|  |  |
| --- | --- |
| ICS | 13.060.10 |
| CCS | |  | | --- | | D:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T.pngD:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T后面的反斜杠.png XJBX |   Z 06 |

西安市计量标准检测认证协会团体标准

T/XJBX 0055—2025

地下水污染原位修复技术指南

Guidelines for in-situ groundwater pollution remediation technology

2025 - XX - XX发布

2025 - XX - XX实施

西安市计量标准检测认证协会  发布

目次

[前言 III](#_Toc205625253)

[引言 V](#_Toc205625254)

[1 范围 1](#_Toc205625255)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc205625256)

[3 术语和定义 1](#_Toc205625257)

[4 总则 2](#_Toc205625258)

[5 技术原理与适用条件 3](#_Toc205625259)

[6 工艺设计与施工要求 3](#_Toc205625260)

[7 运行与维护 4](#_Toc205625261)

[8 效果评估与验收 5](#_Toc205625262)

[9 安全与环境管理 6](#_Toc205625263)

[10 附则 7](#_Toc205625264)

1. 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。

本文件由西安市计量标准检测认证协会提出并归口。

本文件起草单位：扬州市生态环境局。

本文件主要起草人：李晖。

1. 引言

地下水是重要的战略性水资源，广泛用于饮用、农业灌溉和工业生产。然而，随着工业化和城市化的加速发展，地下水污染问题日益突出，污染物类型多样、分布范围广、隐蔽性强、修复难度大，已经对区域生态环境安全和人类健康构成严重威胁。

本文件表述的地下水污染原位修复技术，是指在不抽出地下水的情况下，通过物理、化学、生物等技术手段直接在地下含水层或污染羽内对污染物进行去除、转化或固定，以恢复地下水的环境功能和使用价值。该技术具有扰动小、修复效率高、适用范围广等优势，适合在污染场地、工业园区、矿山区域及城市地下水系统中推广应用。

本文件在总结国内外地下水原位修复技术发展经验的基础上，结合我国不同类型地下水污染特征与修复工程实践，系统规定了原位修复的总体要求、技术原理、工艺选择、设计与施工、运行与维护、效果评估以及安全与环境管理等内容，为地下水污染治理提供系统的技术指导和实施依据。

本文件旨在引导各类地下水污染治理工程合理选择与集成修复技术，提高修复的科学性、经济性与可持续性，推动地下水环境质量的整体改善与长期稳定。

地下水污染原位修复技术指南

* 1. 范围

本文件表述了地下水污染原位修复的总体要求、技术原理与适用条件、工艺设计与施工要求、运行与维护、效果评估与验收以及安全与环境管理等技术内容。

本文件适用于受无机污染物、有机污染物及其混合污染影响的地下水原位修复工程，包括但不限于工业场地、化工园区、矿山区域、垃圾填埋场及农业面源污染区的修复工作。

各类科研试验性地下水污染原位修复项目及其他需要采用原位修复技术的工程，可参照本文件执行。

* 1. 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/T 14848—2017 地下水质量标准

GB/T 19772—2005 城市污水再生利用 地下水回灌水质

GB/T 35401—2017 地下水检测移动实验室通用技术规范

HJ 164—2020 地下水监测技术规范

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

地下水污染 groundwater pollution

由于人类活动或自然过程导致有害物质进入地下含水层，使地下水的水质恶化并影响其使用功能的现象。

原位修复 in-situ remediation

在不抽出地下水的条件下，通过物理、化学或生物等技术手段直接在含水层中去除、转化或固定污染物的修复方法。

渗透反应墙 permeable reactive barrier

设置在地下水流动路径上的高渗透性填充墙体，通过填充材料与污染物发生物理、化学或生物反应以去除污染物的地下水修复设施。

生物强化 biostimulation

向地下水系统中投加营养物质或电子受体/供体，以刺激并增强原位微生物降解污染物的过程。

生物增殖 bioaugmentation

向污染地下水中引入特定功能的微生物菌种，以提高污染物降解速率和效率的修复方法。

化学氧化 chemical oxidation

在污染羽区直接注入氧化剂（如高锰酸钾、过硫酸盐等）与污染物发生氧化反应，从而降解有害物质的修复技术。

自然衰减 monitored natural attenuation

依靠地下水系统中自然存在的物理、化学和生物过程降低污染物浓度，并通过长期监测验证其有效性和安全性的修复方式。

* 1. 总则

本文件表述的地下水污染原位修复应以风险管控为核心目标，遵循“科学选型、因地制宜、系统集成、持续监测”的原则，确保修复过程的安全性、有效性和可持续性。

原位修复技术的选择与实施应基于充分的前期调查与风险评估，结合地下水水文地质条件、污染物类型与分布特征、场地利用现状以及经济可行性综合确定。

修复工程应优先采用绿色、低扰动、低能耗的技术和材料，减少二次污染和生态破坏，并兼顾工程施工的可操作性与运行维护的便利性。

原位修复过程应建立完善的监测体系，覆盖修复前、中、后的全周期，监测内容应包括地下水水质变化、含水层水文特征变化及可能的修复副产物。

修复工作应与土地再利用规划、生态修复措施和周边环境保护要求相协调，做到工程实施与区域环境管理的有机结合。

施工及运行单位应建立安全管理制度，落实设备运行安全、化学药剂安全、生物制剂管理及突发事件应急响应等措施。

* 1. 技术原理与适用条件
     1. 总体要求

地下水污染原位修复技术应根据污染物的理化性质、地下水流动条件、场地水文地质结构以及修复目标，选择合适的工艺路线。不同技术可单独使用，也可组合应用以提高修复效率和经济性。

* + 1. 主要技术原理

渗透反应墙：利用高渗透性反应介质与污染物直接接触，通过吸附、沉淀、化学反应或生物降解等作用降低污染物浓度。

化学氧化/还原：通过投加化学药剂（如高锰酸钾、过硫酸盐、零价铁等）氧化或还原污染物，实现其无害化或易降解化。

生物修复：利用自然存在或外加的微生物群体分解有机污染物，或通过改变环境条件促进微生物活性。

气提与曝气：在含水层中注入空气或氧气，使挥发性有机污染物从水相转移到气相，再通过抽气系统收集处理。

原位固化/稳定化：向污染区注入固化剂或稳定剂，使污染物转化为难溶或固定形态，减少其迁移性与生物可利用性。

自然衰减：依赖物理稀释、吸附沉积、化学降解及生物降解等自然过程减少污染物浓度，并通过监测验证修复效果。

* + 1. 技术适用条件

常用地下水原位修复技术的适用性、优点与局限性见表1。

1. 常用地下水污染原位修复技术适用条件

| 技术类型 | 适用污染物 | 场地条件 | 优点 | 局限性 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 渗透反应墙 | 重金属、氯代烃、硝酸盐等 | 地下水流向稳定、污染羽范围明确 | 长期运行稳定、维护成本低 | 施工需开挖或钻探、初期投资较大 |
| 化学氧化/还原 | 氯代烃、石油烃、苯系物等 | 含水层渗透性适中、污染物易接触氧化剂 | 反应速度快、适用范围广 | 药剂成本高、可能产生副产物 |
| 生物修复 | 有机污染物（石油烃、氯代烃等） | 有利于微生物生长的温度、pH及氧化还原条件 | 环境友好、可长期运行 | 修复周期长、受环境条件影响大 |
| 气提/曝气 | 挥发性有机物（BTEX、氯代烃等） | 渗透性较高的砂砾层、浅层地下水 | 技术成熟、效果显著 | 不适合非挥发性污染物 |
| 固化/稳定化 | 重金属、多环芳烃等 | 含水层渗透性低、污染物迁移风险高 | 阻断迁移风险、施工周期短 | 不能降低污染物总量 |
| 自然衰减 | 多种污染物 | 污染负荷低、自然降解能力强的场地 | 成本低、扰动小 | 修复周期不可控、需长期监测 |

* 1. 工艺设计与施工要求
     1. 总体要求

地下水污染原位修复的工艺设计与施工应基于详尽的场地调查和水文地质分析，明确污染物种类、分布特征、浓度水平及迁移趋势。设计方案应充分考虑修复目标、技术可行性、经济性及对周边环境的影响，并进行风险评估。

* + 1. 设计要求

勘察与数据收集：包括钻孔布设、地下水位测量、水文地质剖面绘制、污染物空间分布测定等。

工艺参数确定：依据实验室试验和现场试验数据，确定药剂浓度、注入速率、反应时间、反应介质种类等。

系统集成设计：明确修复单元、监测单元和辅助单元的布局与连接方式，确保施工与运行的可操作性。

安全与环保设计：对化学药剂、生物制剂及施工机械的使用进行安全设计，防止二次污染。

* + 1. 施工要求

施工前应进行详细的施工组织设计与技术交底。

钻孔、布管及设备安装应符合相关工程施工标准，确保密封性与耐久性。

药剂注入、反应介质填充、曝气系统安装等过程应严格控制参数。

施工期间应采取防护措施，防止施工扰动导致污染物迁移。

完工后应进行系统调试与试运行，确保达到设计要求。

* + 1. 关键设计参数

不同修复技术在设计时应关注的关键参数见表2。

1. 常用地下水污染原位修复技术关键设计参数

| 技术类型 | 关键参数 | 推荐范围或控制要求 |
| --- | --- | --- |
| 渗透反应墙 | 墙体厚度 | 0.5～1.5 m，根据地下水流速与污染物浓度确定 |
| 化学氧化/还原 | 氧化剂/还原剂浓度 | 根据污染物性质和含水层渗透性，通过试验确定 |
| 生物修复 | 营养剂投加浓度 | 维持微生物活性所需的最小浓度，防止过量引发副作用 |
| 气提/曝气 | 注气压力 | 高于含水层静水压力10%～20%，避免扰动含水层结构 |
| 固化/稳定化 | 固化剂添加比例 | 视污染物类型及土壤性质而定，一般为5%～15% |
| 自然衰减 | 监测周期 | 至少每季度一次，必要时增加频次 |

* 1. 运行与维护
     1. 总体要求

地下水污染原位修复系统在运行期间应保持持续稳定的修复效果，运行管理应覆盖系统监测、运行参数优化、设备维护及安全管理等环节，确保修复目标按计划实现。

* + 1. 运行管理

运行监测：持续监测地下水水质、流速、流向及修复系统运行状态。

参数优化：根据监测结果动态调整药剂投加量、曝气压力、营养剂浓度等运行参数。

运行记录：建立运行日志，记录每日运行情况、异常情况和处理措施。

应急响应：发现设备故障、药剂泄漏或污染物浓度异常升高时，应立即启动应急预案。

* + 1. 维护要求

定期对修复系统各单元进行检查与保养，及时更换损耗性材料。

对关键设备（泵、曝气机、监测仪器等）进行周期性检修与校准。

对电气系统和自动控制系统进行功能测试，确保信号传输与执行机构的可靠性。

检查并维护场地防护措施，防止外部因素干扰系统运行。

* + 1. 维护要点

常用地下水原位修复系统的运行与维护要点见表3。

1. 常用地下水原位修复系统运行与维护要点

| 技术类型 | 维护重点 | 维护周期 | 注意事项 |
| --- | --- | --- | --- |
| 渗透反应墙 | 检查介质渗透性与反应活性 | 每半年一次 | 必要时更换或补充反应介质 |
| 化学氧化/还原 | 检查药剂储罐、投加设备运行状态 | 每月一次 | 防止药剂泄漏，定期检测管路腐蚀 |
| 生物修复 | 检测微生物活性与营养剂浓度 | 每季度一次 | 防止过量营养剂引发二次污染 |
| 气提/曝气 | 检查气泵与管道密封性 | 每月一次 | 避免气体泄漏和含水层扰动 |
| 固化/稳定化 | 检测固化体完整性 | 每半年一次 | 防止裂隙形成导致污染物再迁移 |
| 自然衰减 | 定期采样监测水质变化 | 每季度一次 | 必须结合风险评估调整监测频次 |

* 1. 效果评估与验收
     1. 总体要求

地下水污染原位修复的效果评估应以修复目标达成度为核心，综合考虑水质改善情况、污染物削减率、风险消除程度及生态环境恢复效果。评估工作应在修复阶段性目标和最终目标完成后开展，并通过现场监测和实验室检测验证结果的可靠性。

* + 1. 评估方法

水质监测：在污染源区、迁移区及下游控制点采集地下水样品，分析主要污染物浓度变化。

水文地质条件检测：监测含水层水位、水力梯度和流速变化，评估修复对地下水流动的影响。

生态恢复评价：在条件允许的情况下，对修复区域相关生态指标进行调查与分析。

风险再评估：结合修复后数据，对人群健康风险和生态风险进行再评估。

* + 1. 验收程序

验收程序如下：

1. 工程实施单位提交修复效果评估报告及相关监测数据；
2. 第三方检测机构对修复效果进行独立检测与验证；
3. 行业主管部门或相关验收机构组织专家组进行现场核查和资料评审；
4. 确认修复目标达成并符合相关标准要求后，出具工程验收意见。
   * 1. 评估指标体系

修复效果的主要评估指标见表4。

1. 地下水污染原位修复效果评估指标体系

| 评价维度 | 指标 | 评价要求 | 检测方法 |
| --- | --- | --- | --- |
| 水质改善 | 主要污染物浓度降低率 | ≥设计目标值 | 实验室分析（依据相关标准） |
| 水质改善 | 水质达标率 | 达到相关地下水质量标准 | 实验室分析 |
| 风险控制 | 饮用水安全性 | 无超过限值的有害物质 | 实验室分析与风险评估 |
| 风险控制 | 迁移风险消除率 | ≥设计目标值 | 水文地质监测 |
| 系统运行 | 设备完好率 | ≥95% | 运行记录与现场检查 |
| 系统运行 | 修复措施稳定性 | 无重大故障或失效 | 现场检查与运行记录 |

* 1. 安全与环境管理
     1. 总体要求

地下水污染原位修复的安全与环境管理应贯穿项目全生命周期，涵盖施工准备、运行维护、药剂与设备管理以及应急处置等环节。管理措施应符合相关法律法规和标准要求，确保作业人员安全、环境不受二次污染，并具备突发事件的应急响应能力。

* + 1. 安全管理要求

施工安全：施工人员须经过安全培训并持证上岗，现场应设置安全标识、防护设施及紧急撤离通道。

药剂管理：化学药剂应分类储存、专人管理，严格控制配比与投加量，防止泄漏和误用。

设备安全：关键设备应有防护罩、接地保护及紧急停机功能，并定期检修。

作业防护：人员作业时应佩戴相应的个人防护装备（PPE），包括防护手套、防护眼镜、防化服等。

* + 1. 环境保护要求

废液与废气处理：施工和运行中产生的废液、废气应收集处理达标后排放。

固体废弃物管理：更换下来的反应介质、废滤料等应按危险废物管理规定处理。

生态保护：避免破坏周边植被、地表水体和土壤结构，必要时采取临时覆盖、隔离等保护措施。

* + 1. 风险与应对措施

常见安全与环境风险及应对措施见表5。

1. 地下水污染原位修复常见风险与应对措施

| 风险类型 | 主要风险表现 | 应对措施 |
| --- | --- | --- |
| 化学药剂泄漏 | 对地下水和土壤造成二次污染 | 停止投加、封堵泄漏点、收集并中和药剂 |
| 设备故障 | 修复系统停运或效率下降 | 启动备用设备、进行紧急检修 |
| 作业人员中毒 | 吸入有害气体或接触有毒物质 | 立即撤离现场、实施急救、送医治疗 |
| 噪声与粉尘超标 | 影响周边居民及生态 | 设置隔音屏障、喷雾降尘 |
| 含水层扰动 | 导致污染物迁移加快 | 调整施工工艺、降低施工强度 |

* + 1. 应急响应

应建立应急预案，并定期演练。

应急物资（吸附材料、应急泵、备用发电机等）应储备充足且便于取用。

突发事件处置完成后，应开展事故调查与原因分析，并修订相关管理制度和应急预案。

* 1. 附则

本文件由发布单位负责解释。

本文件在实施过程中，如相关法律法规、技术标准或行业规范进行修订，应及时对本文件进行评估，并在必要时进行修订，以确保其与最新要求保持一致。

本文件所引用的标准和技术文件，如被修订或替代，除非另有说明，应采用其最新版本。

本文件自发布之日起实施，适用于地下水污染原位修复工程的设计、施工、运行、评估及管理工作，其他类型地下水污染治理项目可参照执行。

