 6-9，不利于微生物生长，需要调节土壤 pH，生物堆 pH 调节相对比较困难，故 pH 在 7 左右的土壤更适合生物堆技术。

化学氧化协同泥浆生物反应工艺适用于瓦砾等非土壤组分含量较高的沙土、杂填土等，对土壤 pH 无要求。如果土壤中砖头瓦块等非土物质的含量高，采用湿筛分可以大幅减量化污染土壤，减少泥浆负荷，节省处理成本。泥浆较方便调节 pH，故泥浆生物反应器对初始土壤 pH 无要求。

### 6.5.3 工艺流程

#### (1) 化学氧化协同生物堆工艺流程

生物堆中的土壤没有流动性，其中的污染物依靠微生物生长渗透降解，故修复周期较长。即使进行接种外源微生物，添加营养物质并强化通风，微生物对污染物的降解仍受到传质限制，反应时间仍较长。通过前置的化学氧化强化，可以破坏土壤结构及氧化降解部分有机物，包括对微生物有毒害作用的有机污染物，降低土壤的生物毒性，接种多种外源微生物，通过通风和营养物质强化，有效缩短土壤修复周期。

该工艺主要流程：污染土壤挖方后，送入预处理单元进行化学氧化、完成氧化目标后，送入生物堆单元，接种微生物，并加入适量加水、营养物质，进行好氧生物处理，产生的废气和废液进行必要的回用后，无害化处理达标排放。

土壤修复受土壤质地、污染特征、修复目标、修复周期、周边环境敏感点、能源供给条件影响，各单元工艺参数应通过调研、小试、中试结果确定。

#### (2) 化学氧化协同泥浆生物反应工艺流程

生物反应器中的土壤也可以是固态的，但为了增强污染物传质效果，常将土壤与足量水混合制成流化态泥浆，可通过湿筛分去除不含有机污染物的砾石，减少后续处理量。由于泥浆是流化状态，可以通过投加表面活性剂，将有机污染物萃取到水相，便于微生物捕获降解。通过前置的化学氧化强化，可以解离与土壤胶粒及土壤有机质结合的污染物，特别是高环的多环芳烃与土壤结合牢固，化学氧化可以将其解离并部分降解，在表面活性剂作用下进入水相，能够充分与接种的微生物作用，提高降解效率，缩短修复周期。

---

该工艺主要流程：污染土壤挖方后，加水制浆筛分，去除不含污染物的砾石，送入预处理单元进行化学氧化，完成氧化目标后，送入生物反应器，接种微生物，并加入适量营养物质，在保温增氧作用下，加速多环芳烃降解，产生的废气和废液进行必要的回用后，无害化处理达标排放。

土壤质地会影响制浆，但对后续的化学氧化及生物降解无明显影响，考虑的因素组要是修复成本。

#### 6.5.4 工艺参数

化学氧化所用氧化剂可选用双氧水及其活化剂、臭氧及其催化剂、过硫酸盐及其活化剂、高锰酸钾及其他氧化剂。综合考虑成本和残留，优先选择双氧水。为确保残留氧化剂不影响后续微生物活性，在接种微生物前土壤（或泥浆）的氧化还原电位应降到适宜值。

一般焦化污染土壤土著微生物对多环芳烃降解能力较弱，加之采用了前置化学氧化，生物反应阶段需要接种外源微生物，根据工程实践发现，混合微生物接种效果优于单一菌种。生物反应需要适宜温度，在冬天开展土壤修复时，需要做好保温工作，保持微生物最佳活性。

土壤修复过程中产生的工艺废水、废气，应考虑回用，减少二次污染处理成本。

具体的工艺参数在指南中做了推荐。

#### 6.8.5 工艺参数监测指标

由于工艺工程为连续操作，工艺指标需要及时反馈，故优先选用在线监测设备，包括在线 ORP 分析仪、氧气分析仪、温度、湿度传感器等实时监测土壤（或泥浆）氧化还原电位、氧气浓度、温度和湿度，这些指标能反映工艺运行状况。利用监测系统与控制系统耦合，确保工艺设备正常运行。

土壤中的多环芳烃含量目前无法做到实时监测，可采用定期抽检的方式，检测修复前后土壤中多环芳烃含量。

仪器设备的配置要满足工艺参数检测要求。

---

### 6.5.6 过程控制

过程控制涉及到仪器仪表控制及工艺设备控制，仪器仪表监测数据尽可能与工艺设备耦合，做到监测和控制合二为一，提供自动化水平。

控制系统可根据成本及实际需要，采用中控室集中控制系统或分站就地控制系统均可。

## 6.6 二次污染防治

土壤修复过程中的废水、废气及噪声排放需要满足国家相关标准，有行业标准或地方标准的，还需要遵照执行。

## 6.7 修复效果评估

修复效果评估涉及到化学氧化预处理工段及生物处理工段的效果评估，故至少需要采集 3 个节点土壤测定其多环芳烃含量：原土、化学氧化后的土壤、生物处理后的土壤。由于土壤中污染物含量变异性较大，每个节点的土壤至少采集 3 个平行样，测定后的有效平均值代表该节点土壤中多环芳烃含量。

目前土壤中多环芳烃的测定方法有两种：土壤和沉积物 多环芳烃的测定 高效液相色谱法（HJ 784-2016）、土壤和沉积物 多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法（HJ 805-2016），前处理都是一致的，区别在于检测仪器不同。两种方法可任选一种，但需要注意的是两种方法的系统误差不一致，不能交替使用。

# 7 环境、社会及经济效益

## 7.1 环境与社会效益

焦化污染场地一般为建设用地，其用途包括住宅用地，商业用地、工业用地等，与人密切接触。土壤中的多环芳烃可通过直接与人接触、挥发或以扬尘方式进入大气被人体摄入、下渗进入地下水或进入地表水被人体摄入，危害人体健康。焦化污染场地多环芳烃生物强化修复，可有效解决土壤多环芳烃污染，保障土壤安全，保护人民身体健康，具有重要环境和社会效益。

---

## 7.2 经济效益

焦化污染场地多环芳烃生物强化修复适用于低浓度多环芳烃污染土壤修复，根据工程实践，每吨污染土壤的修复成本不高于 380 元、电耗不高于 50kW·h，本指南的推广可加速科研成果向工程应用的转化，更好地指导焦化污染场多环芳烃污染土壤生物强化修复，节省修复企业运行成本，促进环保产业健康、可持续发展。