

# 团 体 标 准

T/GIA 022.3—2023

## 石化污染地块土壤-地下水 原位协同修复技术指南

Technical guideline for in-situ collaborative remediation of contaminated  
soil and groundwater in petrochemical sites

2023-10-20 发布

2024-01-01 实施

中关村中环土壤地下水污染防控与修复产业联盟 发布  
中 国 标 准 出 版 社 出 版

全国团体标准信息平台  
中国标准出版社

## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	IV
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 .....	2
5 工作内容和流程 .....	2
6 协同调查与风险评估 .....	4
7 协同修复方案制定 .....	7
8 工程设计与施工 .....	9
9 工程运行与监测 .....	12
10 修复效果评估 .....	13
11 工程关闭 .....	14
附录 A (资料性) 原位单项修复技术类型及应用情景分析 .....	15
附录 B (资料性) 不同重点场所污染物在不同修复模式下的技术应用 .....	19
附录 C (资料性) 某石化污染地块土壤-地下水协同修复案例 .....	20

全国团体标准信息平台  
中国标准出版社

## 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。

本文件是 T/GIA 022 的第 3 部分。T/GIA 022 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：石化污染地块地下水原位修复技术应用指南；
- 第 2 部分：石化污染地块污染物自然衰减能力评估技术指南；
- 第 3 部分：石化污染地块土壤—地下水原位协同修复技术指南；
- 第 4 部分：石化污染地块地下水原位修复技术效能评估导则。

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。

本文件由中关村中环土壤地下水污染防治与修复产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：中化环境控股有限公司、上海康恒环境修复有限公司、中国科学院大学、中国环境科学研究院、清华大学、中国石油大学(北京)。

本文件主要起草人：曲凤臣、牛麟、王明玉、王湘徽、陈辉霞、姜永海、黄丹、刘春燕、廉新颖、王碧莲、王加华、张莹、张言、刘雷、李丽娟、刘伟、裴超、刘荣琴、贾永锋、李森、郝丽婷、王庆宏、陈春茂。

## 引 言

随着城市化和工业化进程的加快,环境问题日益凸显,生态文明建设成为国家战略,土壤和地下水污染防治日益受到重视。石化产业是国民经济的重要支柱,同时也是环保重点监管行业。针对石化地块可能存在的土壤和地下水污染,选择高效修复治理技术,实现产业绿色发展,是我国石化行业发展急需探讨和解决的关键问题。T/GIA 022 旨在确立适用于石化污染地块地下水修复的技术方法及方法的效能评估,拟由 4 个部分组成:

- 第 1 部分:石化污染地块地下水原位修复技术应用指南。目的在于确立适用于石化污染地块地下水原位修复技术的方法。
- 第 2 部分:石化污染地块污染物自然衰减能力评估技术指南。目的在于规定适用于石化地块污染物在土壤和地下水中自然衰减能力的评估。
- 第 3 部分:石化污染地块土壤—地下水原位协同修复技术指南。目的在于规定石化污染地块土壤—地下水原位协同修复工程实施的技术管理。
- 第 4 部分:石化污染地块地下水原位修复技术效能评估导则。目的在于规定已完成工程应用的石化污染地块地下水原位修复技术或组合技术的效能评估。

# 石化污染地块土壤-地下水 原位协同修复技术指南

## 1 范围

本文件规定了实施石化污染地块土壤-地下水原位协同修复过程中协同调查与风险评估、协同修复方案制定、工程设计与施工、工程运行与监测、修复效果评估、工程关闭等技术要求。

本文件适用于石化污染地块土壤-地下水原位协同修复工程实施的技术管理。

## 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。

GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准

GB/T 14848 地下水质量标准

GB 36600—2018 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行)

HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

地下水环境状况调查评价工作指南(环办土壤函[2019]770号)

建设用地土壤污染修复目标值制定指南(试行)(环办土壤函[2022]488号)

废弃井封井回填技术指南(试行)(环办土壤函[2020]72号)

重点监管单位土壤污染隐患排查指南(试行)(生态环境部公告2021年第1号)

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### 石化污染地块 **petrochemical contamination sites**

从事过石油加工行业的生产、经营、使用、贮存、堆放等活动,造成了土壤和地下水重金属(如镍、锰等)、有机物[如苯、石油烃、多环芳烃,以及非水相液体(NAPL)污染物类等]的单一污染或重金属与有机物的复合污染,对人体健康和生态环境已产生了健康、生态风险或危害的石化地块。

### 3.2

#### 土壤-地下水原位协同修复 **in-situ collaborative remediation of contaminated soil and groundwater**

在原位修复的情景下,综合考虑土壤-地下水环境要素及污染物特征的关联性、不同类型污染物去除影响和各类修复技术组合、优化在不同阶段土壤-地下水的修复,通过同步统筹调查、评估、方案制定及工程施工,以最优的修复技术和合理的工程费用代价,科学、系统地实现土壤-地下水一体化修复。

### 3.3

#### 补充协同调查 **supplemental investigation**

在土壤-地下水原位协同修复过程中,因相关技术标准的更新、地块重大变化等情况,补充调查地块的水文地质特征和土壤-地下水污染特征、相互影响以及变化情况,为土壤-地下水协同修复治理提供基础数据及参数。

## 4 基本原则

### 4.1 土壤-地下水协同

土壤-地下水联系紧密,存在直接而密切的物质和能量转移,基于土壤-地下水污染防治一致性、系统性、综合性特征,宜对污染区域的土壤和地下水进行共同修复和治理。

### 4.2 污染物要素协同

石化污染地块通常具有多种污染物,制定协同修复方案时就应综合考虑不同种类污染物之间的共性、特性,污染治理过程中可能的相互作用等。

### 4.3 修复技术协同

宜组合优化两种或多种修复技术以提高修复效果和效率,降低二次污染、修复成本等。

### 4.4 修复过程协同

通过同步污染地块土壤和地下水调查与风险评估,修复方案制定考虑土壤和地下水协同,统筹工程施工,以最优的修复技术和合理的费用,科学、系统性地实现土壤-地下水一体化修复。

## 5 工作内容和流程

### 5.1 工作内容

#### 5.1.1 协同调查与风险评估

开展石化污染地块的土壤-地下水协同调查,更新概念模型,进行土壤-地下水风险评估,确定土壤和地下水的修复目标。

#### 5.1.2 协同修复方案制定

基于单项修复技术分类与应用情景分析,开展协同修复技术体系筛选及可行性分析,通过对协同修复方案综合评估比选,确定土壤-地下水原位协同修复技术方案。

#### 5.1.3 工程设计与施工

5.1.3.1 根据确定的协同修复技术方案,开展土壤-地下水原位协同修复工程设计与施工。工程设计分为初步设计和施工图设计,也可根据专业分为工艺和辅助专业设计。

5.1.3.2 工程施工应满足工程设计方案及相关施工技术规范要求,包括施工方案编制、施工过程控制及设备安装与调试。

#### 5.1.4 工程运行与监测

5.1.4.1 土壤-地下水原位协同修复工程运行及监测应包括工程运行与维护、运行效果监测、工程运行状况分析。

5.1.4.2 根据运行效果监测结果,评估修复工程的运行状况,优化工程措施,保障修复目标可达。判断修复目标不可达时,应根据实际情况选择调整工程设计方案或筛选其他技术,参考 5.1.2 再次筛选协同修复技术。

#### 5.1.5 修复效果评估

修复工程经初步判断达到修复目标后,开展协同工程修复效果评估,确定工程修复是否满足修复目标或地块风险是否达到可接受水平。

#### 5.1.6 工程关闭

通过修复效果评估、工程修复满足修复目标或地块风险达到可接受水平后,可关闭协同修复工程,后续根据长期监测情况,若出现反弹风险情况,则参考 5.1.4 重新启动修复系统工程。

### 5.2 工作流程

石化污染地块土壤-地下水原位协同修复的工作流程如图 1 所示。

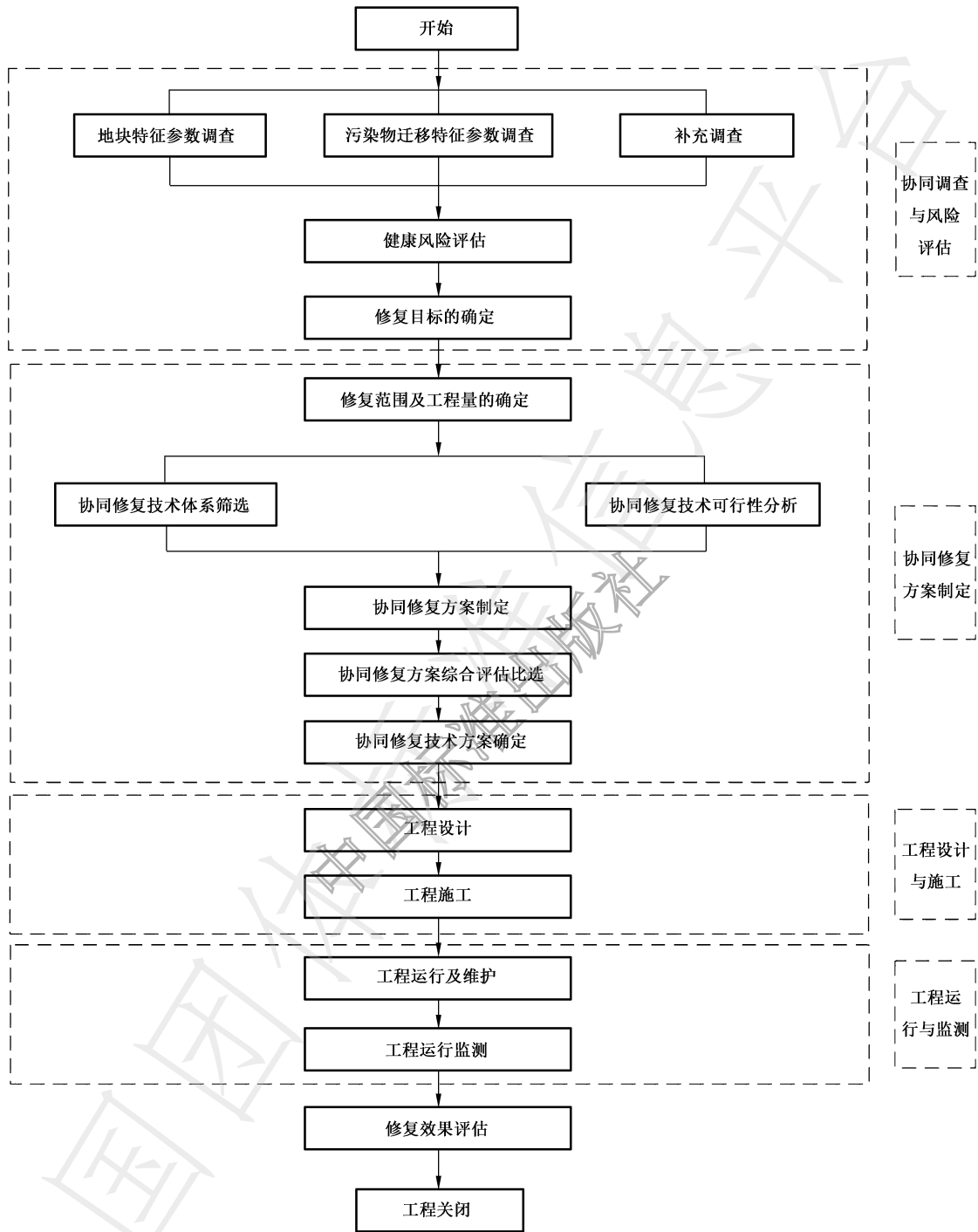


图 1 石化污染地块土壤-地下水原位协同修复的工作流程图

## 6 协同调查与风险评估

### 6.1 土壤-地下水协同调查

#### 6.1.1 土壤-地下水协同调查的调查方法基础

石化污染地块土壤和地下水常规调查方法按 HJ 25.1、HJ 25.2、HJ 25.6 和《地下水环境状况调查

评价工作指南》(环办土壤函〔2019〕770号)。

### 6.1.2 地层特征参数

地形、地层结构、岩性、各时代地层分布厚度。

### 6.1.3 水文特征参数

含水层分布位置、厚度、埋深、富水性情况、水力坡度、净补给量、地下水流速、地下水流向、入渗系数及补径排条件。

### 6.1.4 地球物理化学特征参数

6.1.4.1 物理参数:土壤容重、含水率、土壤粒径、含水层渗透系数、含水层孔隙率、包气带土壤渗透系数。

6.1.4.2 化学参数:Eh、DO、电导率、温度、pH、总硬度、有机质含量、碳酸氢根、可溶性磷酸盐、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、铁离子、锰离子等潜在污染物及中间产物。

### 6.1.5 微生物特征参数

生物量、物种组成、关键酶的功能基因。

### 6.1.6 污染物特征参数

#### 6.1.6.1 污染源

按《重点监管单位土壤污染隐患排查指南(试行)》(生态环境部公告2021年第1号)识别涉及石化地块污染物的重点场所或者重点设施设备,确定污染源潜在位置,如表1所示。

表1 涉及污染物的重点场所或者重点设施设备识别表

序号	涉及工业活动	重点场所或重点设施
1	液体储存	原油储罐、液体产品储罐、废水暂存池等
2	散装液体转运与厂内运输	散装液体物料装卸、管道运输
3	生产区	常减压蒸馏、催化裂化、延迟焦化、加氢裂化、溶剂脱沥青、加氢精制、催化重整、烃类热裂解、芳烃转化、乙烯、丙烯腈、环氧乙烷和乙二醇、苯酚和丙酮、聚氯乙烯、聚丙烯、丁腈橡胶等生产装置区
4	其他活动区	废水排水系统、应急收集设施、车间操作活动、分析化验室、一般工业固体废物贮存场、危险废物贮存库

#### 6.1.6.2 污染物指标

石化行业主要特征污染物包括石油烃、苯系物、卤代烃、多环芳烃类、苯酚类、邻苯二甲酸酯类、硝基苯类等,开展石化污染地块土壤-地下水环境调查,应满足GB 36600—2018中表1的基本项目监测,另需根据石化地块不同生产工艺补充调查相关指标如表2所示。

表 2 石化地块典型生产工艺区土壤-地下水污染物补充调查指标

生产工艺	土壤补充监测项	地下水补充监测项
常减压蒸馏	镍、石油烃	镍、氨氮、硫化物、石油烃
催化裂化	钒、镍、钼、石油烃、苯系物	钼、钒、镍、氨氮、硫化物、石油烃、苯系物
延迟焦化	镍、钼	钼、氨氮、硫化物、石油烃
加氢裂化	镍、石油烃、苯系物、氯代烃	镍、硫化物、石油烃、苯系物
催化重整	钒、锰、镍、锌、钼、铜、石油烃、苯系物	挥发酚、钼、锰、镍、氨氮、硫化物、石油烃、苯系物
污水处理	石油烃、苯系物、二氯甲烷、多环芳烃	硝酸根、亚硝酸根、氨氮、硫酸根、氯离子、石油烃、苯系物、二氯甲烷

### 6.1.6.3 污染迁移途径

#### 6.1.6.3.1 污染物进入土壤途径

污染物进入土壤途径包括大气沉降、生产污水泄漏、原辅材料泄露等,应根据生产历史情况,了解污染物泄露位置。

#### 6.1.6.3.2 污染物进入地下水途径

污染物进入地下水的途径包括入渗型、越流型、径流型等。其中入渗型应了解入渗的水量、连续性、面积、速率等信息;越流型应了解越流发生的位置、解越流量、水位差等信息;径流型应了解上游污染羽的范围、深度,向下游补给的速率、断面、水力坡度等。

#### 6.1.6.4 污染浓度及分布

针对后期土壤-地下水原位协同修复需求,需要明确各类污染物在包气带、饱和带(含水层)中的迁移规律,根据污染物性质、污染程度及地层结构等实际情况,建立并优化迁移模型,深度分析地块内污染物的迁移转化特征。

## 6.2 补充协同调查

### 6.2.1 补充协同调查必要性识别

通过核查地块已有资料和现场考察地块状况,前期调查和风险评估后发生以下重大变化,应开展补充协同调查:

- 因相关调查标准更新,导致原先的调查未按现行的开展,采样检测不符合现有要求,无法准确提供地块修复范围及修复目标值;
- 地块开展修复时距调查风险评估时间较长,土壤及地下水污染物随降雨入渗、淋溶、越流补给及弥散等方式引起污染羽范围及污染程度的变化;
- 地块现状较调查及风险评估时发生重大变化,如地表堆填建筑垃圾、生活垃圾、土壤等增加潜在污染源,以及修复、管控措施施工后水文地质、土壤理化性状等发生改变等现象。

### 6.2.2 补充协同调查方法

补充协同调查方法按 HJ 25.1、HJ 25.2 和 HJ 25.6 执行,应包括资料获取、地块环境调查、工程地质

勘察等。

### 6.3 健康风险评估

若地块利用方式、新增关注污染物、地块污染特征(如表层土壤污染深度、下层污染土壤埋深及厚度、污染源区面积)及地块水文地质特征参数(如地下水埋深、土壤有机质含量、土壤含水量、土壤中水的人渗系数)在补充调查时发生变化,应对地块概念模型及时更新,方法按 HJ 25.6,并按 HJ 25.3 及《建设用地土壤污染修复目标值制定指南(试行)》(环办土壤函〔2022〕488 号),重新开展风险评估工作,以满足后期水土协同治理的要求。

### 6.4 修复目标的确定

#### 6.4.1 土壤修复目标值

前期调查与风险评估后未发生变化,土壤修复目标值按 HJ 25.3 和《建设用地土壤污染修复目标值制定指南(试行)》(环办土壤函〔2022〕488 号)中规定的方法确定修复目标值;发生变化时,采用补充调查后的参数,按 HJ 25.3 和《建设用地土壤污染修复目标值制定指南(试行)》(环办土壤函〔2022〕488 号)中规定的方法重新确定修复目标值。

#### 6.4.2 地下水修复目标值

前期调查与风险评估后未发生变化,按 HJ 25.6 中规定的方法确定修复目标值;发生变化时,采用补充调查后的参数,按 HJ 25.6 中规定的方法重新确定修复目标值。

## 7 协同修复方案制定

### 7.1 修复范围和总工程量

#### 7.1.1 修复范围

土壤及地下水修复范围按 HJ 25.3、HJ 25.6 确定,应根据不同深度的污染程度分别划定,修复范围图应提供拐点坐标、分层图示,总体修复范围需在总图上确定。

#### 7.1.2 总工程量

土壤修复总工程量应根据不同层面上的污染范围及深度确定,地下水修复总工程量应根据污染范围、含水层厚度及渗透系数等确定。

### 7.2 单项修复技术分类与应用情景分析

土壤和地下水原位修复技术可以分为生物修复、物理修复和化学修复,单项修复技术类型及应用情景分析见附录 A 的表 A.1。

### 7.3 协同修复技术体系筛选

#### 7.3.1 协同修复技术体系初筛

在确定污染地块修复范围及修复目标之后,可根据表 B.1 以及污染地块特征、污染物类型、修复模式等对适用修复技术进行初步筛选。

#### 7.3.2 修复模式选择

7.3.2.1 修复模式应满足土壤-地下水原位协同修复和总体条件的协同修复技术方案。

7.3.2.2 污染源修复的修复治理模式适用情景为污染源存在区域,通常污染物浓度较高或有 NAPL 存在等特征。

7.3.2.3 污染羽削减的修复治理模式适用情景为污染程度为中等或较低的地下水污染区域。

7.3.2.4 以阻断及原位修复为主的风险管控模式适用于污染程度较轻或风险较低的土壤或地下水污染区域。

### 7.3.3 协同修复模式组合

根据实际情况,可实施多种修复模式协同治理,形成满足总体条件的协同修复技术方案。如在同一区域同时出现轻质非水相液体(LNAPL)且某重金属污染程度较低的情况,则可以选择修复治理和风险管控两种模式(比如多相抽提和植物修复两种修复技术)实施协同治理。

## 7.4 协同修复技术可行性分析

### 7.4.1 实验室小试

应针对初步筛选技术体系的关键环节和关键参数,制定实验室小试方案,采集污染土壤、地下水及含水层介质,按照不同的技术或组合试验效果,确定最佳工艺参数和可能产生的二次污染,估算成本和周期等。试验过程需有严格的质量保证和控制。

### 7.4.2 现场中试

7.4.2.1 应根据修复技术体系特点,结合地块条件、地质与水文地质条件、污染物类型和空间分布特征等,选择适宜的单元开展现场中试,获得设计和施工所需要的工程参数,确定现场中试过程中可能产生的二次污染物。

7.4.2.2 可采用相同或类似污染地块修复的应用案例进行分析,必要时可现场考察和评估应用案例实际工程。现场中试过程中需实施二次污染防治措施。

## 7.5 协同修复方案制定

### 7.5.1 不同修复模式工程量

7.5.1.1 根据技术路线,结合工艺流程和参数,估算每个协同修复技术备选方案的工程量,并依据修复技术种类、特征污染物种类、污染程度对工程量进行分类优化。

7.5.1.2 土壤修复工程量应根据污染物修复范围、修复深度及分层进行具体计算。

7.5.1.3 地下水修复工程量应根据污染物修复范围、修复厚度、渗透性等水文地质条件进行具体估算。

7.5.1.4 应考虑修复过程中阻隔等工程辅助措施的工程量。

### 7.5.2 费用估算

费用估算包括所选择修复技术的咨询费用、建设费用、运行费用、监测费用和后期维护费用等。

### 7.5.3 修复技术的可行性分析

基于实验室小试和现场中试结果,从技术的修复效果、可实施性、修复成本、二次污染等方面考虑,确定修复技术筛选结果中修复技术对于目标污染物和污染地块的可行性。

### 7.5.4 周期估算

周期估算应根据调查时间、工程量、工程设计、建设和运行时间、效果评估和后期环境监管要求等确定。

### 7.5.5 协同修复方案综合评估比选

根据水文地质条件、修复或风险管控目标、技术路线、工艺参数、工程量、费用和周期等,制订不少于两套的备选协同修复技术方案,构建综合评估方法对方案进行评估和比选。方案比选的主要指标包括协同技术可行性、修复周期、修复成本、修复效益、环境及健康安全等。方案比选主要过程如下。

- a) 构建综合评级指标体系。以环境指标、技术指标、经济指标、时间指标等基本分类为第一层次指标,基于可行性评估、工程量估算、费用及周期估算结果等考虑影响各基本分类的更细化的指标为第二层次指标,构建综合评价指标体系。
- b) 确定指标权重。可采用专家赋值、层次分析法(AHP)等方法确定各指标权重值,指标权重确定应遵循“一地一策”的原则,在明晰各指标相对重要性基础上合理确定各指标权重值。
- c) 计算方案综合评分。利用矩阵评分、AHP、优劣解距离法(TOPSIS)等方法计算方案综合评分,对方案进行优劣比选。

### 7.5.6 协同修复技术方案确定

基于修复方案综合评估结果,制定最终的土壤-地下水原位协同修复技术方案,技术方案应根据污染地块的水文地质条件、地下水污染特征和工程特点,统筹考虑土壤与地下水协同修复。技术方案制定的主要任务与流程见图1中所示“协同修复方案制定”。

## 8 工程设计与施工

### 8.1 工程设计

土壤-地下水原位协同修复技术设计根据工作开展阶段可分为初步设计、施工图设计,根据专业可划分为工艺和辅助专业设计。补充调查所获得的地质、水文地质、污染物种类及分布的信息,应作为工程设计的基础数据。

#### 8.1.1 初步设计和施工图设计

##### 8.1.1.1 初步设计

8.1.1.1.1 初步设计文件应根据修复方案进行编制,满足编制施工图、采购主要设备、修复工期、控制工程投资的需要。初步设计文件包括初步设计说明书、初步设计图及概算书:

- a) 初步设计说明书应包括设计总说明、各专业设计说明、主要设备材料表;
- b) 初步设计图宜包括总图、工艺、给排水等专业图纸,土壤-地下水原位协同修复工程设计应开展总图、工艺专业图纸设计;
- c) 初步设计概算书应包括编制说明、编制依据、工程总概算表、单项工程概算表和必要的说明等。

8.1.1.1.2 土壤-地下水原位协同修复技术系统包含不同的技术单元,如原位化学氧化、曝气、可渗透反应墙等。不同技术单元的工程设计参数不同,在初步设计阶段,应关注土壤及地下水协同修复的区域,具体技术参数及注意事项可参考相关的技术指南或规范。

##### 8.1.1.2 施工图设计

8.1.1.2.1 施工图设计文件应根据初步设计文件进行编制,未开展初步设计的根据技术方案进行编制。

8.1.1.2.2 施工图设计文件应满足编制工程预算、工程施工招标、设备材料采购、非标准设备制造、施工组织计划编制和工程施工的需要。

8.1.1.2.3 施工图设计文件宜包括施工图设计说明书、施工图设计图纸、工程预算书,并应符合下列规定:

- a) 施工图设计说明书包括各专业设计说明和工程量表;
- b) 施工图设计图纸中各专业图纸组成按 8.1.1.1 相关要求确定;
- c) 工程预算书包括编制说明、工程设备材料表、工程总预算书、单项工程预算书、单位工程预算书和需要补充的估价表等。

## 8.1.2 工艺和辅助专业设计

### 8.1.2.1 工艺专业设计

#### 8.1.2.1.1 工艺专业设计内容

工艺专业设计根据土壤-地下水原位协同修复技术方案确定的工艺技术路线、工艺参数和工程量等进行编制。工艺专业设计应包括以下内容:

- a) 根据初步设计,工艺专业设计内容包括各处理单体、井、主要设备及仪表、连接管道等,汇总整理设备、仪表清单和主要材料清单等;
- b) 结合现场实际情况,进行工艺总平面布置设计,将各技术单元设计和工艺总平面设计互相调整完善;
- c) 进行工艺管道设计,合理确定管道、敷设和连接方式等,绘制工艺管道布置图;
- d) 完善设备、清单和主要材料清单等,绘制工艺管道仪表流程图,达到现场使用标准;
- e) 工艺流程图根据实际情况可包括:设施设备布置图、井点(如抽出井、注入井、监测井等)的平面布置图和结构图、药剂配制和地面处理设备图、井和设备等的安装图,工艺总平面布置图、修复和风险管控区平面位置图、工艺管道布置图、工艺管道仪表流程图。

#### 8.1.2.1.2 工艺专业设计重点

工艺专业设计重点包括应用数值模拟和量化分析、工艺参数安全系数的确定和地块地球化学特征评估。

- a) 开展数值模拟及量化分析时,应构建基于土壤-地下水原位协同框架的概念模型,确立模型范围及边界,考虑体系中不同技术单元衔接的工程参数、土壤修复的技术参数与地下水修复参数相互影响的相关性,分析计算土壤-地下水协同修复体系运行过程中对地下水流场和污染物浓度时空分布的影响,预测污染物去除效果和反应介质的反应速率,分析不同设计场景和参数下的模拟计算结果,评估设计方案的可行性及可靠性,进一步优化方案。如背景较为复杂的地块,还应增加地球化学特征评估,利用水文及生物地球化学模型,计算地球化学组分存在形式和各种矿物相的饱和指数,地块内地下水通过土壤-地下水原位协同修复技术体系前后的矿物溶解和沉淀量,或将地球化学模型集成到溶质运移模型中,模拟和预测在修复工程运行期间地块地下水中不同地球化学组分的溶解和沉淀,为修复效果评估提供科学参考。
- b) 确定工艺参数的安全系数时,应基于地下水数值模拟的结果、修复目标的可达性、工程施工的难度及成本效益,确定合理的安全系数。

#### 8.1.2.2 辅助专业设计

辅助专业设计为工艺专业之外的专业设计,如土建、电、气、给排水等,应考虑土壤和地下水不同介质的特点。辅助专业设计应在工艺专业设计基础上进行,为修复或管控工艺设计提供支撑。

## 8.2 工程施工

### 8.2.1 现场准备

8.2.1.1 工程施工准备包括技术准备、施工现场准备、材料准备、施工机械和施工队伍准备等。

8.2.1.2 根据工程设计图纸,综合考虑现场条件、施工企业情况等,编制施工方案。

8.2.1.3 应特别关注地块的地下管线情况、周边建(构)筑物情况,并根据施工需要关注抽水及排水条件、用水、用电等问题。

8.2.1.4 应按方案开展基坑开挖,必要的基坑支护及降水工作,为地下系统的建设提供安全、稳定的前置条件。

### 8.2.2 现场安装

8.2.2.1 原位协同修复系统所需的全套设备(含辅助设备),按方案及施工地块情况进行合理布置及安装。

8.2.2.2 对地下设备(或设施)的安装必须提前排查相关安全隐患,及时检查通路。

### 8.2.3 设备调试

8.2.3.1 原位协同修复系统应满足:

- a) 确定供电系统是否满足系统运行的需求;
- b) 确定系统试运行及密封情况;
- c) 确定各项压力值、流速值等参数。

8.2.3.2 检查供电系统、供气系统是否满足方案要求,是否可满负荷工作,是否有泄漏情况。

8.2.3.3 检查供水系统、抽出注入系统管路是否通畅,测试压力仪及流量计等监控设备是否齐备、完好,是否可满负荷工作,确认无误后方可进入下一步工序。

8.2.3.4 各种设备检查完毕后在地表施工平面上进行联合试机、试注检查,以确定系统各部分能否正常工作。

### 8.2.4 施工过程

#### 8.2.4.1 工程动态控制

施工过程中做好工程动态控制工作,通过落实安全和质量保证措施、控制工程施工进度和建设安装成本,保证安全、质量、进度、成本等目标的全面实现。施工过程如出现设计需要变更的情况,经建设、监理单位同意,由设计单位进行设计变更。

#### 8.2.4.2 污染羽变化监测

当土壤-地下水原位协同修复施工可能对土壤、地下水流场或污染羽扰动时,应监测土壤原污染点位周边污染变化情况,地下水水位、水质,掌握地下水流场和污染羽变化等情况。

### 8.2.5 环境管理

#### 8.2.5.1 二次污染防治

根据国家和地方环境管理法律法规标准,结合工程施工工艺特点以及工程周边环境,对修复治理实施全流程的二次污染防治,防范钻探建井、地面处理设备安装、注入抽出、可渗透反应墙建设等施工过程

中造成的地下水、土壤、地表水、环境空气、噪音等二次污染。

#### 8.2.5.2 碳排放控制

应注重修复治理全流程(包括可行性研究、工程设计、施工、废弃物处置等)的碳排放定性及定量的分析、控制。例如,可以先识别项目总体技术路线下的重要碳排放路径,再从材料生产、机械用能、交通运输、电力消耗等类别计算碳排放及可能的固碳,最后通过单位碳排放强度评价修复治理全过程中的碳排放控制程度。

### 9 工程运行与监测

#### 9.1 工程运行及维护

##### 9.1.1 运行维护方案编制

土壤-地下水原位协同修复工程应编制运行维护方案,包括工程运行管理、设备操作、设备维护保养、安全运行管理制度建立、设备检修等内容。当涉及土壤-地下水修复药剂、工程控制材料和二次污染物处理药剂及材料等使用时,应包括对药剂和材料进场检测、试验、储存、使用的管理等内容。

##### 9.1.2 运行内容

工程运行过程中,主要运行内容包括:

- a) 对设备设施运行进行记录,包括计量仪器仪表读数、材料使用情况等,记录应及时、准确、完整;
- b) 对设备设施运行过程中可能产生环境事故的单元进行定期检查。设备设施运行不正常时,及时检修、更换或调整。

##### 9.1.3 维护内容

工程的维护主要内容包括:

- a) 对设备设施进行维护保养,包括设备清洁、润滑和保养,以及易损件的更换等;
- b) 对进场的药剂和材料进行检测、核实、登记,对药剂和材料的储存、使用进行管理。

#### 9.2 工程运行监测

##### 9.2.1 运行监测

###### 9.2.1.1 土壤-地下水原位协同修复体系不同技术单元的监测

9.2.1.1.1 土壤-地下水原位协同修复体系中不同技术单元监测重点不同,应根据设计具体分析。土壤中应对重点区域加密以及分阶段采样,监测目标污染物的变化情况;地下水中若涉及抽出井、注入井等,应使用流量计、压力计等仪表设备监测抽水井流量、注入井压力等,表征抽注单元的运行状态。

9.2.1.1.2 涉及水平可渗透反应墙,监测点一般布设在模块化水平可渗透反应墙系统进水口、模块化水平可渗透反应墙系统出水口、模块化水平可渗透反应墙系统内部位置。

###### 9.2.1.2 污染物及污染范围监测

###### 9.2.1.2.1 点位布设基本原则

在工程运行监测过程中,土壤和地下水的监测点位布设基本原则包括:

- a) 土壤采样点布设在原污染范围附近,根据实际情况确定;
- b) 对于地下水原位修复技术,在其污染羽中心及下游地段,应设置采样点,采样点数量不少于4个;
- c) 结合工艺特点,对于具有不同非连续处理单元的技术,对各单元应设置采样点;或者在能反映工艺中间环节的处理效果的地方设置采样点。

#### 9.2.1.2.2 采样频次

土壤中目标污染物和中间产物应至少在验证周期中期和末期采集1批次样品。地下水中目标污染物和中间产物应至少在验证周期中期和末期采集2批次样品;废水、废气、噪声采样满足相应环评标准。

#### 9.2.1.2.3 监测指标

工程运行过程中的监测指标主要包含以下方面:

- a) 效果评估指标包括污染物指标和工程性能指标;
- b) 污染物指标包括修复技术方案中确定的目标污染物,修复过程中可能产生的中间产物和二次污染物,原则上中间产物应根据目标污染物与修复药剂可能发生的反应确定;
- c) 工程性能指标包括工程设施连续性与稳定性、抗压强度、渗透性能等。

#### 9.2.1.2.4 修复效果达标判断

工程修复效果达标按以下标准:

- a) 土壤和地下水的污染物修复效果达标判断按 HJ 25.5 和 HJ 25.6 执行;
- b) 工程性能指标应满足设计要求且不影响修复效果。

### 9.2.2 趋势预测

获取工程运行监测数据后应及时进行趋势预测,可对 9.2.1 中全部或部分监测指标进行趋势预测,趋势预测可采用图表、数值模拟或统计学等方法。

### 9.2.3 工程运行状况分析

工程运行状况分析应根据土壤和地下水监测数据及趋势预测结果开展,分析土壤和地下水修复或风险管控工程运行阶段的有效性、目标可达性、经济可行性等,判断技术方案、工程设计、施工、运行有无调整和优化的必要。

## 10 修复效果评估

### 10.1 目标污染物评估

对目标污染物及其他相关因子的修复效果达标判断,按 HJ 25.5 和 HJ 25.6 的相关要求执行。

### 10.2 二次污染评估

应关注修复过程中产生的二次污染物,对施工过程中产生的固体废物、废气和噪音在修复过程中及终了状态时的产生及处理处置情况予以评价,见表 3。

表 3 修复过程中二次污染评价

序号	评价指标	指标内涵	监测	评价方法
1	二次污染情况	化学氧化、化学还原、微生物修复产生的其他物质	对特征污染物可能产生的中间产物进行分析,具体测试指标根据特征污染物确定。监测频次:连续 8 个批次监测,两个批次间隔不少于 1 个月	原则上根据协同修复技术方案中可行性分析结果确定,也可按 GB/T 14848 中地下水或 GB 36600—2018 中土壤使用功能对应标准值执行,或根据暴露途径情景进行风险评估确定,风险评估可按 HJ 25.3 执行
2	固废产生情况	修复过程中固废的产生情况,定性属于哪种废物?一般废物还是危险废物	水平可渗透反应墙(HPRB)固废渣体鉴定(台账)、尾气处理设备和废水处理设备活性炭鉴定(台账)及去向	固废处置及去向是否满足固体废物处理处置相关管理要求
3	废气产生情况	修复过程中是否有废气产生?有毒还是无毒	修复设备在建设及运行过程中的废气产生情况及处理情况	是否满足建设工程气体排放相关管理要求
4	噪音产生情况	修复过程中噪音产生情况,应符合 GB 12348	在修复工程建设和运行过程中使用噪声测定仪进行监测	应符合 GB 12348 相关的环境管理要求

## 11 工程关闭

11.1 若通过修复区域土壤及其周边监测井(下游)地下水的采样、监测,确定污染物浓度已经达到修复目标值水平,修复工程不再继续时,可选择关闭原位协同修复工程。

11.2 关闭修复工程后,应对相关构筑物、处理设备设施等进行拆除,废弃井可根据《废弃井封井回填技术指南(试行)》(环办土壤函[2020]72号)进行回填,妥善处置固体废物,防止造成二次污染,逐步恢复地块条件。如开展后期环境监管的地块,应保留必要的地下水环境监测井,并根据后期环境监管要求,地下水每年至少应开展一次监测,土壤必要时开展抽检。

11.3 关闭和拆除活动应符合相关法律法规及标准要求。

附录 A  
(资料性)

原位单项修复技术类型及应用情景分析

原位单项修复技术类型及应用情景分析见表 A.1。

表 A.1 原位单项修复技术类型及应用情景分析

技术名称	适用特征 污染物	适用地块	适用 目标	优点	缺点	原理
空气吹脱技术 (Air stripping)	挥发性有机物	渗透性强	土壤、地 下水	操作简单,对周围干扰 小;成本较低,二次污 染较小	单独使用修复效果较差	利用亨利定律的原理,将 压缩空气鼓入受污染的含 水层,通过污染物从水相 向气相转移的挥发作用去 除地下水中的污染物
空气注入技术 (Air sparging)	半挥发、可挥发有机 物,如汽油、苯系物 及相关燃料、石油碳 氢化合物	渗透率高、黏土含量低、 土壤分层的潜水含水 层,含水层饱和厚度较 厚,地下水埋深较深	土壤、地 下水	对修复地块干扰小,设 备简单,施工方便;成 本较低	可能导致地下水污染扩散; 气体会迁移和释放到地 表,造成二次污染	将压缩空气注入不饱和土 壤或含水层中,通过吹脱、 挥发、溶解、吸附-解吸和 生物降解等作用将污染物 去除
热处理技术 (Thermal treatment)	挥发、半挥发有机物	渗透性强、土壤湿度较低	土壤	工艺简单、技术成熟、 高效、灵活、二次污 染少	高能耗,高费用,一般需要对 土壤进行预处理;有产生二噁 英风险;成本较高	通过高温,使污染物发生 裂解或氧化降解,或使污 染物从污染介质中挥发 分离
生物通风技术 (Bioventing)	石油烃、非氯化溶 剂、某些杀虫剂、防 腐剂、易生物降解的 有机物	渗透性强、黏土含量低、 不饱合土壤	土壤、地 下水	绿色环保、操作灵活、 安装简便;成本较低	土壤中微生物会受到环境因 素限制,并且耗时长,对于高 浓度污染物去除效率比较低	对污染土壤强制通入空 气,促进好氧微生物对污 染物的降解效果

表 A.1 原位单项修复技术类型及应用情景分析 (续)

技术名称	适用特征 污染物	适用地块	适用 目标	优点	缺点	原理
生物抽除技术 (Bio slurring)	LNAPL	温度较高、渗透性高	土壤、地 下水	可回收相关产物,从而 加速修复进度,减少对 含水层的扰动,对环境 影响较小;成本较低	部分地下水环境不适宜微生物生长	通过真空吸引式的抽汲技术,运用生物通风和污染物抽提回收两种机制清除包气带污染土壤中的挥发性有机污染物或石油烃类污染物
双/多相抽提技术 (双泵系统抽提) (DPE/MPE)	适用于石油烃和氯代烃等	渗透性高、地下水位变动相对较小	土壤、地 下水	可处理易挥发、易流动的非水溶性液体,土壤破坏小、投资成本低、操作简单、无二次污染	效果受地块水文地质条件和污染物分布影响较大;需要对抽提出的气体和液体进行后续处理	同时抽提土壤气体和地下水包括非水相液体(NAPL)中气相、水溶相、非水溶相污染物
土壤气相抽提技术 (Soil vapor extraction)	挥发性有机物、部分燃料	土壤质地均一、渗透性高、孔隙度大、湿度小、地下水较深	土壤	可操作性强,处理污染物范围广,可由标准设备操作,不破坏土壤结构以及对回收利用废物有潜在价值;成本较低、环境友好	土壤理化特性对处理效果有较大影响,排除的气体需进一步处理,黏土、腐殖质含量高或本身极其干燥的土壤因其对挥发性有机物的强吸附性,去除效率很低	通过在不饱和土壤层中布置提取井,利用真空泵产生负压驱使空气流通过污染土壤的孔隙,解吸并夹带有机污染物流向抽取井,最终在地上进行污染处理
化学氧化/还原技术 (Chemical oxidation/reduction)	挥发性有机物(如氯代烃、苯系物)、半挥发性有机物(如农药、多环芳烃、多氯联苯)、高价态重金属	适用于渗透性较好的孔隙、裂隙和岩溶含水层	土壤、地 下水	适用范围广,二次污染小,能与原位生物修复联合使用,对含非饱和的有机化合物处理尤为高效;修复效率高,时间消耗短	氧化(或还原)中间产物可能毒性更高,氧化还原产物可能会阻塞土壤孔隙、降低渗透性,污染物之外的还原性(氧化性)物质也会消耗大量氧化剂(还原剂),化学物质的传输受水文地质和环境条件影响较大;成本高	加入强氧化剂(或强还原剂),通过氧化还原反应分解或转化有机污染物,形成环境无害、低毒的化合物

表 A.1 原位单项修复技术类型及应用情景分析 (续)

技术名称	适用特征 污染物	适用地块	适用 目标	优点	缺点	原理
化学稳定技术 (Chemical stabilization)	重金属	适用于渗透性较好的孔隙、裂隙和岩溶含水层	土壤、地下水	适用性强;成本较低、效率高、环境风险较低	只将污染物稳定在土层中、并未去除,稳定化产物可能会随水文化学条件的变化重新释放,稳定化产物可能阻塞土壤孔隙、降低渗透性	加入稳定剂,通过沉淀、吸附、离子交换等化学反应来稳定土壤-地下水中的活性污染物
多相萃取技术 (Multiphase extraction)	有机污染物	土壤的黏土含量较低、湿度较低	土壤、地下水	高效、操作容易	化学溶剂易造成二次污染;成本较高	利用溶剂将污染物从被污染的土壤-地下水中萃取出来,用真空抽提系统,将土壤污染物、地下水污染物、游离相油类污染物以及石油烃蒸汽等各种混合物一并抽出去
循环井技术 (Circulating well)	VOCs、SVOCs、燃料、农药、部分无机污染物	水力传导系数大于 $10^{-5}$ cm/s,地下水流动性较小,含水层较深	地下水	设计简单,维护成本低,对大多数土壤有效;成本较低	含非水相液体的地块不可用,对污染羽要进行有效管控以防污染物扩散污染	为吹脱、空气注入、气相抽提、强化生物修复和化学氧化等多种技术结合应用,通过在井内曝气,使地下水形成循环,携带溶解在地下水中的挥发和半挥发性有机物进入内井,通过曝气吹脱去除
渗透反应墙技术 (Permeable reactive barrier, PRB)	氯代烃、六价铬等重金属、硝酸盐、砷、氟化物、垃圾渗滤液	埋深浅、污染面积大的潜水含水层	地下水	设计简单、发展成熟、适用范围广	更换反应墙材料可能产生二次污染	在受污染地下水流经的方 向建造由反应材料组成的 反应墙,通过反应材料的 吸附、沉淀、化学降解或生 物降解等作用去除地下水 中的污染物

表 A.1 原位单项修复技术类型及应用情景分析 (续)

技术名称	适用特征污染物	适用地块	适用目标	优点	缺点	原理
电动力学修复技术 (Electrokinetic re-mediation)	重金属、石油烃、高密度非水溶性有机物	低渗透性的孔隙含水层、黏土含量较高的土壤	土壤、地下水	对修复地块干扰小,目标污染物与背景值相差较大时处理效率较高,环境风险较小	易出现活化极化、电阻极化和浓差极化等情况降低修复效率,埋藏的金属或绝缘物质、地质的均一性、地下水位均会影响土壤中电流的变化,从而影响处理效率;成本较高	插入土壤或地下水中的两个电极在污染土壤两端加上低压直流电场,在电化作用和电动力学的复合作用下,水溶的或吸附在土壤颗粒表层的污染物根据所带电荷的不同向正负电极移动,使污染在电极附近富集或被回收利用
植物修复技术 (Phytoremediation)	适用于低污染水平的重金属和特定的有机物	浅层污染土壤,适用于地下埋深较浅的污染地块	土壤、地下水	施工方便,对环境影响较小,效率高	处理效果受地下埋深、污染物质性质和浓度影响较大;需考虑植物后续处理	利用特定植物的吸收、转化、清除或降解土壤中的污染物
监测自然衰减技术 (Monitored natural attenuation, MNA)	适用于易降解、浓度较低的挥发、半挥发有机物、石油烃	适用于污染程度较低、渗透性高、污染物自然衰减能力较强的孔隙、裂隙和岩溶含水层	土壤、地下水	操作简单、费用低,对环境影响较小	修复效率受污染物性质、土壤微生物生态结构、土壤性质等多种因素的影响,且对土壤中的营养等条件要求较高,需要较长监测时间	依据地块自然发生的物理、化学及生物作用,使得地下水和土壤中污染物的数量、毒性、移动性降低到风险可接受水平

## 附录 B

(资料性)

## 不同重点场所污染物在不同修复模式下的技术应用

不同重点场所污染物在不同修复模式下的技术应用见表 B.1。

表 B.1 不同重点场所污染物在不同修复模式下的技术应用

修复模式	修复分类	污染物重点场所	特征污染物指标	修复技术
修复治理	污染源修复	厂区(地块)	半/挥发性有机物[苯系物、多环芳烃、氯代烃、甲基叔丁基醚(MTBE)等]	多相萃取、土壤气相抽提、多相抽提、生物通风、空气注入、空气吹脱、热处理、化学氧化/还原
		厂区(地块)	石油烃(C10~C40)	多相萃取、多相抽提、生物通风、空气注入、热处理、化学氧化/还原
		厂区(地块)	LNAPL	多相萃取、土壤气相抽提、多相抽提、生物抽除、生物通风、空气注入、空气吹脱、热处理、化学氧化/还原
		厂区(地块)	重金属(镍、铅等)	电力、化学稳定
	污染羽削减	厂区(地块)及其外的地下水下游	半/挥发性有机物(苯系物、多环芳烃、氯代烃、MTBE等)	可渗透反应墙、循环井技术、多相萃取、多相抽提、生物通风、空气注入、空气吹脱、热处理、化学氧化/还原、监测自然衰减
		厂区(地块)及其外的地下水下游	石油烃(C10~C40)	可渗透反应墙、循环井技术、多相萃取、多相抽提、生物通风、空气注入、热处理、化学氧化/还原、监测自然衰减
		厂区(地块)及其外的地下水下游	LNAPL	可渗透反应墙、循环井技术、多相萃取、多相抽提、生物抽除、生物通风、空气注入、空气吹脱、化学氧化/还原
		厂区(地块)及其外的地下水下游	重金属(镍、铅等)	电力、可渗透反应墙、化学稳定、植物修复
		厂区(地块)及其外的地下水下游	有机物	阻隔、可渗透反应墙、水力控制、监测自然衰减、制度控制
	风险管控	以阻断及原位修复为主	厂区(地块)及其外的地下水下游	有机物
厂区(地块)及其外的地下水下游			重金属	阻隔、可渗透反应墙、水力控制、植物修复、制度控制

## 附 录 C

(资料性)

## 某石化污染地块土壤-地下水协同修复案例

## C.1 项目概况

本案例涉及典型的北方某石化搬迁污染地块。该地块生产历史超 50 年,自建厂以来,先后投产共计 5 套生产装置,分别为常减压蒸馏装置、重油催化裂化装置、气体分馏装置、直馏石脑油非临氢改质装置和蜡油催化裂化装置,以及与生产装置相配套的辅助设施和公用工程。修复工程区位于厂内储运罐区,主要用于存放柴油及液化气。

## C.2 协同补充调查

在前期调查的基础上,再次对地块土壤-地下水进行了协同补充调查,得到如下结果:

场地水文地质情况主要为:地块内第 1 含水层以上有 2 个地层,分别为人工填土层(Qml),厚度 0.60 m~3.10 m,底板标高为-6.79 m~8.79 m,主要由杂填土和素填土组成;全新统新近组古河道注淀冲积(Q4<sup>3N</sup>al),厚度 0.50 m~13.90 m,底板标高为-26.56 m~9.39 m,主要由粉质黏土、淤泥质粉质黏土和粉质黏土组成。地下水主要为潜水,其稳定水位埋深为 1.31 m~1.86 m,稳定水位标高为-8.40 m~-8.75 m。

场地污染物情况主要为:地下水中主要超标污染物为砷、MTBE,土壤中主要超标污染物为石油烃。

## C.3 协同修复方案制定

本修复工程根据 HJ 25.3、HJ 25.6、《建设用地土壤污染修复目标值制定指南(试行)》(环办土壤函[2022]488 号)的要求,以及场地未来规划的情况,分别确定了含水层介质及地下水中目标污染物的修复目标值及工程量。

根据附录 B 以及污染地块特征、污染物类型、修复模式等对适用修复技术进行初步筛选,采用污染源去除+污染羽削减的修复模式,初步筛选“循环井+可渗透反应墙”“多相抽提+可渗透反应墙”“化学氧化还原+生物通风”“化学氧化还原+监控式自然衰减”等 4 组技术组合备选方案。

对组合技术从以下 4 个步骤进行可行性分析和方案制定:a)在补充调查阶段嵌入抽水试验等,掌握场地实际参数;b)小试试验研究可渗透反应墙、多相抽提、化学氧化还原、生物通风等关键技术参数;c)估算每个协同修复技术备选方案的工程量、修复费用和周期等;d)以环境指标、技术指标、经济指标、时间指标等为第一层次指标,可行性评估、工程量估算、费用及周期估算结果等为第二层次指标,构建综合评价指标体系,通过专家赋值、层次分析法等方法确定各指标权重值,最终确定“循环井+可渗透反应墙”为协同修复技术方案。

## C.4 工程设计重点

工程设计研究了循环井和可渗透反应墙技术单元衔接的工程参数、土壤修复的技术参数与地下水修复参数相互影响的相关性,利用 Python 语言 FloPy 模块耦合 Modflow 和 MT3DMS 进行地下水数值模拟,优化算法耦合构建地下水模拟优化模型,结合定性及定量方法,分析计算土壤-地下水协同修复体系运行过程中对地下水流场和污染物浓度时空分布的影响,预测污染物去除效果和反应介质的反应速率,分析不同设计场景和参数下的模拟计算结果,评估设计方案的可行性及可靠性,进一步优化方案。此外,综合计算得到的含水层土壤和地下水的污染物总量(即“溶解于地下水中的质量+吸附在土壤介质中的质量”),以及小试得到的解吸次数和时间,加上数值模拟的结果、修复目标及施工周期等,确定该

技术循环井抽出注入水量的安全系数。

### C.5 工程实施及效果评估

系统安全稳定的运行是工程实施的基本保障,因此在前期建设阶段需要给予足够的调试时间,系统正式运行时,注意观察是否存在井、泵骤停等异常情况。出现抽水困难时,降低抽水速率并增加工作时间,但同时需保证每天抽出一定量的地下水;出现注水出现冒浆情况,可通过增大压力或者减少注入速度增加注入时间,但要保证注入与抽出量相同的水量。稳定运行 8 h 后,可进入正常运行阶段,按期监测流量计、压力表。系统设置间歇期,一般 1h 后观察无异常进入常规监测流程。工程实施期间,将每阶段污染物实际监测值与阶段目标值进行对比,若实际值小于或等于阶段目标则按照原计划进行;若实际值大于阶段目标,前 2 个阶段适当延长抽注时间缩短间歇时间;最后 1 个阶段适当增加监测频率,提高污染物去除率。抽注井正常运行后,每 2 h 观测一次流量计和压力表并记录,当抽出流量差异至 20%,需改变抽出策略,根据实际情况调节流量;当注入井流量低于设计流量的 50%,压力可增大 20%。可渗透反应墙的运行、维护和安全应符合 HJ 25.6 及其他现行有关标准的要求。根据工艺要求,定期对工程设施进行检查维护,确保工程性能稳定。通过建立健全与水平可渗透反应墙相关的各项规章制度,以及运行、维护和操作规程,项目人员对工程设施开展定期检查和维修,重点维护水平可渗透墙及内置材料的性能。修复效果评估阶段重点对土壤地下水中目标污染物、中间产物以及对周边环境产生的二次污染进行评估,主要按 HJ 25.5 和 HJ 25.6 的相关要求执行,效果评估结论严格对照修复方案及工程设计的目标。