

T

ICS 13.020.40
CCS Z05

团体标准

T/CWDPA XXX—2026

地下水污染场地土壤与地下水协同修复技术规范

Technical specification for collaborative remediation of soil and
groundwater at groundwater-contaminated sites
(征求意见稿)

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国西部开发促进会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本规定 2

5 场地协同调查与风险评估 2

6 协同修复技术集成 3

7 协同修复工程设计 5

8 协同修复工程施工 7

9 过程监测 8

10 修复效果评估 9

附录 A（资料性） 协同修复技术组合适用性指引 11

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。

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。

本文件由常州民生环境检测有限公司提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次发布。

地下水污染场地土壤与地下水协同修复技术规范

1 范围

本文件规定了地下水污染场地土壤与地下水协同修复的基本规定、场地协同调查与风险评估、协同修复技术集成、协同修复工程设计、协同修复工程施工、过程监测及修复效果评估的技术要求。
本文件适用于地下水污染场地中土壤与地下水协同修复工程的实施。

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 8978 污水综合排放标准
- GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）
- GB/T 14848 地下水质量标准
- 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 25.4 建设用地土壤修复技术导则
- HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则
- HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

污染场地 contaminated site

因堆积、储存、处理、处置或其他方式承载了有害物质的，对人体健康和环境产生危害或具有潜在风险的空间区域。

3.2

地下水污染场地 groundwater contaminated site

地下水水质因人类活动或自然因素恶化，已达到或超过地下水环境质量标准，或已对周边敏感受体产生或可能产生不利影响的场地。

3.3

协同修复技术集成 synergistic remediation technology integration

针对特定污染场地的水文地质条件、污染物类型及分布特征，将两种或两种以上修复技术进行系统组合与耦合，形成水土协同修复技术体系的过程。

3.4

原位协同修复 in-situ synergistic remediation

不移动污染土壤和地下水，在场地原位同时或交替实施土壤修复和地下水修复的技术方法。

3.5

异位协同修复 ex-situ synergistic remediation

将受污染的土壤和（或）地下水从原始位置开挖或抽出后，在场地内或场外进行协同处理的技术方法。

3.6

修复目标值 remediation target value

综合考虑场地污染状况、水文地质条件、土地利用规划及受体暴露情景，确定的土壤和地下水中污染物需达到的浓度限值或风险控制水平，作为修复工程验收的依据。

3.7

修复效果评估 remediation effectiveness assessment

在修复工程完成后，通过系统的采样检测与分析，判断土壤和地下水污染物浓度是否达到修复目标值，评价修复工程整体效果的过程。

4 基本规定

4.1 工作程序

4.1.1 协同修复技术工作程序包括以下阶段：

- a) 场地协同调查与风险评估；
- b) 协同修复技术集成；
- c) 协同修复工程设计；
- d) 协同修复工程施工；
- e) 修复过程监测；
- f) 修复效果评估。

4.1.2 各阶段应有序衔接，前一阶段未完成时不应进入下一阶段。当场地条件发生重大变化时，应返回相关阶段进行调整。

4.2 基本原则

4.2.1 水土协同原则

土壤与地下水修复应统筹规划、协调实施，修复方案应同时考虑两个介质的污染状况和相互影响，避免单一介质修复对另一介质造成不利影响。

4.2.2 技术适配原则

修复技术的选择应与污染物类型、浓度、分布特征及水文地质条件相适应。复合污染场地应优先选用能同时处理多种污染物的技术或技术组合。

4.2.3 过程协同控制原则

修复工程实施中应对土壤和地下水修复过程进行协同控制，确保两个介质的修复进度、工艺参数和监测方案相互协调，实现整体修复效果最优。

5 场地协同调查与风险评估

5.1 土壤污染调查

5.1.1 调查范围与布点

5.1.1.1 调查范围应根据污染识别结果确定，应包括污染源区域、污染迁移途径及可能影响的范围，并覆盖土壤和地下水可能相互影响的全部区域。

5.1.1.2 采样布点应符合 HJ 25.1 和 HJ 25.2 的规定，采用系统布点法或专业判断布点法。地块面积不大于 5000 m² 时，采样点位数不应少于 3 个。

5.1.2 样品采集与检测

5.1.2.1 土壤样品采集应符合 HJ 25.2 的规定，采样深度应扣除地表非土壤硬化层厚度，原则上应采集 0 m~0.5 m 表层土壤样品。

5.1.2.2 挥发性有机物污染土壤应采用无扰动式采样并立即密封，土壤混合样的采样点数应为5个～20个。检测方法应采用GB 36600规定的方法或等效方法。

5.2 地下水污染调查

5.2.1 水文地质勘察

应查明含水层的分布、厚度、埋深及渗透系数，地下水流向、水力坡度和流速，地下水与地表水的水力联系，以及包气带岩性、厚度及防污性能，为污染迁移模拟和修复方案设计提供基础数据。

5.2.2 监测井布设

监测井布设应符合HJ 25.2和HJ 25.6的规定，应在污染源区域上下游、污染羽中心及边缘、场地边界及周边敏感目标附近设置。监测井深度应穿透污染含水层，滤水管位置应覆盖污染深度范围。

5.2.3 样品采集与检测

5.2.3.1 地下水样品采集应符合HJ 25.2的规定，采样前应进行洗井，洗井水量不应少于井筒水量的3倍，样品采集后应按要求保存和运输。

5.2.3.2 检测项目应与土壤检测项目相对应，检测方法应采用GB/T 14848规定的方法。

5.3 协同风险评估

5.3.1 概念模型构建

应在土壤和地下水污染调查数据基础上，构建包含污染源特征、污染物迁移途径、暴露途径和敏感受体、水文地质条件对迁移影响等要素的概念模型，并在调查和修复过程中持续更新。

5.3.2 风险表征

风险表征应按照HJ 25.3的规定执行，应分别对土壤和地下水中的污染物进行致癌风险和非致癌危害商计算，同时考虑水土两相经同一暴露途径的综合风险。可接受致癌风险水平为 10^{-6} ，可接受危害商为1。

5.3.3 修复目标值确定

修复目标值应综合考虑GB 36600规定的筛选值和管制值、GB/T 14848规定的地下水质量分类指标、HJ 25.3计算的风险控制值以及场地背景值。土壤修复目标值不应高于GB 36600筛选值，地下水不应高于GB/T 14848 III类水质限值。背景值高于上述限值时，可调整为背景值。

6 协同修复技术集成

6.1 一般规定

协同修复技术集成应根据场地污染特征、修复目标和水文地质条件选择适宜的技术组合，技术集成方案应明确各技术的适用条件、工艺参数和相互衔接要求。

6.2 技术组合原则

6.2.1 技术相容性

组合的修复技术之间应具有良好的相容性，不应产生相互抑制或副产物叠加等不利影响，技术组合的副产物应可处理或可接受。

6.2.2 时序匹配

各修复技术的实施时序应合理匹配，原位修复技术可同步或分阶段实施，异位修复技术应先完成土壤开挖后再实施地下水修复，或根据场地条件合理安排时序。

6.2.3 空间协同

各修复技术的作业空间应统筹规划，避免相互干扰。注入井与抽提井的布设应协调，确保修复药剂或处理措施的有效覆盖。

6.3 土壤修复技术

6.3.1 原位修复技术

土壤修复技术的选择应符合HJ 25.4的规定。原位修复技术主要包括原位化学氧化/还原、原位生物修复、原位固化/稳定化和原位热脱附等类型，不同类型技术的适用条件见表1。

表 1 原位修复技术适用条件

技术类型	适用污染物	适用地层	限制条件
原位化学氧化/还原	卤代烃、石油烃、多环芳烃	粉土、砂土、裂隙岩体	渗透系数小于 10^{-5} cm/s时效果不佳
原位生物修复	可生物降解的有机物	温度适宜、营养充足	高浓度重金属或极端pH
原位固化/稳定化	重金属、无机物	各类地层	不适用于挥发性有机物
原位热脱附	高浓度VOCs/SVOCs	渗透性较低地层	含水率不宜大于40%

6.3.2 异位修复技术

异位修复技术主要包括异位固化/稳定化、异位化学氧化/还原、异位热脱附和异位土壤淋洗等类型，不同类型技术的适用条件见表2。

表 2 异位修复技术适用条件

技术类型	适用污染物	适用土壤类型	关键工艺要求
异位固化/稳定化	重金属	各类土壤	需破碎筛分
异位化学氧化/还原	有机污染物	渗透性较好	含水率满足工艺要求
异位热脱附	VOCs/SVOCs	各类土壤	含水率 $\leq 20\%$ ，粒径 ≤ 5 cm ~ 10 cm
异位土壤淋洗	重金属、有机	粘粒含量 $< 25\%$	产生废水需处理

6.4 地下水修复技术

6.4.1 原位修复技术

地下水原位修复技术的选择应根据含水层厚度、渗透系数和地下水流速综合确定。不同类型地下水原位修复技术的适用条件见表3。

表 3 地下水原位修复技术适用条件

技术类型	适用污染物	水文地质条件	关键参数要求
原位化学氧化/还原	溶解相有机物	渗透性良好	渗透系数 $\geq 10^{-4}$ cm/s
原位生物修复	可生物降解有机物	温度适宜	需添加电子受体或营养物质
监测自然衰减	低浓度可降解污染物	衰减速率满足要求	需长期监测
空气注入	挥发性有机物	含水层渗透性好	渗透系数 $\geq 10^{-4}$ cm/s

6.4.2 抽出处理技术

- 6.4.2.1 抽出处理技术适用于以下条件：
- a) 污染物为溶解相，且含水层渗透性较好（渗透系数不小于 10^{-4} cm/s）；
 - b) 污染羽范围明确，可合理布设抽水井；
 - c) 抽出水有可行的处理或回用途径。
- 6.4.2.2 抽出处理技术宜作为辅助技术与其他原位修复技术组合使用。

6.5 协同修复技术组合

6.5.1 组合类型

协同修复技术组合的主要类型及适用条件见表4。

表 4 协同修复技术组合类型与适用条件

组合类型	适用场地特征	典型技术组合
原位—原位组合	污染深度大、地面有建构筑物、不宜开挖	原位化学氧化+原位生物修复
异位—异位组合	污染深度浅、场地空间充足、修复工期紧	异位土壤热脱附+地下水抽出处理
原位—异位组合	土壤污染深度大、地下水污染范围广	原位土壤修复+地下水抽出处理
土壤修复+监测自然衰减	土壤污染已清除、地下水残留污染浓度较低	异位土壤修复+地下水监测自然衰减

6.5.2 接口技术要求

- 不同修复技术之间的接口应符合以下要求：
- a) 前序技术处理后的介质条件应满足后续技术的入料要求；
 - b) 不同技术的作业区域之间应设置过渡区，避免交叉污染；
 - c) 技术切换时应对介质进行重新检测，确认满足后续技术要求。

6.5.3 工艺参数要求

- 耦合工艺的参数应协调匹配，主要包括：
- a) 注入与抽提速率应相互匹配，避免地下水水位过度波动；
 - b) 修复药剂的投加量应按土壤和地下水总污染负荷计算；
 - c) 处理时间应协调，避免因单一技术延长造成整体工期延误。

6.5.4 二次污染控制

- 协同修复工程实施中应采取以下二次污染控制措施：
- a) 废水、废气和固体废物应分类收集处理；
 - b) 原位修复应防止污染物向非目标区域扩散；
 - c) 异位修复应采取扬尘、噪声和异味控制措施；
 - d) 修复完成后应对施工区域进行清理和恢复。

7 协同修复工程设计

7.1 土壤修复工程设计

7.1.1 原位注入系统设计

7.1.1.1 注入井布设要求

注入井应在平面上完全覆盖目标修复区块，并适度扩展至污染边界以外。井深宜超过修复区底部0.5 m，修复区深度超过4 m时应分层布设。井间距根据地层渗透性和药剂扩散半径确定，扩散半径应通过现场试验验证。

7.1.1.2 注入系统设备配置

注入系统应包括药剂配制、输送和注入单元。配制单元应具备计量、混合和储存功能。输送管道应耐腐蚀、密封良好。注入泵的压力和流量应可调，注入压力不应超过地层破裂压力。

7.1.1.3 注入工艺参数设计

注入流量、压力、时间和药剂浓度应根据室内试验和现场中试结果确定。注入方式可采用连续注入或脉冲注入，脉冲注入宜采用“注入—反应—再注入”的循环方式。

7.1.2 原位热脱附系统设计

7.1.2.1 加热井布设

加热井应覆盖全部污染区域，井间距根据土壤热传导系数确定，应通过现场试验验证。加热温度根据污染物沸点和土壤性质确定。

7.1.2.2 抽提系统设计

抽提系统应与加热系统同步设计，抽提能力应与加热范围相匹配。抽提出的气体应经处理后达标排放，冷凝水应纳入废水处理系统。

7.1.3 异位土壤处理系统设计

7.1.3.1 开挖工程设计

开挖范围和深度根据污染土壤分布确定，开挖深度不应低于污染深度。基坑支护设计应考虑土质条件和开挖深度。开挖分层厚度不宜大于2 m。

7.1.3.2 处理系统设计

处理系统应根据土壤性质（含水率、粒径、有机质含量）和污染物类型选择适宜工艺。异位热脱附进料含水率不宜大于20%，粒径不宜大于5 cm~10 cm。处理系统应设置筛分、破碎和含水率调节等预处理单元。

7.1.3.3 处理后土壤处置

处理后土壤的暂存和处置应满足环保要求。达标土壤可回填或资源化利用，回填前应对基坑底部和侧壁进行验收采样检测。

7.2 地下水修复工程设计

7.2.1 原位注入系统设计

7.2.1.1 注入井布设要求

注入井应覆盖污染羽范围，井深应穿透污染含水层至底部以下0.5 m。井间距根据含水层渗透性和药剂扩散半径确定，应通过现场注入试验验证。含水层渗透系数不小于 10^{-4} cm/s时宜优先采用原位注入方式。

7.2.2 空气注入系统设计

7.2.2.1 注入井布设要求

空气注入井应覆盖挥发性有机物污染羽范围，井间距根据含水层渗透性和空气影响半径确定，影响半径应通过现场试验验证。

7.2.2.2 注入系统设备配置

空压机能力应与注入井数量匹配，注入压力应根据含水层破裂压力确定，不应造成地层破坏。系统应具备压力和流量调节功能。

7.2.3 抽出处理系统设计

7.2.3.1 抽水井布设要求

抽水井应布设在污染羽中心或下游，井深应穿透污染含水层，滤水管位置与污染深度一致。井管内径不宜小于140 mm，成孔孔径应大于井管外径100 mm。

7.2.3.2 抽出水处理工艺设计

抽出水处理工艺根据污染物类型和出水用途确定，可采用吹脱、活性炭吸附、化学氧化或生物处理。系统应具备水质在线监测能力。

7.2.3.3 出水水质要求

处理后的出水应满足GB 8978的规定。回注地下的出水水质不应低于容纳含水层的现状水质。

7.3 协同集成设计

7.3.1 水土井位共用

土壤和地下水修复区域重合时，注入井和监测井应共用井位。同一井位应同时满足土壤和地下水修复的注入或监测需求，井深应以两者中的较大值为准。

7.3.2 修复进度协调

土壤和地下水修复应以周期较长的介质为基准安排整体工期。修复药剂的投加应同时考虑两个介质中污染物的去除需求，抽提与注入的流量应保持平衡。

7.3.3 水土界面控制

在水土界面附近应设置过渡区，防止修复过程中污染物在界面间二次迁移。界面附近应设加密监测点，监测浓度、水位和水质变化。

7.3.4 监测系统集成

监测点应统筹布设实现水土同步监测。监测指标应涵盖土壤和地下水污染物浓度及修复过程参数。监测数据应实时采集和统一管理，任一介质数据异常时应同步调整两个介质的工艺参数。

7.3.5 安全与环保设计

可能产生有毒有害气体的区域应设置通风和气体检测报警装置。二次污染防治设施处理能力应满足两个介质修复工程产生的最大污染物排放量。

8 协同修复工程施工

8.1 土壤修复施工

8.1.1 原位注入施工

8.1.1.1 一般规定

施工前应完成注入井建设，复核井位坐标、井深和滤水管位置。施工应按经审批的方案执行，过程中应实时监测注入区域的土壤和地下水位变化。

8.1.1.2 成井施工

成孔宜采用套管旋挖成孔工艺，避免泥浆造成二次污染。井管安装应垂直、牢固，滤水管位置与污染深度一致，滤料填充应均匀密实。井口应设置保护装置并标识编号。

8.1.1.3 化学氧化/还原注入施工

注入前应通过小试或中试确定药剂配方、注入方式、影响半径和注射深度。高压旋喷注入压力宜为20 MPa~30 MPa，流量宜为20 L/min~120 L/min。药剂添加比例宜为1%~3%，注入后应封闭养护。

8.1.2 原位热脱附施工

应按加热井和抽提井的设计位置进行成孔和安装。施工中应监测加热区域的温度场分布，确保达到设计加热温度。抽提系统应同步运行。

8.1.3 异位开挖施工

开挖前应通过测量放线确认范围和深度。开挖应自上而下分层进行，每层深度不宜大于2m。开挖出的土壤应按污染物类型分类堆放，并采取防雨、防渗和覆盖措施。

8.1.4 异位处理施工

施工前应对土壤进行筛分、破碎和含水率调节。热脱附进料含水率不宜大于20%，粒径不宜大于5cm~10cm。处理后土壤应采样检测，达标后方可回填。

8.2 地下水修复施工

8.2.1 原位注入施工

8.2.1.1 一般规定

施工前应完成注入井或抽提井的建设和洗井。洗井水量不应少于井筒水量的3倍，直至出水清澈、pH值和电导率稳定。

8.2.1.2 化学氧化/还原注入施工

药剂应按设计浓度、速率和顺序注入。注入过程中应监测地下水水位、pH值、氧化还原电位和污染物浓度变化，注入完成后应进行效果跟踪监测。

8.2.2 空气注入施工

施工前应完成注入井建设和空压机系统安装。注入压力应根据地层破裂压力确定。施工中应监测地下水位、溶解氧和污染物浓度变化。

8.2.3 抽水井施工

井深不应少于修复深度。井管内径不宜小于140 mm，成孔孔径应大于井管外径100 mm，滤水管开孔率不宜小于10%。施工后应进行洗井和抽水试验。

8.2.4 抽出水处理系统施工

处理系统应根据污染物类型和出水用途配置，可选用吹脱、活性炭吸附、化学氧化或生物处理等工艺。系统应具备水质在线监测能力。

8.3 协同作业控制

8.3.1 施工时序协调

土壤修复与地下水修复的施工时序应合理安排。原位注入与抽提的施工应同步推进，注入与抽提流量应保持动态平衡，偏差不应超过设定值的±10%。

8.3.2 水土界面保护

应防止污染物在水土界面间发生二次迁移。界面附近应设加密监测点，水位变化幅度不应超过±0.3 m。地下水修复施工不应造成土壤中污染物重新释放。

8.3.3 交叉污染控制

不同修复技术的作业区域之间应设置隔离措施。药剂注入应通过示踪试验验证扩散范围，确保不扩散至非目标区域。异位开挖区与原位修复区之间应设隔离带。

9 过程监测

9.1 土壤监测

9.1.1 污染物浓度监测

修复过程中应定期监测土壤中目标污染物的浓度变化。监测频次应根据修复技术类型和修复工期确定。监测点位应覆盖污染区域的不同位置和深度。

9.1.2 过程参数监测

土壤修复过程中应监测以下参数：

- a) 土壤 pH 值、含水率、温度；
- b) 修复药剂的残留浓度（如适用）；
- c) 土壤氧化还原电位（生物修复适用）。

9.2 地下水监测

9.2.1 污染物浓度监测

修复过程中应定期监测地下水中目标污染物的浓度变化。监测井应覆盖污染羽的上游、中心及下游。监测频次每月不应少于1次。

9.2.2 水文地球化学参数监测

地下水修复过程中应监测以下参数：

- a) 水位、水温、pH 值、电导率、溶解氧；
- b) 氧化还原电位；
- c) 修复药剂或指示参数浓度。

9.3 协同监测

9.3.1 同步采样与检测

土壤和地下水监测应在同一时间节点进行采样，覆盖修复前、修复中关键节点和修复后。同步检测数据应进行关联分析。

9.3.2 界面迁移监测

应在土壤—地下水界面附近设置加密监测点，监测界面附近土壤中污染物的垂向浓度分布变化、界面附近地下水水位和水质变化以及污染物在界面处的通量变化。

9.4 监测数据管理

9.4.1 数据记录与整理

监测数据应及时记录、整理和归档。原始记录应保存完整，不得涂改。

9.4.2 数据分析与报告

监测数据应定期统计分析，编制监测报告，内容包括监测结果、趋势分析和异常情况说明。

10 修复效果评估

10.1 采样与检测

10.1.1 土壤采样与检测

修复效果评估的土壤采样应符合HJ 25.5的规定。基坑底部采样单元每个样品代表的土方量不应超过500 m³。基坑深度大于1 m时，侧壁应进行垂向分层采样。异位修复后土壤应按处理批次或堆体进行采样，采样点数量应符合HJ 25.5的要求。

10.1.2 地下水采样与检测

修复效果评估的地下水采样应符合HJ 25.6的规定。监测井应覆盖修复区域，采样点数量应满足统计要求。采样前应进行洗井，采样深度应在监测井水面下0.5 m以下。

10.2 达标判断

10.2.1 土壤效果判断

各采样点的污染物浓度均不应超过修复目标值。采用均值检验时，应按照HJ 25.5的方法进行t检验。超标采样点的比例不应超过规定的可接受限值。

10.2.2 地下水效果判断

各监测井的污染物浓度均不应超过修复目标值。应采用趋势检验方法判断污染物浓度是否呈持续下降趋势。连续三次监测（间隔不少于1个月）结果均达标时，可判定达标。

10.2.3 整体效果综合判断

土壤和地下水修复效果均应独立达标。应分析两个介质污染物浓度的关联变化并评估修复工程是否造成二次污染。整体效果达标后应编制效果评估报告。

10.3 效果评估报告编制

10.3.1 报告内容

效果评估报告应包括以下内容：

- a) 项目概况和修复目标；
- b) 修复工程实施情况；
- c) 采样布点与检测结果；
- d) 达标判定与分析；
- e) 二次污染评估；
- f) 结论与建议等。

10.3.2 报告审核

效果评估报告的编制和审核应按HJ 25.5的规定执行。报告应经专家评审通过后方可作为工程验收的依据。

附 录 A
(资料性)
协同修复技术组合适用性指引

A.1 协同修复技术组合适用性初判

不同协同修复技术组合的适用性受场地条件影响较大，表A.1可作为技术筛选阶段的初判参考，具体方案应以现场中试结果为准。

表 A.1 协同修复技术组合适用性初判

判断因素	宜选用原位—原位	宜选用异位—异位	宜选用原位—异位
污染深度	>4 m	≤3 m	土壤>4 m，地下水范围广
地面条件	有建构筑物	空地	部分有建构筑物
修复工期	不紧迫	紧迫	中等
含水层渗透性	≥10 ⁻⁴ cm/s	不限	≥10 ⁻⁴ cm/s
污染羽范围	明确	明确	范围较大

A.2 应用说明

表A.1适用于协同修复技术方案制定阶段的组合类型初步筛选。场地具体技术组合的选择应根据污染物类型、浓度分布和修复目标，结合现场中试结果综合确定，不宜仅依据表A.1做出最终决策。