

# 团 体 标 准

T/GDSES 9.4—2023

## 污染地块安全利用保障技术 第 4 部分：复合污染地块绿色高效修复技术集 成指南

Guarantee technologies for contaminated site safe  
utilization  
Part 4: Guideline of green-efficient remediation  
technology integration for combined contaminated site

2023 - 11 - 17 发布

2023 - 11 - 17 实施

广东省环境科学学会标准

## 目 录

前言 .....	II
引言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 基本原则与工作程序 .....	3
5 修复技术集成必要性的判断 .....	4
6 需要集成的绿色高效修复技术的筛选 .....	5
7 复合污染地块高效绿色修复技术的集成 .....	6
8 复合污染地块修复技术集成方案的编制 .....	6
附录 A（资料性） 污染地块高效绿色修复技术筛查矩阵 .....	7
附录 B（资料性） 污染地块单一绿色高效修复技术效果可达性评估和修复技术集成必要性判断模板 .....	8
附录 C（资料性） 复合污染地块绿色高效修复技术优化集成评估要点 .....	10
附录 D（资料性） 复合污染地块绿色高效修复技术常见的完善方案 .....	15
附录 E（资料性） 复合污染地块绿色高效修复技术集成方案编制大纲 .....	17

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

《污染地块安全利用保障技术》系列标准围绕污染地块安全利用保障技术的不同方面提出了技术要求。本文件为第4部分，规定了复合污染地块高效绿色修复技术集成的技术要求。

《污染地块安全利用保障技术》系列七项标准已经发布以下部分：

- 第1部分：地块土壤和地下水中污染物安全阈值
- 第2部分：污染地块安全等级划分技术指南
- 第3部分：污染地块安全利用划分标准
- 第4部分：复合污染地块高效绿色修复技术集成指南
- 第5部分：复合污染地块修复技术应用指南
- 第6部分：修复后地块再开发利用土壤环境状况调查技术规范
- 第7部分：修复后地块再开发利用风险评估技术规范

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中山大学提出。

本文件由广东省环境科学学会提出并归口。

本文件起草单位：中山大学、生态环境部华南环境科学研究所、中科鼎实环境工程有限公司、南方科技大学、香港科技大学、澳门科技大学、广东省环境科学学会。

本文件主要起草人：章卫华、劳敏慈、刘崇炫、吴颖欣、周广东、张文、赵楠、陈景豪、李荣、初文磊、李瑛、陈桂红、严辉、许佳炫。

本文件首次制定。

## 引 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国土壤污染防治法》，推动落实《粤港澳大湾区规划纲要》，推进生态文明建设，保护生态环境，保障公众健康，指导污染地块风险管控和修复，引导建设用地修复产业的良性发展，制定本文件。

《污染地块安全利用保障技术》系列标准围绕污染地块安全利用保障技术的不同方面提出了技术要求，由七个部分构成：

- 第1部分：地块土壤和地下水中污染物安全阈值。规定了地块土壤和地下水中污染物安全阈值；
- 第2部分：污染地块安全等级划分技术指南。规定了污染地块安全等级划分的技术要求，可用于评估污染地块的安全等级；
- 第3部分：污染地块安全利用划分标准。规定了污染地块安全利用划分标准，用于指导污染地块修复实现安全利用；
- 第4部分：复合污染地块高效绿色修复技术集成指南。规定了复合污染地块高效绿色修复技术集成的技术要求；
- 第5部分：复合污染地块修复技术应用指南。规定了复合污染地块修复方案编制和修复工程建设、运行与效果评估的技术要求；
- 第6部分：修复后地块再开发利用土壤环境状况调查技术规范。规定了修复后地块再开发利用土壤环境状况调查的技术要求；
- 第7部分：修复后地块再开发利用风险评估技术规范。规定了修复后地块再开发利用风险评估的技术要求。

广东省环境科学学会标准

# 复合污染地块绿色高效修复技术集成指南

## 1 范围

本文件规定了复合污染地块绿色高效修复技术集成的基本原则、工作程序、修复技术集成必要性的判断、修复技术的筛选、修复技术的集成和集成方案的编制等内容。

本文件适用于粤港澳大湾区（以下简称“大湾区”）复合污染地块绿色高效修复技术集成的方案设计、实施和日常管理和监督评估工作。

本文件不适用于放射性污染和致病性生物污染的地块修复。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

HJ 682 建设用地土壤污染风险管控和修复术语

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1

**复合污染** combined contamination

指2种或2种以上不同种类不同性质的污染物在土壤或地下水中共同作用造成污染的现象。1种污染物在土壤和地下水中同时存在并造成污染的现象，在本文件中也被认为是复合污染。按污染物种类可分为重金属复合污染、重金属—有机污染物复合污染、有机污染物复合污染和重金属—无机污染物（比如氰化物、氟化物）复合污染；按污染物所处的环境介质可分为土壤复合污染、地下水复合污染和土壤—地下水复合污染。

### 3.2

**土壤修复** soil remediation

采用物理、化学或生物的方法转移、吸收、降解或转化地块土壤中的污染物，使其含量降低到可接受水平，或将有毒有害的污染物转化为无害物质的过程。

[来源：HJ 682—2019，2.5.2，有修改]

### 3.3

**土壤风险管控** soil risk control

采取非减量化修复技术、工程控制和制度控制措施等，阻断土壤污染物暴露途径，阻止土壤污染扩散、防止对周边人体健康和生态受体产生影响的过程，一般包括：固化/稳定化、封顶、阻隔填

埋等管控措施。为行文方便，这些土壤风险管控技术也被包含在本文件中提及的土壤修复技术的范畴中。

[来源：HJ 25.6—2019，3.3，有修改]

### 3.4

#### 地下水修复 groundwater remediation

采用物理、化学或生物的方法，降解、吸附、转移或阻隔地块地下水中的污染物，将有毒有害的污染物转化为无害物质，或使其浓度降低到可接受水平，或阻断其暴露途径，满足相应的地下水环境功能或使用功能的过程。

[来源：HJ 25.6—2019，3.2]

### 3.5

#### 地下水风险管控 groundwater risk control

采取修复技术、工程控制和制度控制措施等，阻断地下水污染物暴露途径，阻止地下水污染扩散，防止对周边人体健康和生态受体产生影响的过程。为行文方便，这些地下水风险管控技术也被包含在地下水修复技术的范畴中。

[来源：HJ 25.6—2019，3.3，有修改]

### 3.6

#### 目标污染物 target contaminant

在地块环境中其数量或浓度已达到对生态系统和人体健康具有实际或潜在不利影响的，需要进行修复的关注污染物。

[来源：HJ 682—2019，2.2.2]

### 3.7

#### 土壤修复目标 soil remediation goal

地块环境调查或风险评估确定的目标污染物对人体健康和生态受体不产生直接或潜在危害，或不具有环境风险的土壤修复终点。

[来源：HJ 25.6—2019，3.6，有修改]

### 3.8

#### 土壤风险管控目标 soil risk control goal

阻断土壤中污染物暴露途径，阻止污染扩散，防止对人体健康和生态受体产生影响的阶段目标。

[来源：HJ 25.6—2019，3.7，有修改]

### 3.9

#### 地下水修复目标 groundwater remediation goal

由地块环境调查或风险评估确定的目标污染物对人体健康和生态受体不产生直接或潜在危害，或不具有环境风险的地下水修复终点。

[来源：HJ 25.6—2019，3.6]

### 3.10

#### 地下水风险管控目标 groundwater risk control goal

阻断地下水污染物暴露途径，阻止地下水污染扩散，防止对人体健康和生态受体产生影响的阶



段目标。

[来源: HJ 25.6—2019, 3.7]

### 3.11

#### 绿色高效修复 green-efficient remediation

基于绿色修复理念,经技术比选、集成,形成最优技术方案,实施后达到土壤污染风险管控和修复目标,修复过程能源、资源节约,修复效果好、周期短,实现环境效益最大化与碳排放最小化。

## 4 基本原则与工作程序

### 4.1 基本原则

#### 4.1.1 科学性原则

采用科学的方法,综合考虑地块修复目标、修复技术的效果、土壤修复技术之间的相互影响、修复时间、修复成本、修复工程的环境影响等因素,进行修复技术集成。

#### 4.1.2 可行性原则

合理进行修复技术集成,因地制宜制定修复技术集成方案,使所采用的技术或技术集成可以达到修复目标或风险管控目标,且修复工程切实可行。

#### 4.1.3 安全性原则

制定地块土壤修复技术集成方案要确保地块修复工程实施安全,防止对施工人员、周边人群健康以及生态环境产生危害和二次污染。

#### 4.1.4 绿色高效原则

复合污染地块修复技术集成要基于绿色、高效的原则。修复技术的集成,需要在满足修复和安全要求的同时,最小化环境足迹,最大化环境、社会、经济效益。

#### 4.1.5 经济性原则

复合污染地块修复技术集成满足以上科学、可行、安全和绿色高效的前提下,尽最大可能降低修复的经济成本。

### 4.2 工作程序

#### 4.2.1 复合污染地块修复技术集成必要性的判断

根据污染地块风险评估报告中确定的目标污染物和修复目标进行初步的修复技术集成必要性判断。

#### 4.2.2 复合污染地块需要集成的绿色高效修复技术的筛选

根据污染地块风险评估报告中确定的目标污染物和修复目标,以及该地块的水文地质条件,明确单一修复技术与修复目标间的差距。为了达到修复要求,可能用到的修复技术经比选后,即为需要集成的单一修复技术或者风险管控技术。

#### 4.2.3 复合污染地块绿色高效修复技术的集成

根据单一修复技术类型,通过文献调研、实验室小试和现场中试,研究潜在的绿色高效修复技

术之间的相互影响，确定两种或以上修复技术集成实施的技术要求，包括：多种修复技术实施的风险分析、多种修复技术实施的次序、多种修复技术实施时的衔接、多种修复技术相互负面影响的补偿措施、集成技术使用限制要求等，从而确定修复技术集成方案。

工作程序如图 1 所示。

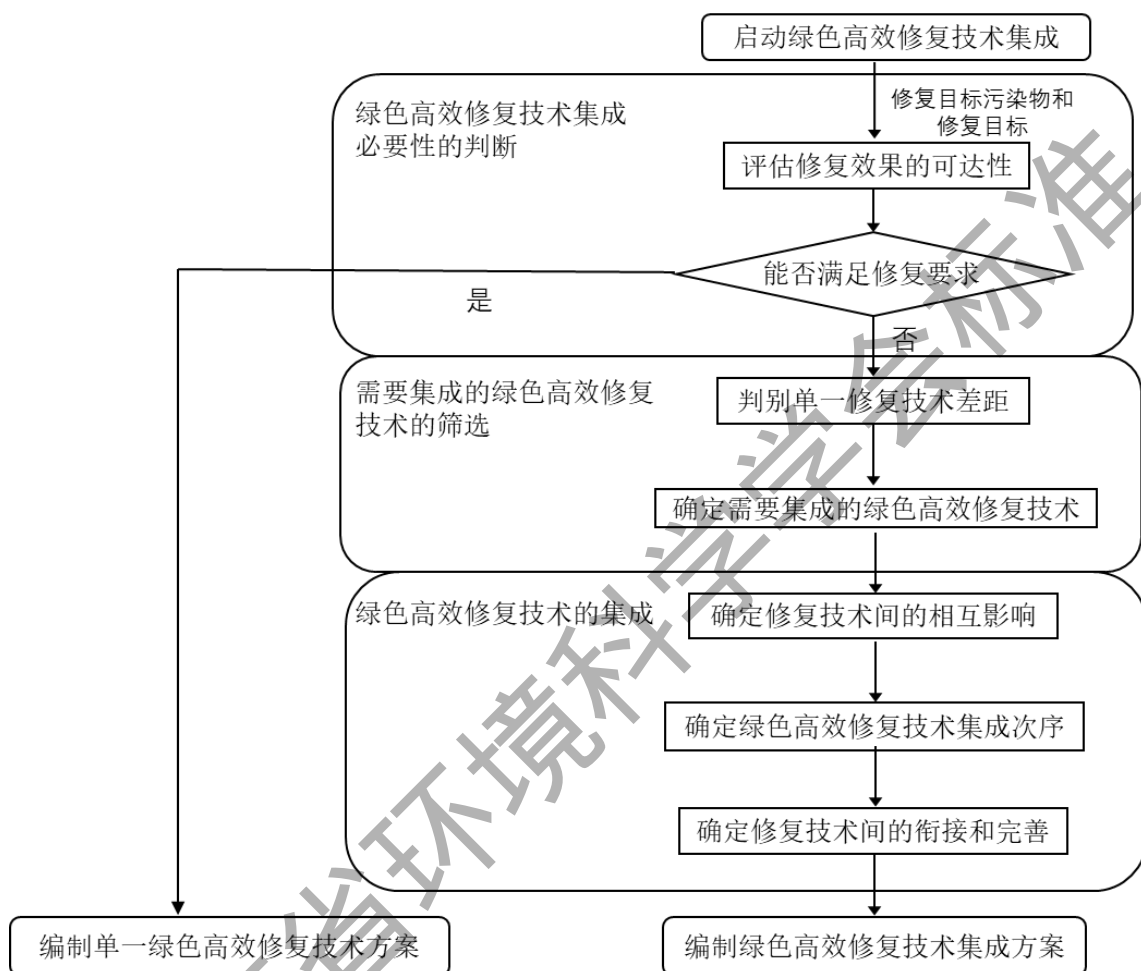


图 1 复合污染地块高效绿色修复技术集成工作程序

## 5 修复技术集成必要性的判断

### 5.1 评估复合污染地块单一绿色高效修复技术效果的可达性

根据风险评估报告确定的修复目标污染物和目标污染物的修复要求，结合当地的水文地质条件，进行单一绿色高效修复技术效果可达性评估。绿色高效修复技术效果可达性评估的方法包括但不限于案例分析、实验室小试、现场中试或模型模拟中的一种或者几种。

#### 5.1.1 案例分析

土壤修复技术可行性评估，可根据对已有的修复技术应用案例进行分析、比较来确定。选择的案例，其污染程度和土壤类型，应与拟修复的污染地块相同或类似。同时，优先选择在大湾区污染地块上的应用案例，必要时可现场考察和评估应用案例的实际工程。对于原位修复技术，要考虑案例地块和拟修复的复合污染地块的水文地质条件的相似性。

### 5.1.2 实验室小试

实验室小试要采集复合污染地块的典型污染土壤进行试验，在综合考虑修复效果、成本、能耗和低碳的基础上，实验可行的修复技术的关键参数，并验证修复效果。关键参数包括但不限于修复药剂投加量及比例、修复时间、处理条件（温度、物料含水率、粒径大小）、修复效果等。

### 5.1.3 现场中试

针对原位的修复技术，或者对土壤水文地质条件影响显著的异位土壤修复技术的适用性不确定，则应在复合污染地块中开展现场中试，进一步验证修复技术的实际效果。同时考虑工程管理和二次污染防治等。中试试验应尽量兼顾地块中不同区域、不同污染浓度和不同土壤类型，获得土壤修复工程设计所需要的参数。

中试获得的工艺参数包括但不限于修复药剂投加量及比例、设备影响半径和处理能力、注入井的布设点位和布设方式、修复时间、处理条件（温度、物料含水率、粒径大小等）、修复效果、设备占地面积及作业区范围等。

### 5.1.4 模型模拟

土壤修复技术可行性评估也可以借助数值模拟来进行，主要的模拟输入参数通过收集地块已有资料和现场考察地块状况获得。必要时开展补充监测，获得必需的污染状况和水文地质等参数。

## 5.2 判断修复技术集成必要性

### 5.2.1 判断方法

根据污染场地特征，进行单一绿色高效修复技术的修复效果可达性评估，判断单一绿色高效修复技术能否满足修复要求，从而确定修复技术集成的必要性。

### 5.2.2 必要性判断的原则

复合污染地块进行高效绿色修复技术集成的必要性判断原则，包括但不限于：

- a) 单一绿色高效修复技术无法满足多个目标污染物的修复目标（具体见附录 A，绿色高效修复技术筛选矩阵）；
- b) 单一绿色高效修复技术无法一次满足特定污染物的修复目标；
- c) 单一绿色高效修复技术可以基本满足特定污染物的修复目标，但是无法满足修复成本、能耗、低碳、时效等要求；
- d) 单一绿色高效修复技术可满足单一介质修复目标，但地块需要针对两种介质进行修复；
- e) 单一绿色高效修复技术效果可达性评估和修复技术集成必要性判断可参考附录 B。

## 6 需要集成的绿色高效修复技术的筛选

### 6.1 判别复合污染地块单一绿色高效修复技术差距

在 5.1 的基础上，对照地块修复目标污染物和目标污染物修复要求，以及水文地质条件、修复时的二次污染、成本、能耗、碳排放要求等，从而获得单一修复技术的差距。该差距可以分为：一种技术无法修复多个目标污染物，或者一种技术无法满足特定污染物的修复目标，或者修复过程未能满足低碳低能耗目标等。

### 6.2 筛选需要集成的修复技术

根据单一绿色高效修复技术差距的判别结果，筛选出需要进行集成的修复技术。包括但不限于：多种技术针对不同目标污染物，或者多个技术针对同一目标污染物；或者多种技术分别针对土壤和

地下水中的目标污染物。

## 7 复合污染地块高效绿色修复技术的集成

### 7.1 评估污染地块需要集成的修复技术之间的相互影响

通过文献调查、案例分析、实验室小试和中试、模型模拟，确定集成的修复技术之间的相互影响。其中，包括一种修复技术改变了土壤中目标污染物的形态，从而影响了另外一种目标污染物的修复效果；或者一种修复技术对修复后土壤性质的改变，影响另一种修复技术的修复效果，或影响另一种修复技术的目标污染物的存在形态；或者一种修复技术改变了土壤中目标污染物的形态和土壤性质，从而影响另一种修复技术的修复效果。优化集成评估要点见附录 C。

### 7.2 确定复合污染地块修复技术的集成次序

根据修复技术之间的相互影响，基于最大限度满足修复和安全要求，以及降低成本、能耗、有毒中间产物污染等的原则，通过案例分析、实验室小试、现场中试、模型模拟等，确定集成修复技术之间的集成次序。

### 7.3 确定复合污染地块修复技术间的衔接和完善

根据修复技术之间的相互影响和作用机理，以及确定的修复技术集成次序，对修复技术间的衔接和补充进行设计，并通过案例分析、模型模拟、实验室小试、现场中试等确定最后的衔接和完善方案。常见的完善方案见附录 D。

## 8 复合污染地块修复技术集成方案的编制

### 8.1 总体要求

修复技术集成方案要全面和准确地反映出全部工作内容。报告中的文字应简洁和准确，并尽量采用图、表和照片等形式描述各种关键技术信息，以利于后续修复工程的设计与施工。

### 8.2 编制大纲

根据确定的修复技术集成次序以及修复技术间的衔接和完善方案，编制修复技术集成方案。修复技术集成方案编制大纲如附录 E。

附录 A  
(资料性)  
污染地块高效绿色修复技术筛查矩阵

表 A.1 污染地块高效绿色修复技术筛查矩阵

修复技术	挥发性有机物	半挥发性有机物	阳离子重金属	阴离子重金属或类金属	汞	备注
阻隔—填埋	○	◎	●	●	○	
水泥窑协同处置	●	◎	●	●	○	不适用于砷、铊、铅等污染土壤染较重的土壤
固化 / 稳定化	○	○	●	●	◎	阴阳离子重金属/类金属稳定/固化剂相互拮抗
土壤气相抽提	●	◎	○	○	●	
土壤淋洗	◎	◎	●	●	○	阴阳离子重金属/类金属淋洗剂相互拮抗
热脱附	●	●	○	○	●	
常温解析	●	◎	○	○	●	
化学氧化/还原	◎	◎	○	◎	○	
生物通风	●	◎	○	○	◎	
生物堆	●	◎	○	○	○	
植物修复	●	●	●	●	●	修复周期较长
强化生物修复	●	●	○	○	○	
监测自然衰减	◎	◎	◎	◎	◎	修复周期较长
强化监测自然衰减	●	●	◎	●	◎	修复周期较长

注：●表示非常适用或性能较好；◎表示较为适用或性能中等；○表示较为不适用或性能低；▽表示适用性或者性能不明确，需要进一步确定。

附录 B  
(资料性)

污染地块单一绿色高效修复技术效果可达性评估和修复技术集成必要性判断模板

地块名称：\_\_\_\_\_ 地块地址：\_\_\_\_\_

地块需要修复污染物（土壤）：\_\_\_\_\_ 修复目标（浓度/可迁移性/毒性）：\_\_\_\_\_ 平均消减率：\_\_\_\_\_

预计土方量：\_\_\_\_\_

地块需要修复污染物（地下水）：\_\_\_\_\_ 修复目标（浓度/可迁移性/毒性）：\_\_\_\_\_ 平均消减率：\_\_\_\_\_

预计处理量：\_\_\_\_\_

修复周期要求：\_\_\_\_\_ 修复费用要求：\_\_\_\_\_ 原位或者异位：\_\_\_\_\_

修复能耗（碳排放）要求：\_\_\_\_\_

单一绿色高效修复技术预筛选（可通过案例分析、实验室小试、现场中试、模型模拟）

修复技术	挥发性有机物	半挥发性有机物	阳离子重金属	阴离子重或类金属	汞	在大湾区操作性	经济成本	时间	污染物浓度或可迁移性消减率	二次污染	能耗	备注	本地块可行性	本地块消除的污染物	评估方法	评估参考案例或者实验或模拟主要参数
阻隔一填埋	○	◎	●	●	○	好	低	短	高	低	低	异位				
水泥窑协同处置	●	◎	●	●	○	好	低	短	高	低	低	异位				
固化/稳定化	○	○	●	●	◎	好	中	短	高	低	低	原位或者异位；阴阳离子重金属/类金属稳定/固化剂相互拮抗				
土壤气相抽提	●	◎	○	○	●	中	低	中	中	中	低	原位				
土壤淋洗	◎	◎	●	●	○	中	中	短	中	低	中	阴阳离子重金属/类金属淋洗剂相互拮抗				

热脱附	●	●	○	○	●	好	中	短	高	低	高	分为原位和异位			
常温解析	●	◎	○	○	●	好	低	短	中	低	低	异位			
化学氧化/还原	◎	◎	○	◎	○	好	中	短	中	低	低	原位或者异位			
生物通风	●	◎	○	○	◎	好	低	中	中	中	低	原位			
生物堆	●	◎	○	○	○	好	低	中	高	低	低	异位			
植物修复	●	●	●	●	●	好	低	长	低	低	低	原位			
强化生物修复	●	●	○	○	○	中	低	长	中	低	低	原位			
监测自然衰减	◎	◎	◎	◎	◎	差	低	长	低	低	低	原位			
强化监测自然衰减	●	●	◎	●	◎	差	低	长	中	低	低	原位			

注：●表示非常适用或性能较好；◎表示较为适用或性能中等；○表示不适用或效果较差；▽表示待定，其效果取决于具体参数。

## 初步结论：

- A. 该地块可以通过单一绿色高效修复技术\_\_\_\_\_，实现地块的所有修复目标。
- B. 该地块无法通过一种技术修复多个目标污染物。需要采用\_\_\_\_\_修复技术，实现土壤/地下水中目标污染物\_\_\_\_\_的修复目标；需要\_\_\_\_\_修复技术，实现土壤/地下水中目标污染物\_\_\_\_\_的修复目标；需要\_\_\_\_\_修复技术，实现土壤/地下水中目标污染物\_\_\_\_\_的修复目标。
- C. 在该地块中无法使用一种技术一次满足特定污染物的修复目标。可能需要\_\_\_\_\_修复技术和\_\_\_\_\_修复技术的组合，来实现土壤/地下水中目标污染物\_\_\_\_\_的修复目标。

## 附录 C (资料性)

### 复合污染地块绿色高效修复技术优化集成评估要点

#### C.1 有机污染物和重金属复合污染地块

##### C.1.1 前置异位热脱附+后置异位固化/稳定化

该场景将开挖后的有机污染物和重金属复合污染土壤先进行异位热脱附，然后将固化/稳定化药剂添加到冷却的热脱附后的污染土壤中。



注：标注的序号对应下面的评估要点，下同。

图 C.1 前置异位热脱附+后置异位固化/稳定化流程

评估要点：

- 热脱附脱水前处理对固化/稳定化的影响（比如，生石灰脱水前处理，常有利于后续阳离子重金属的固化/稳定化）；
- 热脱附高温对残留的污染物的形态以及固化/稳定化的影响（比如，热脱附，常增加砷和阳离子重金属的渗出性）；
- 热脱附后土壤余热对后续固化/稳定化的影响（比如，余热有利于提高后续固化/稳定化的效率）。

##### C.1.2 前置异位稳定化+后置异位热脱附

该场景将稳定化药剂加到开挖后的有机污染物和重金属复合污染土壤中，然后进行异位热脱附。

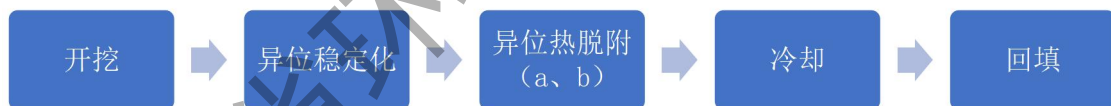


图 C.2 前置异位稳定化+后置异位热脱附

评估要点：

- 高温对前置稳定化效果的影响（特别关注砷、铅等挥发性重金属/类金属，热脱附会降低其稳定化效果）；
- 稳定剂的添加对热脱附成本和能耗的影响（不适合汞、铊等污染土壤）。

##### C.1.3 前置异位热脱附+后置土壤淋洗技术

该场景将开挖后的有机污染物和重金属复合污染土壤先进行异位热脱附，然后将冷却的热脱附土壤进行异位淋洗。



图 C.3 前置异位热脱附+后置土壤淋洗技术

评估要点：



- 脱附脱水前处理对土壤淋洗的效果（比如，热脱附生石灰脱水前处理，有利于阴离子重金属类金属，比如砷的淋洗；但是不利于阳离子重金属的淋洗）；
- 热脱附高温对残留的污染物的形态以及土壤淋洗效果的影响（比如，热脱附常常有利于土壤的重金属和砷的淋洗）；
- 土壤淋洗后置导致热脱附的能耗和成本的变化（比如，土壤淋洗后置，常常导致热脱附的土方量相对较大）；
- 热脱附后土壤余热对后续土壤淋洗操作的影响（比如，余热可能有利于提高土壤淋洗效率）。

#### C.1.4 前置土壤淋洗+后置异位热脱附技术

该场景将开挖后的有机和重金属复合污染土壤先进行土壤淋洗，然后进行异位热脱附（热解析）。



图 C.4 前置土壤淋洗+后置异位热脱附技术

评估要点：

- 淋洗过程对有机污染物的去除；
- 淋洗的分离过程对异位热脱附土方的减量化；
- 残留的淋洗剂对热脱附前处理的影响（残留的淋洗剂可能增加热脱附的前处理量）；
- 残留的淋洗剂对热脱附处理的影响；
- 热脱附对残留重金属移动性的影响（热脱附处理常降低淋洗后重金属的移动性）。

#### C.1.5 （原位或者异位）前置化学氧化/还原+后置固化/稳定化

该场景将有机污染物和重金属复合污染土壤先进行化学氧化/还原，然后进行固化/稳定化，特别适合于有机污染物和铬、砷复合污染土壤。



图 C.5 前置化学氧化/还原+后置固化/稳定化流程

评估要点：

- 残留的化学氧化/还原剂对固化/稳定化的效果（某些氧化剂，比如双氧水可能降低阳离子重金属的固化/稳定化的效果；比如碱活化过硫酸盐氧化，可能提高阳离子重金属的固化/稳定化的效果）；
- 化学氧化/还原过程对残留的污染物的形态及其固化/稳定化的影响（化学氧化过程，可增加阳离子重金属和铬的移动性，降低固化/稳定化的效果；但可降低土壤砷的移动性，提高其固化/稳定化效果）。

#### C.1.6 （原位或异位）前置稳定化+后置化学氧化/还原

该场景将有机和重金属复合污染土壤先进行稳定化，然后进行化学氧化/还原，不适合含有铬、砷等污染土壤。



图 C.6 前置稳定化+后置化学氧化/还原

评估要点：

- 稳定剂的添加对化学氧化/还原效果的影响（重金属阳离子某些碱性稳定剂，可能降低某些化学氧化比如双氧水的效果；也可能活化过硫酸盐提高氧化效率）；
- 残留的化学氧化/还原剂对稳定化的效果（某些化学氧化后残留的酸性双氧水，可能降低重金属阳离子的稳定化效果）；
- 化学氧化/还原过程对残留的污染物的形态以及稳定化的影响（化学氧化过程，可能增加阳离子重金属和铬的移动性，降低稳定化的效果；但也可降低土壤类金属砷的移动性，提高其稳定化效果）。

### C.1.7 同时（原位或异位）稳定化+化学氧化/还原

该场景将稳定化试剂和化学氧化/还原试剂，同时加入有机污染物和重金属复合污染土壤，同时进行稳定化和化学氧化/还原。

稳定化+化学氧化/还原（a、b、c）

图 C.7 同时稳定化和化学氧化/还原

评估要点：

- 稳定剂的添加对化学氧化/还原效果的影响（重金属阳离子某些碱性/稳定剂，可能降低某些化学氧化比如双氧水的效果；也可能活化过硫酸盐提高氧化效率）；
- 残留的化学氧化/还原剂对稳定化的效果（某些化学氧化后残留的酸性双氧水，可能降低重金属阳离子的稳定化效果）；
- 化学氧化/还原过程对残留的污染物的形态以及稳定化的影响（化学氧化过程，可能增加阳离子重金属和铬的移动性，降低稳定化的效果；但也可降低土壤类金属砷的移动性，提高其稳定化效果）。

## C.2 重金属复合污染地块的修复技术集成

### C.2.1 前置土壤淋洗+后置固化/稳定化

该场景适合于修复目标对重金属总量和移动性都有要求的重金属复合污染地块。



图 C.8 前置土壤淋洗+后置固化/稳定化

评估要点：

- 残留的淋洗剂对固化/稳定化效果的影响（残留的淋洗剂一般都会降低重金属的固化/稳定化的效果）；
- 淋洗过程对土壤中残留重金属的形态的影响（淋洗过程，会提升土壤中残留重金属的移动性）。

### C.2.2 （原位或异位）固化/稳定化+监测自然衰减分区修复

该场景适合于存在不同的暴露风险的重金属复合污染地块。

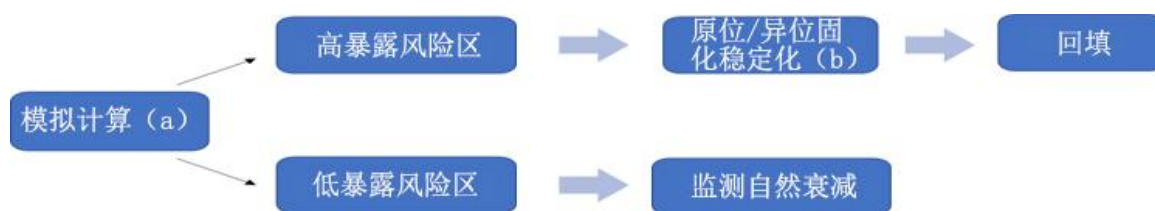


图 C.9 (原位或异位) 固化/稳定化+监测自然衰减分区修复

评估要点:

- 根据修复强化需求合理确定固化/稳定化和监控自然衰减分区;
- 固化/稳定化效果对监测自然衰减效果的影响。

### C.3 有机污染物复合污染地块修复技术集成

#### C.3.1 化学氧化/还原+强化生物修复

该场景适合于难生物降解的有机污染物复合污染地块, 先进行化学氧化/还原提高有机污染物的可生物降解性。



图 C.10 前置原位化学氧化/还原+后置原位强化生物修复

评估要点:

- 残留的化学氧化/还原剂对环境条件和降解微生物的影响 (某些氧化剂, 比如双氧水的强酸性, 可能降低降解微生物对有机污染物的降解效率);
- 原位化学氧化/还原对残留的有机污染物的生物可利用性的影响 (比如铁还原过程, 可能提高残留的有机污染物的生物可利用性, 提高其微生物降解效率)。

#### C.3.2 强化生物修复+原位氧化/还原



图 C.11 前置强化生物修复+原位氧化/还原

评估要点:

- 强化生物修复过程改变当地环境条件, 对原位氧化/还原效率的影响 (比如 DO 的提高, 可能降低后续的化学还原效率);
- 强化生物修复后产生的降解产物, 对原位化学氧化/还原效率的影响。

### C.4 土壤和地下水复合污染地块协同修复

#### C.4.1 土壤和地下水复合污染地块的化学氧化/还原

该场景适合于土壤和地下水中存在不同类型的污染物, 比如土壤有机物污染和地下水的砷污染。

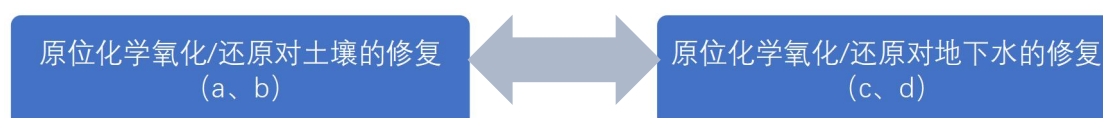


图 C.12 污染地块化学氧化/还原对土壤和地下水的协同修复

评估要点：

- a) 土壤污染物对地下水修复的影响（土壤污染物可能会降低地下水的原位化学氧化/还原修复效率；比如土壤有机污染物存在可能抑制地下水中砷的氧化和稳定）；
- b) 土壤修复产物对地下水修复的影响（土壤修复产物可能降低地下水修复效率）；
- c) 地下水污染物对土壤修复的影响（地下水污染物可能会降低污染土壤的原位化学氧化/还原修复效率）；
- d) 地下水修复产物对土壤修复的影响（地下水的修复产物可能影响土壤修复效率；比如地下水中砷的氧化稳定可能有利于有机污染物的氧化）。

#### C.4.2 复合污染地块土壤异位修复-地下水监测自然衰减

该场景适合于土壤和地下水中存在相同或者不同的污染物。



图 C.13 复合污染地块土壤异位修复-地下水监测自然衰减

评估要点：

- a) 开挖位置及大小对地下水修复的影响（比如，开挖会影响地下水的流速，从而影响地下水修复中的水力停留时间）；
- b) 土壤异位修复效果对地下水修复的影响（比如异位固化/稳定化可能强化监测自然衰减）。

#### C.4.3 有机污染地块的土壤-地下水的强化生物修复技术

该场景适合于土壤和地下水中存在不同的有机污染物。



图 C.14 土壤和地下水的强化生物协调修复

评估要点：

- a) 土壤污染物对地下水修复的影响（土壤污染物的存在可能增加降解微生物的数量，从而提高地下水的微生物降解）；
- b) 土壤污染物降解微生物、产物和环境（DO, Eh 等）对地下水修复的影响；
- c) 地下水污染物对土壤修复的影响；
- d) 地下水污染物降解微生物、产物和环境（DO, Eh 等）对土壤修复的影响。

## 附录 D

(资料性)

## 复合污染地块绿色高效修复技术常见的完善方案

## D.1 热脱附

- D.1.1 保障稳定温度
- D.1.2 延长热脱附的工序时间
- D.1.3 提高脱水前处理的效率

## D.2 常温解析

- D.2.1 延长停留温度
- D.2.2 提高翻抛的频率

## D.3 固化/稳定化

- D.3.1 改用更高效的固化/稳定剂组合
- D.3.2 增加固化稳定剂组合的用量
- D.3.3 采用高温辅助 (部分有效, 依赖于污染物类型和固化/稳定剂的种类)

## D.4 土壤淋洗

- D.4.1 增加淋洗次数
- D.4.2 增加淋洗剂的用量或者改用更高效的淋洗剂
- D.4.3 降低淋洗的固液比
- D.4.4 延长淋洗时间
- D.4.5 提高淋洗温度
- D.4.6 采用超声等手段辅助

## D.5 原位化学氧化/还原

- D.5.1 增加单个井的化学氧化/还原剂的剂量注入量
- D.5.2 增加化学氧化/还原剂注入井的数量或者降低注入井之间的间隔
- D.5.3 改用更高效的化学氧化/还原剂
- D.5.4 采用更有效的化学氧化/还原剂的传输系统 (比如采用气态的试剂或者高速的液体)
- D.5.5 提高反应温度
- D.5.6 采用其他的化学活化方式 (比如在双氧水、过硫酸盐中加入  $\text{Fe}^{2+}$  等)

## D.6 生物通风

- D.6.1 增加注入井的通风量
- D.6.2 提升抽出井的真空度
- D.6.3 注入高效的营养液

## D.7 生物堆

- D.7.1 增加堆腐的温度
- D.7.2 接种更高浓度或者更高效降解微生物
- D.7.3 加入适量的疏松剂
- D.7.4 增加供氧量或者翻耕的频率

D.8 强化生物修复

- D.8.1 增加生物通风量，提高溶解氧
- D.8.2 注入氮、磷等营养盐
- D.8.3 接种更高浓度或者更高效的降解微生物
- D.8.4 提高地块温度
- D.8.5 增加代谢底物（针对共代谢目标污染物）
- D.8.6 注入表面活性剂，提高污染物的生物可利用性

D.9 强化自然监测衰减

- D.9.1 增加氮、磷等营养盐的剂量
- D.9.2 接种单一或者复合降解微生物

广东省环境科学学会标准

## 附录 E

(资料性)

### 复合污染地块绿色高效修复技术集成方案编制大纲

#### 摘要

#### E.1 项目概况

- E.1.1 项目背景
- E.1.2 修复工程概况
- E.1.3 地块概况

#### E.2 工作依据

#### E.3 组织机构及职责

#### E.4 工作程序和方法

#### E.5 绿色高效修复技术集成

- E.5.1 评估复合污染地块单一绿色高效修复技术效果的可达性
- E.5.2 判断修复技术集成必要性
- E.5.3 判别复合污染地块单一绿色高效修复技术差距
- E.5.4 筛选需要集成的修复技术
- E.5.5 评估污染地块需要集成的修复技术之间的相互影响
- E.5.6 确定复合污染地块修复技术的集成次序
- E.5.7 确定复合污染地块修复技术间的衔接和完善

#### E.6 二次污染防治及应急处理方案

- E.6.1 二次污染防治措施方案
- E.6.2 环境监测方案
- E.6.3 环境污染事故应急处理预案

#### E.7 结论及建议

#### E.8 资料附件

---