

# T/GXAS

团 体 标 准

T/GXAS 873—2024

## 有色金属矿区砷及伴生重金属 污染场地修复技术规范

Technology specification for arsenic and associated heavy metals  
pollution site in non-ferrous metal mining areas

2024 - 12 - 03 发布

2024 - 12 - 09 实施

广西标准化协会 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 工作流程 .....	1
5 场地调查与风险评估 .....	2
6 污染场地土壤修复 .....	2
7 污染场地地下水修复 .....	4
8 修复效果评估 .....	5
附录 A（资料性） 修复技术适用范围和技术特点 .....	7
参考文献 .....	9



## 前 言

本文件参照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。

本文件由广西壮族自治区环境保护产业协会提出、归口并宣贯。

本文件起草单位：桂润环境科技股份有限公司、广西科学院、北京科技大学、大连理工大学、广西壮族自治区环境保护产业协会、中南大学、华南农业大学、中节能铁汉生态环境股份有限公司

本文件主要起草人：涂方祥、薛天利、韦崇高、王晓飞、覃霞、傅平丰、陆柳鲜、刘广义、孙美娟、梁琳、黎华寿、张瑛、李灵知、王少锋、梁斌、李国、覃茜、裴福云、张余亮、邓威、廉宇萍、黄付平、何少媚、祁莘月。



# 有色金属矿区砷及伴生重金属污染场地修复技术规范

## 1 范围

本文件界定了有色金属矿区砷及伴生重金属污染场地修复技术涉及的术语和定义，规定了有色金属矿区砷及伴生重金属污染场地修复工作流程、场地调查与风险评估、污染场地土壤修复、污染场地地下水修复和修复效果评估的技术要求。

本文件适用于有色金属矿区砷及伴生重金属（镉、铅、锑、汞）污染场地修复工作。

## 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 36600 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 25.4 污染场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
- HJ 164 地下水环境监测技术规范
- HJ/T 166 土壤环境监测技术规范标准
- HJ 1282 污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化
- HJ 662 水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范
- DB45/T 2426 铅锌矿采选行业地块土壤污染风险管控和修复效果评估技术规范
- DB45/T 2556 建设用地土壤污染风险筛选值和管制值

## 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

对潜在污染场地进行调查和风险评估后，确认污染危害超过人体健康或生态环境可接受风险水平的场地。

### 3.2

**异位修复** ex-situ remediation

将受污染的土壤或地下水从污染场地原来位置挖掘或抽提出来，搬运或转移到其他场所或位置进行治理修复。

[来源：HJ 682—2019 2.5.4]

### 3.3

**原位修复** in-situ remediation

不移动受污染的土壤或地下水，直接在污染场地原来位置对其进行修复或处理。

[来源：HJ 682—2019 2.5.3]

## 4 工作流程

工作流程见图1。

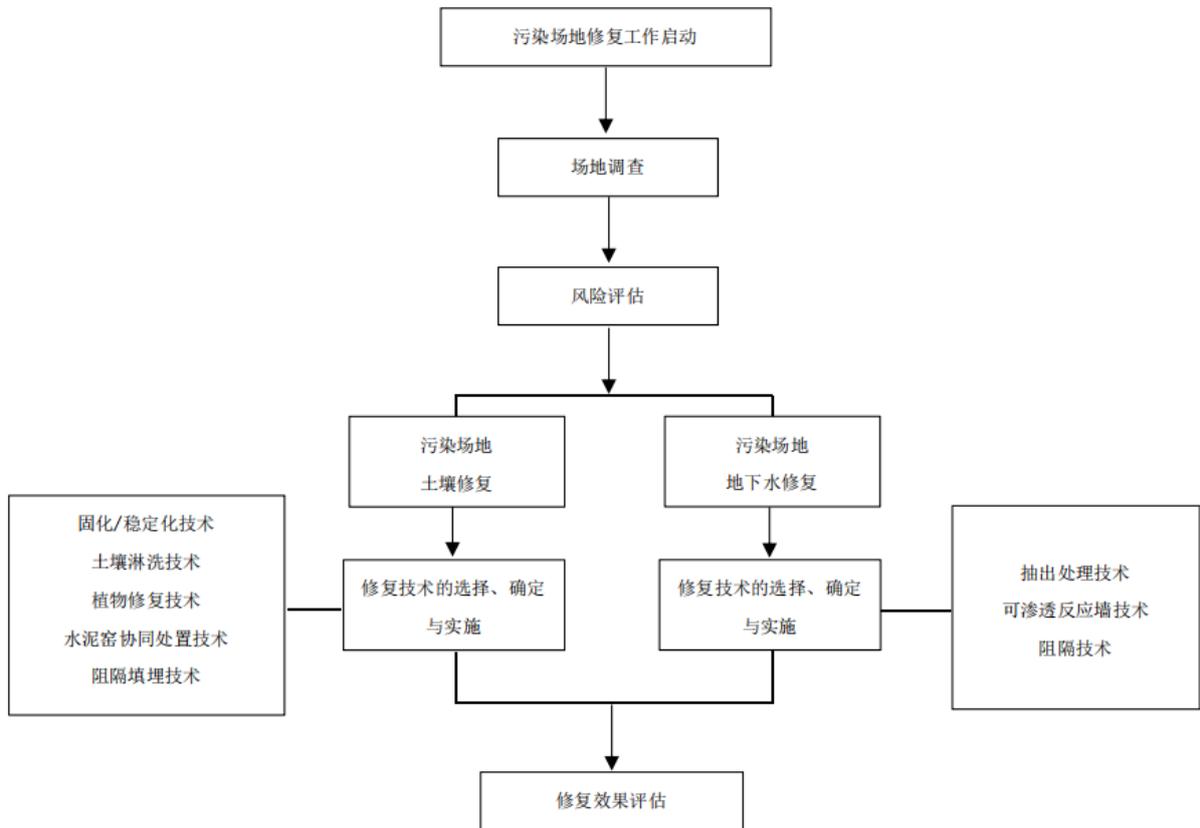


图1 工作流程图

## 5 场地调查与风险评估

### 5.1 场地调查

场地调查分为第一阶段土壤污染状况调查、第二阶段土壤污染状况调查和第三阶段土壤污染状况调查三个阶段，三个阶段调查工作按照HJ 25.1、HJ 25.2、环境保护部公告2017年第72号、桂环规范（2021）2号规定执行。

### 5.2 风险评估

按照HJ 25.3规定执行。

## 6 污染场地土壤修复

### 6.1 修复技术的选择与确定

#### 6.1.1 选择修复思路

在分析前期污染土壤污染状况调查和风险评估资料的基础上，根据水文地质条件、目标污染物、修复目标、修复范围和修复时间长短，选择确定场地修复的总体思路。

#### 6.1.2 分析比较修复技术

结合场地污染物特征、土壤特性、水文地质条件，从修复模式、技术成熟度、目标污染物、修复的效果、时间、成本和环境风险等方面分析，宜采用比较分析、矩阵评分、类比等方法，比较现有的

修复技术的适用范围和技术特点见附录 A.1，重点对各修复技术工程应用的实用性进行分析，初步筛选一种或多种备选修复技术进行下一步可行性评估。

### 6.1.3 修复技术可行性评估

按照 HJ 25.4 规定进行。

### 6.1.4 修复技术的确定

在分析比较修复技术优缺点和开展技术可行性评估的基础上，从技术的成熟度、适用条件、对场地土壤修复的效果、成本、时间和环境安全性等方面对各备选修复技术进行综合比较，选择确定修复技术。

## 6.2 污染场地土壤修复技术

### 6.2.1 固化/稳定化技术

#### 6.2.1.1 修复方法

向污染土壤中添加固化药剂或稳定化药剂，经充分混合，使其与土壤污染物发生物理作用、化学作用及生物作用，将污染物固定在固体结构中或转化成化学性质不活泼形态，降低污染物在土壤环境中的迁移和扩散。

#### 6.2.1.2 固化/稳定化修复药剂

6.2.1.2.1 土壤固化/稳定化修复药剂应高效，在使用过程中和使用后无生态环境影响、危害及风险，或产生的生态环境影响、危害及风险能控制或经评估能接受。

6.2.1.2.2 土壤固化/稳定化修复药剂中污染物的含量应小于 GB 36600 和 DB45/T 2556 中风险筛选值，除污染物的含量之外的其他要求按照 HJ 1282 规定执行。

6.2.1.2.3 砷污染土壤固化/稳定化修复药剂宜选用零价铁、铁盐、铁氧化物、钢渣及其他含铁材料等。

6.2.1.2.4 砷及伴生重金属复合污染土壤固化/稳定化修复药剂宜选用 6.2.1.2.3 中的材料与碱性材料（氧化钙、氧化镁、石灰石、氢氧化钙、粉煤灰、草木灰等）、吸附材料（活性炭、生物炭等、海泡石、蒙脱土、凹凸棒等）、硫化物（硫化钠、硫化钾等）中的一种或多种材料复配使用。

### 6.2.2 土壤淋洗技术

#### 6.2.2.1 修复方法

向污染土壤加入淋洗药剂，通过解吸、螯合、溶解等作用，将污染物从土壤胶体中溶解、分离出来并进行处理。

#### 6.2.2.2 土壤淋洗药剂

6.2.2.2.1 土壤淋洗药剂应高效、环境友好，在使用过程中和使用后无生态环境影响、危害及风险，或产生的生态环境影响、危害及风险能控制或经评估能接受。

6.2.2.2.2 砷污染土壤宜选用柠檬酸、磷酸二氢钾、乙二胺四乙酸（EDTA）、氢氧化钠、鼠李糖脂。

6.2.2.2.3 镉污染土壤宜选用 EDTA、草酸、柠檬酸、氯化铁、鼠李糖脂。

6.2.2.2.4 铅污染土壤宜选用 EDTA、草酸、柠檬酸。

6.2.2.2.5 锑污染土壤宜选用草酸、柠檬酸、酒石酸。

6.2.2.2.6 汞污染土壤宜选用亚硫酸钠、鼠李糖脂。

6.2.2.2.7 砷及伴生重金属复合污染土壤宜选用多种淋洗剂复配使用。

### 6.2.3 植物修复技术

#### 6.2.3.1 修复方法

利用超富集植物的富集、挥发、固定等作用去除土壤中的污染物质，修复被污染的土壤。

### 6.2.3.2 土壤修复植物

- 6.2.3.2.1 砷污染土壤宜选用蜈蚣草、大叶井口边草。
- 6.2.3.2.2 镉污染土壤宜选用东南景天、伴矿景天、龙葵、商陆、圆锥南芥、鬼针草。
- 6.2.3.2.3 铅污染土壤宜选用土荆芥、羽叶鬼针草、香根草、圆锥南芥。
- 6.2.3.2.4 锑污染土壤宜选用芒草、苕麻、狗牙根、蜈蚣草。
- 6.2.3.2.5 汞污染土壤宜选用蜈蚣草、芦竹、矮杨梅。
- 6.2.3.2.6 砷及其伴生重金属复合污染的土壤宜选用多种修复植物，采用间种套种的模式进行修复。

### 6.2.4 水泥窑协同处置技术

#### 6.2.4.1 修复方法

利用水泥回转窑内的高温、热稳定性好、碱性气氛、无废渣排放等特点，在生产水泥熟料的同时，将满足入窑要求或经过预处理的污染土壤投入水泥窑，通过高温煅烧实现污染土壤无害化处置。入窑配料中重金属、硫的浓度应满足HJ 662的要求。

### 6.2.5 阻隔填埋技术

#### 6.2.5.1 修复方法

将污染土壤或经过治理后的土壤置于防渗阻隔填埋场内，或通过敷设阻隔层阻断土壤中污染物迁移扩散的途径。按实施方式的不同，可分为原位阻隔覆盖和异位阻隔填埋：

- 原位阻隔覆盖通过在污染区域四周建设阻隔层，并在污染区域顶部覆盖隔离层，将污染区域四周及顶部完全与周围隔离；
- 异位阻隔填埋将污染土壤或经过治理后的土壤阻隔填埋在由高密度聚乙烯膜（HDPE）等防渗阻隔材料组成的防渗阻隔填埋场内。

## 7 污染场地地下水修复

### 7.1 修复技术的选择与确定

有色金属矿区砷及伴生重金属污染地下水修复技术的选择与确定按照HJ 25.6规定进行，现有的修复技术的适用范围和技术特点见附录A.2。

### 7.2 污染场地地下水修复技术

#### 7.2.1 抽出处理技术

##### 7.2.1.1 修复方法

通过在场地下水污染区域的上游建造注水井和在下流建造一定数量的抽水井，并在地表建造相应的污水处理系统，利用抽水井将污染地下水抽出地表，并利用地表处理技术将抽出的污水进行处理。地表处理技术可选择化学沉淀、活性炭吸附、氧化还原、膜分离、离子交换等方法。

#### 7.2.2 可渗透反应墙技术

##### 7.2.2.1 修复方法

在受污染地下水流经的路径上建造由反应材料组成的可渗透反应墙，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。

##### 7.2.2.2 反应材料

- 7.2.2.2.1 反应材料应具有高效性、导水性、安全稳定性和经济可行性。
- 7.2.2.2.2 砷污染地下水宜选择羟基氧化铁、铁屑、氢氧化亚铁、氢氧化铁及其他含铁材料等。
- 7.2.2.2.3 砷及伴生重金属复合污染地下水宜选用7.2.2.2.2中的材料与二亚硫酸盐、石灰、活性炭、沸石等进行复配使用。

## 7.2.3 阻隔技术

### 7.2.3.1 修复方法

采用阻隔、堵截、覆盖等工程措施，将污染物封闭于场地内，避免污染物对人体和周围环境造成风险、同时控制污染物随降水或地下水向周围环境迁移扩散。

## 8 修复效果评估

### 8.1 一般规定

修复效果评估主要包括污染场地概念模型更新、采样点位布设、样品采集与分析、修复效果分析与评价、效果评估报告编制等内容。

### 8.2 污染场地概念模型更新

8.2.1 在效果评估前应进行资料收集分析、现场踏勘、人员访谈工作，掌握地块风险管控与修复工程情况，对地块概念模型进行更新，完善污染场地修复后的概念模型。

8.2.2 收集、整理和分析涉及场地修复的相关资料，依据修复重点确定效果评估主要因素，核实和分析资料的完整性、有效性，收集资料详情按照 HJ 25.5 和 DB45/T 2426 规定进行。

8.2.3 应开展现场踏勘工作，包括施工设备运行状况、工程施工进度、施工现场遗留污染物处理情况、场地周边敏感受体和环境要素、现场施工状况和相关文件资料相符情况等。调查人员通过拍照、摄影、录音、现场笔记等方式记录现场踏勘情况。

8.2.4 效果评估中应开展人员访谈工作，全面了解污染场地风险管控、修复工程情况、环境保护措施落实情况。访谈对象包括污染场地责任人、调查评估负责人、实施方案编制负责人、监理人员、施工人员等。

8.2.5 基于资料整理、现场踏勘、人员访谈，更新污染场地概念模型，完善污染场地风险管控与修复实施后的概念模型。污染场地概念模型宜包括污染场地风险管控与修复情况、污染特征、地质与水文地质情况、受体与周边环境情况。

### 8.3 采样点位布设

#### 8.3.1 异位修复土壤采样

##### 8.3.1.1 采样节点要求：

- 对于清挖范围基坑底部与侧壁，在基坑清理之后、回填之前采样；
- 对于采用基础围护的基坑侧壁，在基坑清理同时进行基坑侧壁采样，或于基础围护实施后在围护设施外边缘采样；
- 按照时间节点，异位修复后的土壤在修复完成后、再利用之前采样，以堆体模式进行异位修复的土壤，在堆体拆除前采样；
- 对于基坑、异位修复后的土壤堆体，根据修复进度分批次采样。

##### 8.3.1.2 布点及采样方法具体有：

- 基坑底部采用系统布点法划分采样单元，将底部均分采样单元，每个采样单元网格大小不超过 20 m×20 m，最少采样点数量应符合 HJ 25.5 要求。若基坑坑底有被独立分隔的区域，各独立区域不得少于 2 个采样单元；
- 基坑侧壁采用等距离布点法划分横向采样单元，横向采样单元不超过 40 m；当修复深度不超过 1 m 时，侧壁不进行垂向分层采样；当基坑深度超过 1 m 时，侧壁应进行垂向分层采样，各层采样点之间垂向距离不超过 3 m；
- 对原地异位修复后的土壤等以 500 m<sup>3</sup> 为一个采样单元，在土壤堆体表层、中间和底层分别采集土壤样品制成一个混合样品；
- 对于按批次处理的修复技术，在符合原地异位修复后的土壤采样要求的同时，每批次至少采集 1 个样品。

### 8.3.2 原位修复土壤采样

8.3.2.1 应在修复完成后，根据修复进度和修复设施设置的情况分区域采样。

8.3.2.2 应采用系统布点法水平方向上布设采样点位，采样深度应超过调查评估确定的污染深度和修复可能造成污染物迁移的深度，垂向采样点间的距离应不大于 3 m。应在高浓度污染物聚集区、修复效果薄弱区、修复范围边界处等位置增设采样点。原位修复土壤采样数量按照 HJ 25.5 规定执行。

### 8.3.3 地下水采样

8.3.3.1 应在地下水中污染物浓度稳定达标，地下水流场状态稳定后，再进行地下水采样工作。

8.3.3.2 宜分别布设在场外上游区域、场地内部区域、场地外围下游区域，其中上游区域采样点至少 1 个，内部区域采样点至少 3 个，下游区域采样点至少 2 个。

8.3.3.3 原监测井数量不应超过效果评估时监测井总数的 60%。

8.3.3.4 修复内部区域采样网格不宜大于 80 m×80 m，污染物浓度高的区域，采样网格应小于 40 m×40 m。

8.3.3.5 应优先设置在修复设施运行薄弱区、地质与水文地质条件不利区域。

8.3.3.6 地下水采样的频次按照 HJ 25.6 规定执行。

### 8.4 样品监测

8.4.1 污染场地土壤样品的采集方法、现场质量保证、样品运输和保存方法、样品分析方法、实验室质量控制、监测报告编制等按照 HJ/T 166 执行。

8.4.2 污染场地地下水样品的采集法、现场质量保证、样品保存和流转、样品分析方法、实验室质量控制、监测报告编制等按照 HJ 164 执行。

### 8.5 修复效果分析与评价

8.5.1 污染场地土壤修复效果分析与评价按照 HJ 25.5 执行。

8.5.2 污染场地地下水修复效果分析与评价按照 HJ 25.6 执行。

### 8.6 效果评估报告编制

土壤和地下水效果评估报告应包括场地概况、地下水污染修复实施状况、环境污染防治落实情况、效果评估布点采样、检测结果分析、评估结论和后期环境监管建议等内容。

附录 A  
(资料性)  
修复技术适用范围和技术特点

### A.1 污染场地土壤修复技术

适用范围和技术特点见表A.1。

表A.1 污染场地土壤修复技术适用范围和技术特点表

技术名称	适用范围	技术特点
一、固化/稳定化技术	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适用于处理重金属类污染土壤，原位修复及异位修复均可使用；</li> <li>2. 原位固化/稳定化修复适用于满足原位药剂注入或搅拌混合施工的要求的场地和地层结构；</li> <li>3. 原位固化/稳定化修复宜用于深层 (&gt;5 m) 污染土壤的处理，适用于不宜进行土壤挖掘、缺乏储存和作业空间的场地，或污染区域无地下空间开发利用和施工的污染场地；</li> <li>4. 异位固化/稳定化修复适用于具备土壤开挖和基坑支护条件及地下水止水 and 降水条件的场地；</li> <li>5. 异位固化/稳定化修复宜用于浅层 (≤5 m) 污染土壤的处理，适用于修复后对土壤质量要求高的污染场地，或污染区域需要开发利用或施工的污染场地。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 技术成熟，国内广泛应用；</li> <li>2. 修复效率高，适用的pH值范围广；</li> <li>3. 工艺简单，有现成配套设备；</li> <li>4. 对于地下基础复杂的场地，工程施工成本较高。</li> </ol>
二、土壤淋洗技术	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适用于处理重金属类污染土壤，以及以污染物总量为验收目标的污染场地，原位修复及异位修复均可使用；</li> <li>2. 原位修复适用于水力传导系数10 cm/s~3 cm/s的多空隙、易渗透的土壤，如沙土、砂砾土壤、冲积土和滨海土等；</li> <li>3. 异位修复技术适用于土壤63 μm~75 μm细粒含量低于25%的土壤。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 修复效率高，技术较成熟，国内已有工程应用；</li> <li>2. 实现土壤重金属污染物的减量化；</li> <li>3. 无机淋洗剂具有成本低、效果好、速度快等优点，但易导致土壤肥力下降；</li> <li>4. 人工螯合剂价格较贵，生物降解性差，且淋洗过程易造成二次污染。</li> </ol>
三、植物修复技术	<p>适用于重金属污染土壤的原位修复，多用于污染浓度低，污染面积大、短期内暂时不开发利用的场地。</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 技术较成熟，修复成本低，国内已有工程应用；</li> <li>2. 不破坏植被土壤环境；</li> <li>3. 能实现土壤重金属污染物的减量化；</li> <li>4. 修复周期3年~8年；</li> <li>5. 重金属富集在植物体内需要进行后续处理。</li> </ol>
四、水泥窑协同处置技术	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适用于处理重金属污染土壤，不宜用于汞、砷、铅等重金属污染较重的土壤；</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 技术较成熟，适用范围较广，国内已有工程应用；</li> <li>2. 有利于重金属污染场地周转，实现资源化；</li> <li>3. 需协调水泥厂进行处置，容易受限于水泥厂协同处置污染土壤的处理能力；</li> <li>4. 耗能较大，对于含水率高、热值低的土壤需要消耗更多能量。</li> </ol>
五、阻隔填埋技术	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适用于重金属及复合污染土壤；</li> <li>2. 适用于暂不开发利用场地；</li> <li>3. 不宜用于污染物水溶性强或渗透率高的污染土壤；</li> <li>4. 不适用于地质活动频繁和地下水水位较高的地区。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 技术较成熟，适用范围较广，国内已有工程应用；</li> <li>2. 成本较低、实施周期短；</li> <li>3. 存在污染物泄漏风险；</li> <li>4. 阻隔填埋所占用区域将对影响场地的后续开发利用。</li> </ol>

## A.2 污染场地地下水修复技术

适用范围和技术特点见表A.2。

表A.2 污染场地地下水修复技术适用范围和技术特点表

技术名称	适用范围	技术特点
一、抽出处理技术	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适用于含水层渗透系数不小于 <math>5 \times 10^{-5}</math> cm/s 的粉砂至卵砾石的孔隙介质、基岩裂隙介质等；</li> <li>2. 开发场地及暂不开发场地均适用。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 技术较成熟，国内已有工程应用；</li> <li>2. 对地下水污染浓度高、埋深较大的场地有优势，设备简单，施工方便；</li> <li>3. 地表处理技术成熟，施工方便；</li> <li>4. 处理效率、成本中等；</li> <li>5. 修复周期较长，需要数年到数十年。</li> </ol>
二、可渗透反应墙技术	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适用于处理渗透性较好的孔隙、裂隙和岩溶含水层中的污染地下水；</li> <li>2. 适用于暂不开发利用的污染场地。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 技术较成熟，国内已有工程应用；</li> <li>2. 反应介质消耗较慢，具备几年甚至几十年的处理能力；</li> <li>3. 处理效率中等，处理成本中等；</li> <li>4. 修复周期较长，需要数年到数十年。</li> </ol>
三、阻隔技术	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适用于处理位置较浅的孔隙、岩溶和裂隙含水层中的地下水。</li> <li>2. 适用于暂不开发利用的污染场地。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 技术较成熟，国内已有工程应用；</li> <li>2. 施工方便，使用的材料较为普遍，可有效将污染物阻隔在特定区域；</li> <li>3. 处理效率中等，处理成本中等；</li> <li>4. 修复周期较长，需要数年或更长时间。</li> </ol>

### 参 考 文 献

- [1] HJ 682 建设用地土壤污染风险管控和修复术语
- [2] 关于发布《建设用地土壤环境调查评估技术指南》的公告（环境保护部公告2017年第72号）
- [3] 广西壮族自治区建设用地土壤污染情况调查、风险评估及效果评估报告技术审查要点（桂环规范（2021）2号）



中华人民共和国团体标准  
有色金属矿区砷及伴生重金属  
污染场地修复技术规范  
T/GXAS 873—2024  
广西标准化协会统一印制  
版权专有 侵权必究