

# 团 体 标 准

T/GDSES 17—2024

## 离子型稀土矿区场地土壤污染 钝化修复技术指南

Technical guidelines for immobilization remediation of  
site soil contamination in ion-adsorption rare earth  
mining area

2024-11-29 发布

2024-11-29 实施

## 目 次

前言	III
引言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 基本原则和工作程序	3
5 修复模式选择	5
6 修复技术论证	7
7 修复方案制定	8
8 修复工程实施	9
9 效果评估和工程验收	13
附录 A (资料性) 常用土壤钝化剂种类与适用范围	15
附录 B (资料性) 离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复技术应用案例	21
附录 C (资料性) 离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复方案编制大纲	21
附录 D (资料性) 离子型稀土矿区推荐植物种植清单	18
参考文献	24

## 前 言

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

请注意本标准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。

本文件由广东省环境科学研究院提出。

本文件由广东省环境科学学会归口。

本文件起草单位：广东省环境科学研究院、中国科学院广州地球化学研究所、广东工业大学。

本标准主要起草人：邓一荣、林龙勇、程胜、王贺丽、朱润良、朱建喜、冯义平、梁晓亮、陈情泽、李鸿博、钟音、姚谦、王俊、陆海建、李俊春、韩存亮、张宇霆、张纪伟、黄灶泉、李韦钰、莫健莹、张晓露、李晓源。

本文件首次制定。

全国环境科学学会标准  
山东省环境科学学会标准  
信息服务平台

## 引 言

随着我国离子型稀土矿产资源的持续开发，造成矿区生态破坏和环境污染问题日益突出，尤其是重金属和稀土元素的污染与流失。为贯彻落实《中华人民共和国土壤污染防治法》《土壤污染防治行动计划》（国发〔2016〕31号）《稀土管理条例》（中华人民共和国国务院令 第785号）《工矿用地土壤环境管理办法（试行）》（生态环境部令 第3号）等法律法规，引导离子型稀土矿区场地土壤污染修复相关行业的良性发展，制定本指南。

全国环境科学学会标准

# 离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复技术指南

## 1 范围

本文件规定了离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复的基本原则和工作程序、修复模式选择、修复技术论证、修复方案制定、修复工程实施、效果评估和工程验收等相关要求。

本文件适用于离子型稀土矿区场地土壤重金属和稀土元素污染的钝化修复,可用于指导修复方案制定、修复工程实施和修复效果评估等工作。

## 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指南必不可少的条款。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 3838 地表水环境质量标准
- GB 8978 污水综合排放标准
- GB/T 12801 生产过程安全卫生要求总则
- GB/T 14848 地下水质量标准
- GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)
- GB 16297 大气污染物综合排放标准
- GB/T 18877 有机无机复混肥料
- GB 38400 肥料中有毒有害物质的限量要求
- GB 50016 建筑设计防火规范
- GB 50019 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范
- GBZ 1 工业企业设计卫生标准
- 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 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行)
- HJ 557 固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法
- JGJ/T 188 施工现场临时建筑物技术规范

NY/T 525 有机肥料

NY 884 生物有机肥

NY/T 3041 生物炭基肥料

NY/T 3443 石灰质改良酸化土壤技术规范

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本指南。

#### 3.1

##### **重金属 heavy metals**

在标准状况下单质密度大于  $4.5 \text{ g/cm}^3$  的金属元素，常见的代表性元素包括汞 (Hg)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、铅 (Pb)、砷 (As)、铜 (Cu)、镍 (Ni) 等。

#### 3.2

##### **稀土元素 rare earth elements**

元素周期表中原子序数从 57 到 71 的镧系元素，即镧 (La)、铈 (Ce)、镨 (Pr)、钕 (Nd)、钷 (Pm)、钐 (Sm)、铕 (Eu)、钆 (Gd)、铽 (Tb)、镝 (Dy)、钬 (Ho)、铒 (Er)、铥 (Tm)、镱 (Yb)、镱 (Lu) 及原子序数为 21 的钪 (Sc)、39 的钇 (Y) 共 17 个元素的总称。通常用符号 RE 表示，是化学性质相似的一组元素。目前在稀土工业及产品标准中，稀土一般指的是钷 (Pm)、钪 (Sc) 以外的 15 个元素。

[来源：GB/T 15676—2015, 2.1]

#### 3.3

##### **离子吸附型稀土矿 ion-adsorption rare earth ore**

地表岩石经过长期风化，游离出来的稀土以离子吸附状态在黏土矿物上迁移富集而形成的一类独特的稀土矿床，也称风化壳淋积型稀土矿床。从该类矿床中通过提取冶金生产的混合稀土氧化物或碳酸盐精矿产品称为离子型稀土矿。

[来源：GB/T 15676—2015, 3.4]

#### 3.4

##### **离子型稀土矿区 ion-adsorption rare earth mining area**

离子吸附型稀土矿在经历池浸开采、堆浸开采和原地浸矿开采工艺后所形成的矿山剥采区、堆积区、淤积区、原地浸矿区、开采影响区以及其他工业场地等。

### 3.5

#### 钝化修复 immobilization remediation

通过向受污染土壤中添加一种或多种钝化剂,以改变重金属和稀土元素在土壤中的化学形态和赋存状态,降低其迁移性、浸出毒性和生物有效性。

### 3.6

#### 原位钝化修复 in-situ immobilization remediation

不移动受污染的土壤,直接在场地发生污染的位置对其进行原地钝化修复。

### 3.7

#### 异位钝化修复 ex-situ immobilization remediation

将受污染的土壤从场地发生污染的原来位置挖掘出来,搬运到其他场所或位置进行钝化修复。

### 3.8

#### 修复可行性研究 feasibility study for remediation

从技术、条件、成本效益等方面对可供选择的修复技术进行评估和论证,提出技术可行、经济可行的修复方案。

[来源: HJ 682—2019, 2.5.6]

### 3.9

#### 修复方案 remediation plan

遵循科学性、可行性、安全性原则,在综合考虑地块条件、污染介质、污染物属性、污染浓度与范围、修复目标、修复技术可行性,以及资源需求、时间要求、成本效益、法律法规要求和环境管理需求等因素基础上,经修复策略选择、修复技术筛选与评估、技术方案编制等过程确定的适用于修复特定地块的可行方案。

[来源: HJ 682—2019, 2.5.7]

## 4 基本原则和工作程序

### 4.1 基本原则

4.1.1 科学性原则。采用科学的方法，综合考虑修复目标、修复成效、修复时间、修复成本以及修复工程的环境影响因素等，制定修复方案。

4.1.2 可行性原则。在前期工作基础上，针对土壤污染性质、程度、范围以及对人体健康或生态环境造成的危害，评估土壤污染程度以及土壤钝化修复技术的可行性，因地制宜制定合理的钝化修复方案，使修复目标可达，修复工程切实可行。

4.1.3 安全性原则。制定钝化修复方案要确保修复工程实施安全，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。

#### 4.2 技术要求

4.2.1 修复效果评估参照 HJ 25.5 执行，修复后的土壤污染物浸出浓度应满足修复目标要求，对应污染物检测方法参照 HJ 700 执行。

4.2.2 修复工程应配套建设二次污染防范设施。针对修复工程实施过程中产生的废气、废水等，应对其进行规范化处理，并达到 GB 16297、GB 8978 要求；产生的固体废物应按照其环境管理属性进行规范化处置。

4.2.3 修复工程环境监测计划参照 HJ 25.2、HJ 25.5 执行。若地表水、地下水环境监测时发现污染物浓度存在异常时，经评估后应及时采取相关补救措施。

#### 4.3 工作程序

离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复工作程序如图 1 所示，主要内容包括修复模式选择、修复技术论证、修复方案制定、修复工程实施以及效果评估和工程验收等。

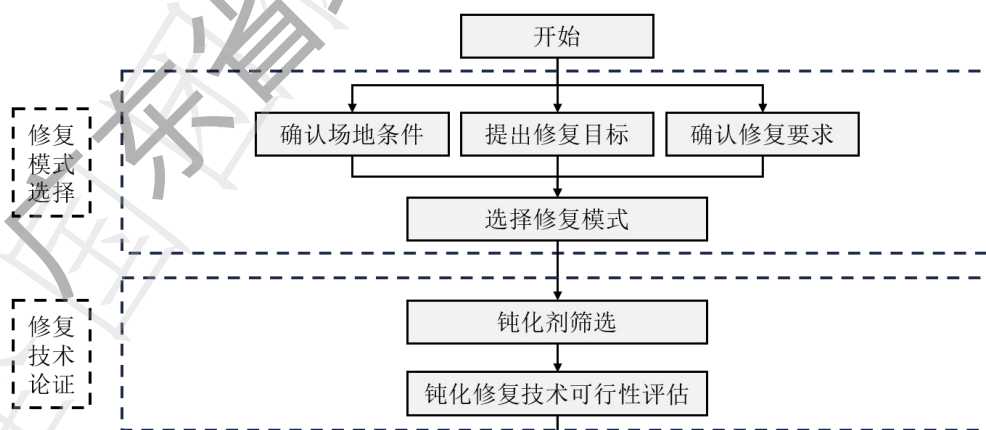


图 1 离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复工作程序

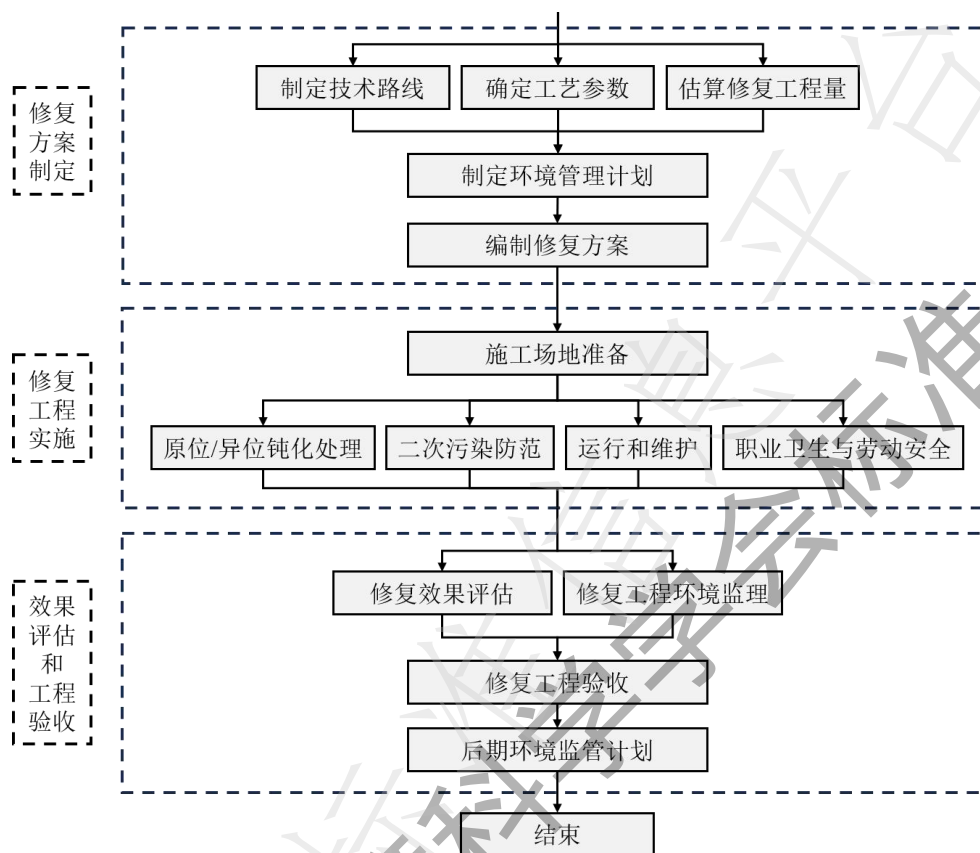


图1 离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复工作程序（续）

## 5 修复模式选择

### 5.1 确认场地条件

#### 5.1.1 核实场地相关资料

审阅前期按照 HJ 25.1、HJ 25.2 和 HJ 25.3 完成的矿区场地土壤污染状况调查与风险评估报告等相关资料，核实资料的完整性和有效性，重点核实前期场地信息资料是否能反映场地目前实际情况。

#### 5.1.2 现场考察场地状况

考察矿区场地现状，特别关注与前期土壤污染状况调查与风险评估时发生的重大变化，以及周边环境敏感目标的变化情况，重点关注稀土开采方式和目标污染物迁移途径，核实确认污染范围。现场考察矿区场地土壤修复工程实施条件，特别关注用电、用水、施工便道、安全保卫等情况，为修复方案的工程实施区布局提供基础信息。

### 5.1.3 补充相关技术资料

通过核查矿区场地已有资料和现场考察矿区场地状况,如发现不能满足修复方案编制基础信息要求,应适当补充相关资料。必要时应适当开展补充监测,甚至进行补充性土壤污染状况调查和风险评估,相关技术要求参照 HJ 25.1、HJ 25.2 和 HJ 25.3 执行或根据矿区场地实际情况进行调查评估。

## 5.2 提出修复目标

通过对前期获得的矿区场地土壤污染状况调查与风险评估报告等相关资料进行分析,结合必要的补充调查,确认矿区场地土壤修复目标值和修复范围。

### 5.2.1 提出修复目标值

分析矿区场地土壤重金属和稀土元素的浸出行为规律,结合矿区及周边地表水和地下水环境功能区划要求以及所选钝化剂的实际钝化效率,合理提出土壤修复目标值。

### 5.2.2 确认修复范围

确认前期矿区场地土壤污染状况调查与风险评估提出的土壤修复范围是否清楚,包括四周边界和污染土层深度分布,特别关注污染土层异常分布情况,比如非连续性自上而下分布。依据土壤重金属和稀土元素的修复目标值,分析和评估需要修复的土壤量。

## 5.3 确认修复要求

与矿区场地利益相关方进行沟通,确认对土壤修复的要求,如修复时间、预期经费投入等。

## 5.4 选择修复模式

由于离子型稀土矿区场地土壤酸化,养分流失,矿化程度高,土质疏松等,导致植被难以存活。因此,针对矿山剥采区、堆积区、淤积区、原地浸矿区、开采影响区以及其他工业场地等具有不同土壤破坏属性的区域,根据土壤重金属和稀土元素的污染程度及特征,结合修复后的土地利用计划,因地制宜选取合适的土壤修复模式(见表1),提高土壤利用价值。

表 1 离子型稀土矿区场地土壤修复模式

修复后的土地利用计划	土壤修复模式选择						
	石灰基钝化剂	有机肥基钝化剂	无机肥基钝化剂	其他基钝化剂	耐受植物	喜稀土经济作物	喜氮喜酸经济作物
暂不利用	√			√			
植被生态恢复	√	√	√		√		
种植喜稀土经济作物	√	√	√			√	
种植喜氮喜酸经济作物		√	√	√			√

具体土壤修复模式说明如下：

- a) 石灰基钝化剂：向土壤中添加石灰基钝化剂（参考附录 A）有助于提高土壤 pH，改善土壤酸性环境，促进土壤重金属和稀土元素钝化。
- b) 有机肥基钝化剂：向土壤中添加有机肥基钝化剂（参考附录 A）有助于提高土壤肥力，改善土壤微生物环境，促进土壤重金属和稀土元素钝化。
- c) 无机肥基钝化剂：向土壤中添加无机肥基钝化剂（参考附录 A）有助于提高土壤养分，促进土壤重金属和稀土元素钝化。
- d) 其他基钝化剂：向土壤中添加除石灰基、有机肥基、无机肥基钝化剂以外的其他基钝化剂（参考附录 A），有效实现土壤重金属和稀土元素钝化。
- e) 耐受植物：在钝化修复后的土壤上种植藤本、草本、灌木、乔木（参考附录 B）等重金属和稀土元素耐受植物，提高土壤植被覆盖率。
- f) 喜稀土经济作物：在钝化修复后的土壤上种植喜稀土元素的经济作物（参考附录 B），提高土壤农业经济利用价值。
- g) 喜氮喜酸经济作物：在钝化修复后的土壤上种植喜氮喜酸的经济作物（参考附录 B），提高土壤农业经济利用价值。

## 6 修复技术论证

### 6.1 钝化剂筛选

6.1.1 根据前期场地土壤污染状况调查结果，针对不同污染程度的土壤，结合其理化性质（如土壤养分、有机质含量、pH、氧化还原电位、阳离子交换量、渗透性、含水率等），针对性筛选合适的钝化剂。

通过单一或复配施用不同基质的钝化剂（参考附录 A），有效降低土壤重金属和稀土元素的迁移性、浸出毒性和生物有效性。

6.1.2 根据钝化剂基质材料，满足相关标准对污染物含量的限值要求。肥料基钝化剂应符合 GB 38400、GB/T 18877、NY/T 525、NY 884 等规定的限值要求；石灰基钝化剂应符合 NY/T 3443 规定的限值要求；生物炭基钝化剂应符合 NY/T 3041 规定的限值要求；其他没有国家或行业标准的钝化剂中的污染物含量应符合 GB 15618 规定的土壤污染风险筛选值。

6.1.3 依次通过实验室小试和现场中试来确定钝化剂的施用方法与适用条件等，以获取土壤重金属和稀土元素的最佳联合钝化效果。

## 6.2 钝化修复技术可行性评估

### 6.2.1 实验室小试

可以采用实验室小试来筛选适合离子型稀土矿区场地土壤污染修复的钝化剂，并验证评估钝化修复技术的可行性。现场采集具有代表性的受污染土壤样品进行实验室小试，针对钝化修复技术的关键环节和关键参数，制定详实的小试实验方案，并在一定阶段内对钝化修复土壤进行采样分析，评估土壤重金属和稀土元素的钝化效果，以确定钝化剂的适用种类及最佳用量。

### 6.2.2 现场中试

由于矿区场地环境与实验室条件具有一定差异，修复工程实施中存在较多不确定性因素的干扰。为验证钝化修复模式的实用性，应在实验室小试结束后，结合场地实际选择综合效果最佳的钝化修复方案和最具代表性的受污染土壤开展现场中试试验，以验证实验室小试的实际成效，并完善工程管理和二次污染防范等措施。现场中试时应尽量兼顾不同功能区域、不同污染程度以及不同土壤类型的稀土矿区开展针对性试验，以便获得实际工程设计中所需要的现场参数和指标，为修复方案制定提供数据支持。

### 6.2.3 应用案例分析

离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复技术可行性评估可采用相同或类似场地土壤钝化修复技术的应用案例（参考附录 C）分析进行，必要时可现场考察和评估应用案例实际工程。

## 7 修复方案制定

### 7.1 制定修复技术路线

根据确定的修复模式，制定土壤钝化修复技术路线。修复技术路线应反映修复总体思路、修复方式、修复工艺流程和具体步骤，还应包括修复过程中受污染水体、气体和固体废物等的无害化处理处置。土

壤钝化修复方式包括原位钝化和异位钝化，可根据矿区场地状况、地层结构、污染分布和土地利用等现场条件，结合时间成本和经济效益，选择合适的土壤钝化修复方式。

## 7.2 确定修复技术工艺参数

土壤钝化修复技术的工艺参数应通过实验室小试和/或现场中试获得。工艺参数包括但不限于钝化剂种类、用量或复配比例、设备影响半径、设备处理能力、处理需要时间、处理条件、能耗、设备占地面积或作业区面积等。

## 7.3 估算土壤修复工程量

根据确定的土壤钝化修复技术路线和修复技术工艺参数，结合土壤修复范围和修复目标值，估算土壤修复工程量。修复工程量还应考虑修复过程中受污染水体、气体和固体废物等的无害化处理处置的工程量。

## 7.4 制定环境管理计划

7.4.1 环境监测计划。修复工程环境监测计划包括修复工程环境监理、二次污染监控和修复效果评估中的环境监测。应根据确定的最佳修复方案，结合矿区场地土壤污染特征和所处环境条件，有针对性地制定修复工程环境监测计划。相关技术要求按照 HJ 25.2、HJ 25.5 执行。

7.4.2 环境应急安全计划。为确保土壤修复过程中施工人员与周边居民的安全，应制定周密的修复工程环境应急安全计划，内容包括安全问题识别、需要采取的预防措施、突发事件时的应急措施、必须配备的安全防护装备和安全防护培训等。

## 7.5 编制修复方案

修复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，以利于后续土壤钝化修复工程的设计与实施。修复方案应根据矿区场地环境特征和钝化修复工程特点选择附录 D 全部或部分内容进行编制。

# 8 修复工程实施

## 8.1 施工场地准备

### 8.1.1 临时水电建设

8.1.1.1 临时给水排水布置应充分考虑施工、养护用水以及消防、生活用水需要，生产废水和生活污水经处理后宜优先考虑回用于施工和养护，相关技术要求参照 GB 50015、JGJ/T 188 执行。

8.1.1.2 临时供电布置需遵循分路控制、分级管理、三级配电、二级保护等原则，相关技术要求参照 GB 50194、JGJ 46、JGJ/T 188 执行。

### 8.1.2 施工便道铺设

根据施工人员和设备的进出口位置、施工材料的运输路径等，结合施工现场需求铺设施工便道。施工便道铺设需保护现有植被，施工现场应尽可能利用永久性道路或先建好永久性道路的路基铺设细石混凝土路面，在施工结束后再铺设永久性路面。具体施工过程可参照 JTG/T F30 等行业技术规范执行。

### 8.1.3 边界围挡搭设

根据实际情况在施工区域边界搭设封闭式围挡，相关技术要求参照 JGJ/T 188 执行。在主要进出场地道路设置专用出入口，作为施工人员、设备的专用通道。并在门口设置专业保安人员进行看护，悬挂安全标识，保证人员的安全。为防止施工期间无关人员擅自进入现场，对人员的出入进行严格的管理。

### 8.1.4 钝化剂储存与配置区建设

建设钝化剂储存与配置区，室内做好满足设计要求的防雨、防尘、防渗及通风等措施。室内通风、消防设计应符合 GB 50016、GB 50019、JGJ/T 188 相关技术要求，其他室内作业场所如土壤储存封闭大棚、预处理车间、混合搅拌车间和养护厂房等也应设置通风设施。

### 8.1.5 施工机械设备停放区建设

建设大型机械设备停放区，并根据不同类型的机械设备进行规划布局，合理划分停放区域，设置明显的安全警示标识牌，制定相应的停放管理制度，配备专门人员进行定期巡查，以便于施工设备的安全管理和检查维护。停放区应配套安装通风、消防设备，相关技术要求参照 GB 50016、GB 50019、JGJ/T 188 执行。

### 8.1.6 生活办公区搭设

搭设配备有通风、消防设备的生活用房和办公用房，用于施工与管理人员的日常生活与办公，相关技术要求参照 GB 50016、GB 50019、JGJ/T 188 执行。

## 8.2 原位钝化处理

### 8.2.1 土壤整理

施工前应针对矿区场地上的塑料膜、注液管道、集液池和沉淀池以及其他地下构筑物等障碍物进行探测和清除，对矿区场地土壤进行清理与平整。通过建立挡土墙、拦渣坝和水平梯田等方式防止矿区山体滑坡和水土流失。

## 8.2.2 钝化剂添加与搅拌

按照实验室小试和现场中试结果确定的钝化剂用量、搅拌速率、搅拌时间、搅拌深度等参数进行施工。一般采用专用旋耕机、搅拌机、挖掘机等设备将土壤与钝化剂进行充分混合。混合搅拌与钝化剂添加过程需同步进行，确保添加的钝化剂能覆盖所有受污染土壤区域。

## 8.2.3 反应养护

考虑到土壤增容膨胀现象，对混合搅拌均匀后的钝化土壤进行整形。适当采取高密度聚乙烯、膨润土垫和黏土等对表层土壤等裸露部分进行覆盖，保持水分，抑制扬尘，减少降水等对钝化土壤的渗透淋溶作用，降低对周边环境的影响。为保证钝化体系的结构完整性，提高钝化程度，需按照修复技术可行性评估中确定的最佳养护时间对钝化土壤进行养护。待养护结束后进行修复效果评估。

## 8.3 异位钝化处理

### 8.3.1 土壤清挖

8.3.1.1 测量放线。根据土壤污染调查和风险评估确定的修复目标、范围和深度，确定污染土壤清挖范围，在污染区域现场测出基槽开挖线，并用白石灰撒出。在开挖线范围一侧设置警示牌，分别用醒目的颜色区分，警示牌上标明土壤类型、开挖深度、处理方式等详细内容。

8.3.1.2 清挖及运输。一般使用挖掘机对受污染的土壤进行开挖，挖掘过程中做好扬尘控制，当处置现场具备接收、处置污染土壤的能力后，可以从清挖现场将土壤运输至处置场。

8.3.1.3 临时储存。为保证修复过程的连续性，宜在清挖场地内设立临时的土壤储存区。储存区应具备防雨、防尘、防渗等功能，避免二次污染。

### 8.3.2 土壤预处理

利用前筛和破碎设备对土壤进行预处理。预处理土壤通过传送带或挖掘机传输至进料斗中，并以一定速度进入筛分系统，将大粒径的筛上产品（如渣石块等）传送至清洗器中，加入工艺用水清洗后综合利用，形成的泥浆混合物经沉淀后固液分离。最终将沉淀后的粘土颗粒脱水后与筛下产品由传送带或挖掘机转移至药剂混合设备进行钝化处理。

### 8.3.3 钝化剂添加与搅拌

将预处理后的土壤送入搅拌机，按照实验室小试和现场中试结果确定的最佳土壤含水量以及钝化剂用量、搅拌速率、停留时间等参数，采用双轴搅拌机和土壤改良机等专用设备将土壤和工艺用水与钝化剂充分混合均匀。钝化处理设备应配备粉料仓、粉料计量系统、附加剂储存及输送系统、储水及输送系统、混合系统、皮带计量及输送系统、除尘设备、PLC控制系统等模块。

### 8.3.4 反应养护

将混合搅拌均匀后的钝化土壤转移至土壤暂存区，再由铲车送至养护堆场，保持水分养护。养护堆场应做好防雨、防尘、防渗通风等措施。为保证钝化体系的结构完整性，提高钝化程度，需按照修复技术可行性评估中确定的最佳养护时间对钝化土壤进行养护。待养护结束后进行修复效果评估，达到修复目标后的土壤方可进行分层摊铺压实回填。

## 8.4 二次污染防范

8.4.1 水污染防范。施工过程中应做好防渗、防冲刷措施，在已修复的矿区场地上进行适当的覆盖处理。对于地表径流带来的污染，做好雨污分流，污水应在修复场内设立收集处理系统，用于治理基坑积水以及土壤渗滤液等，废水处理达标后方可循环利用或直接排放。

8.4.2 大气污染防范。加强挖掘、运输过程管理，挖掘施工过程中需喷雾降尘，同时应遮盖土堆与车载土体，淋洗出厂车辆轮胎，清扫厂区道路，减少扬尘影响。

8.4.3 固体废物污染防范。针对施工过程中产生的一般固体废物、危险废物、生活垃圾等，按照国家、地方及相关行业标准对于固体废物的管理要求，委托具有相应资质的单位处理与处置。

## 8.5 运行和维护

8.5.1 运行。施工过程中应严格按照操作规程作业，对施工人员及设备、设施的运行安全进行实时监控管理。建立受污染土壤的清挖、转运、暂存和处理台账，具体包括土壤类型、方量、污染程度以及土壤钝化方式、时间、钝化剂用量等内容。建立钝化剂购买、贮存、施用管理台账，具体包括钝化剂生产厂家、名称、成分、购买时间及数量、每日施用量和剩余量等内容。

8.5.2 维护。定期对临时水电、施工便道、边界围挡、地表覆盖材料等设施进行维护与管理，定期对施工设备和装置进行检查、维护和保养，并做好相关记录。定期汇总修复工程的施工进度、管理台账、运行维护情况和环境监测结果等，明确修复措施的有效性以及是否存在污染扩散的现象，最终形成档案记录。

## 8.6 职业卫生与劳动安全

施工过程职业卫生与劳动安全应符合 GB/T 12801、GBZ 1 相关规定。职业卫生与劳动安全设施的设置应符合以下规定：

- a) 设置防尘、防毒、防暑、防湿、防寒等装备；
- b) 设置防火、防爆、防电、防雷、防坠落、防机械伤害等设施；
- c) 设置监测装置、安全教育和事故应急等设施。

## 9 效果评估和工程验收

### 9.1 修复效果评估

#### 9.1.1 采样布点

9.1.1.1 原位钝化修复效果评估采样布点原则参照 HJ 25.2 和 HJ 25.5 等相关标准执行。

9.1.1.2 异位钝化修复效果评估采样布点原则为抽样检测，对反应养护后的土壤按照批次进行采样，每批次处理的土方量少于 500 m<sup>3</sup>时采集 1 个土壤样品，土方量大于 500 m<sup>3</sup>时应适当增加采样数量，每增加 500 m<sup>3</sup>至少增加 1 个土壤样品。

#### 9.1.2 评估标准

9.1.2.1 重金属。钝化修复后的土壤重金属污染物浸出毒性评估方法按照 HJ 557 执行，评估标准采用 GB 3838 和 GB/T 14848 要求的 IV 类标准限值，若修复目标矿区场地地下水下游边界半径 2 km 范围内存在饮用水源地、集中地下水开采区、涉水风景名胜区和自然保护区等水环境敏感点，评估标准则采用 GB 3838 和 GB/T 14848 要求的 III 类标准限值。

9.1.2.2 稀土元素。鉴于稀土元素在环境中暂无相应的限量和评估标准，其浸出毒性评估方法参照 HJ 557 执行，评估标准要求钝化修复后的土壤浸出液中的稀土元素均值含量的 95% 置信上限较对照区下降幅度不低于 30%。

### 9.2 修复工程环境监理

离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复工程环境监理参考《关于印发〈广东省建设用地土壤污染修复工程环境监理技术指南（试行）〉的通知》（粤环办〔2020〕75 号）规定执行。

### 9.3 修复工程验收

离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复工程验收应符合《环境保护部关于发布〈建设项目竣工环境保护验收暂行办法〉的公告》（国环规环评〔2017〕4 号）相关规定。

### 9.4 后期环境监管计划

由于钝化修复没有削减土壤污染物总量，不能从根本上消除其环境风险。因此，修复工程验收后还需制定详细的后期环境监管计划，对修复后的土壤污染物浸出浓度以及周边地表水和地下水环境质量开展定期监测。当发现污染物监测浓度明显升高甚至超过污染限值时，应紧急启动应急预案，切断污染物向外迁移途径，并对受污染土壤进行重新修复。

全国环境科学学会标准  
山东省环境科学学会标准  
信息服务平台

## 附录 A

(资料性)

## 常用土壤钝化剂种类与适用范围

表 A.1 列出了土壤修复常用的钝化剂种类与适用范围。

表 A.1 常用土壤钝化剂种类与适用范围

钝化剂种类	有效成分	钝化机理	注意事项
1、石灰基钝化剂			
生石灰	CaO	提高土壤 pH，并与污染物发生沉淀作用等。	过量施用会导致土壤 pH 过高，造成土壤板结。
熟石灰	Ca(OH) <sub>2</sub>		
石灰石	CaCO <sub>3</sub>		
2、铁基钝化剂			
零价铁/纳米零价铁	Fe	与污染物发生还原、吸附沉淀、离子交换、表面络合作用等。	过量施用会降低土壤 pH，导致土壤盐度升高。
铁氧化物	FeO、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
铁盐	FeSO <sub>4</sub> 、Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 、FeCl <sub>2</sub> 、FeCl <sub>3</sub>		
水铁矿	5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O		
针铁矿	α-FeO(OH)		
褐铁矿	FeO(OH)·nH <sub>2</sub> O		
3、铝基钝化剂			
铝盐	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·14H <sub>2</sub> O、Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> 、AlCl <sub>3</sub>	与污染物发生离子交换、表面络合、沉淀作用等。	铝含量过高会对植物产生毒害作用。
铝酸钠	Na <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		
4、磷基钝化剂			
磷铁矿	FePO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	与污染物发生离子交换、表面络合、吸附沉淀作用等。	过量施用会造成面源污染。
磷矿粉（氟磷灰石）	Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> F <sub>2</sub> 、Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F		
羟基磷灰石	Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub>		
过磷酸钙（普钙）	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O+ CaSO <sub>4</sub>		
磷矿石（磷酸钙）	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>		
骨炭（磷酸钙）	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>		
磷酸盐	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 、Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 、Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 、(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>		
5、黏土矿物基钝化剂			

表 A.1 常用土壤钝化剂种类与适用范围（续）

钝化剂种类	有效成分	钝化机理	注意事项
高岭石	复杂黏土矿物	与污染物发生物理化学吸附、离子交换、表面络合、沉淀作用等。	
海泡石			
蛭石			
沸石			
坡缕石（凹凸棒石）			
膨润土（蒙脱石）			
硅藻土			
6、无机肥基钝化剂			
硅肥	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	与污染物发生表面络合、沉淀作用等。	
钙镁磷肥	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{MgSiO}_3$		
7、生物炭基钝化剂			
生物质炭	由富含碳的生物质在无氧或缺氧条件下经过高温裂解生成的一种具有高度芳香化、富含碳素的多孔固体颗粒物质	调节土壤 pH，并与污染物发生吸附、沉淀、离子交换、表面络合作用等。	
8、有机肥基钝化剂			
有机肥	成分复杂的有机质	调节土壤 pH 和氧化还原电位，并与污染物发生吸附、表面络合作用等。	
生物有机肥			
生物固体			有异味、养分含量和含水率过高。
腐殖酸			
9、工业废渣基钝化剂			
赤泥	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$	与污染物发生吸附、沉淀作用等。	过量施用会导致土壤盐度升高。
粉煤灰	$\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$		可能含有污染物。
飞灰	莫来石、石英、方解石、钙长石、赤铁矿等		
硅肥	以工业废渣、黏土矿物等为主要原料，以有效硅为主要表明量的各种肥料	与污染物发生沉淀、表面络合作用等。	

表 A.1 常用土壤钝化剂种类与适用范围 (续)

钝化剂种类	有效成分	钝化机理	注意事项
含铝水处理废渣	复杂混合物	与污染物发生沉淀、离子交换、表面络合作用等。	铝含量过高会对植物产生毒害作用。
石膏	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	与污染物发生离子交换、表面络合作用等。	可能含有污染物。
磷石膏	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$		可能含有放射性元素。

## 附录 B

(资料性)

## 离子型稀土矿区推荐植物种植清单

表 B.1、表 B.2、表 B.3 分别列出了离子型稀土矿区优势藤本、草本、灌木、乔木植物推荐种植清单以及喜稀土元素和喜氮喜酸经济作物推荐种植清单。

表 B.1 离子型稀土矿区优势藤本、草本、灌木、乔木植物推荐种植清单

序号	中文名	拉丁学名	科属	生长习性与优势
1	马唐草	<i>Digitaria sanguinalis</i>	禾本科马唐属	一年生草本，耐旱耐瘠薄，在弱酸、弱碱性土壤上均能良好生长，种子细小，繁衍后代强、抗病虫能力强、能有效提高土壤养分，改变废弃矿山地表外貌
2	金色狗尾草	<i>Setaria glauca</i>	禾本科狗尾草属	一年生草本，耐旱耐瘠薄、耐酸碱，抗高温，对土壤要求不严
3	虻子草	<i>Leptochloa panicea</i>	禾本科千金子属	一年生草本，耐旱，对土壤要求不高，
4	香根草	<i>Vetiveria zizanioides</i>	禾本科香根草属	多年生草本，能在长期干旱或渍水情况下存活，对土壤要求不高，长势强健，自播繁衍力强，能抗土壤贫瘠、强酸、强碱和金属污染
5	牛筋草	<i>Eleusine indica</i>	禾本科稗属	一年生草本，根系极发达，对土壤要求不高，固土能力强
6	雀稗	<i>Paspalum thunbergii</i>	禾本科雀稗属	多年生草本，耐旱、抗寒、抗涝、耐盐碱、对土壤要求不严
7	百喜草	<i>Paspalum notatum</i>	禾本科雀稗属	多年生草本，对土壤要求不严，在肥力较低、较干旱的沙质土壤上生长能力仍很强
8	斑茅	<i>Saccharum arundinaceum</i>	禾本科甘蔗属	多年生草本，耐酸，抗病虫性强、抗旱耐瘠、宿根性好、适应性广
9	商陆	<i>Phytolacca acinosa</i>	商陆科商陆属	多年生草本，对土壤要求不严，抗寒、耐贫瘠，生命力强，喜暖喜潮，对稀土元素和重金属有积累效应
10	小蓬草	<i>Erigeron canadensis</i>	菊科飞蓬属	一年生草本，耐寒、耐旱，生长速度快，繁殖蔓延过程迅速
11	野艾蒿	<i>Artemisia lavandulaefolia</i>	菊科蒿属	多年生草本，耐寒，对土壤要求不严

表 B.1 离子型稀土矿区优势藤本、草本、灌木、乔木植物推荐种植清单（续）

12	柱花草	<i>Stylosanthes guianensis</i>	豆科笔花豆属	多年生草本或半灌木，耐贫瘠，抗干旱，耐高温，能够忍受强酸性、干旱、低肥力的土壤
13	紫花苜蓿	<i>Medicago sativa</i>	豆科苜蓿属	多年生草本，适应性较好，抗寒性较强，具有一定药用价值
14	望江南	<i>Cassia occidentalis</i>	豆科决明属	一年生亚灌木或灌木，喜温暖气候，不耐寒
15	翅荚决明	<i>Cassia alata</i>	豆科决明属	多年生灌木，一种药用植物，耐干旱，耐贫瘠，适应性强，喜光耐半阴
16	山毛豆	<i>Tephrosia candida</i>	豆科灰毛豆属	多年生灌木，喜阳、耐酸、耐旱、耐瘠、稍耐轻霜，适应性强，属于典型的水土保持和边坡绿化植物
17	木豆	<i>Cajanus cajan</i>	豆科木豆属	多年生灌木，对土壤要求不严，在干旱、贫瘠的土壤中也能繁殖
18	马尾松	<i>Pinus massoniana</i>	松科松属	多年生乔木，生长快速、根系发达、能改善土壤基质，药用经济价值高，对稀土元素和重金属有积累效应
19	山核桃	<i>Carya cathayensis</i>	胡桃科山核桃属	多年生乔木，长寿、有经济价值，对稀土元素和重金属有积累效应
20	刺槐	<i>Robinia pseudoacacia</i>	豆科刺槐属	多年生乔木，对土壤要求不严，浅根系，适应性很强，有一定抗旱能力，不耐水湿，需要排水措施
其他代表性的植物还有：黑麦草、高羊茅、白茅、白三叶、龙葵、葎草、五月艾、酸模、虎杖、苜蓿菜、狗牙根、铺地黍、宽叶香蒲、茵陈蒿、铁苋菜、车前草、田旋花、看麦娘、黄花槐、乌柏、白屈菜、鬼针草、金樱子、银胶菊、野牡丹、猪屎豆、矢车菊、草木犀、结缕草、格桑花、田菁、盐麸木、水苏等。				

表 B.2 离子型稀土矿区喜稀土元素经济作物推荐种植清单

序号	中文名	拉丁学名	科属	生长习性与优势
1	脐橙	<i>Citrus sinensis</i>	芸香科柑橘属	多年生乔木（果树，经济价值高），易存活、经济寿命长，营养丰富，能改良土壤，促进水源涵养
2	李子	<i>Prunus salicina</i>	蔷薇科李属	多年生乔木（果树，经济价值高），喜光、稍耐荫，抗寒，适应性强
3	枇杷	<i>Eriobotrya japonica</i>	蔷薇科枇杷属	多年生乔木（果树，经济价值高），喜光，稍耐荫，稍耐寒

表 D.2 离子型稀土矿区喜稀土元素经济作物推荐种植清单（续）

序号	中文名	拉丁学名	科属	生长习性与优势
4	油茶	<i>Camellia oleifera</i>	山茶科山茶属	灌木或小乔木（油料植物，具有经济价值），喜微酸性土壤，深根系，在沙质土、粘土、山脊和阳坡的冲刷薄地上，怕水涝，适生于温暖湿润气候
5	油桐	<i>Vernicia fordii</i>	大戟科油桐属	多年生乔木（油料植物，经济价值高），喜微酸性土壤，适宜在土地条件恶劣的河谷、山坡等地种植，繁殖能力与水土保持能力强
6	苧麻	<i>Boehmeria nivea</i>	荨麻科苧麻属	亚灌木或灌木（纺织纤维植物，经济价值高），具有良好的水土保持能力，可减少土壤侵蚀量

表 B.3 离子型稀土矿区喜氨喜酸经济作物推荐种植清单

序号	中文名	拉丁学名	科属	生长习性与优势
1	蓝莓	<i>Vaccinium</i>	杜鹃花科越橘属	多年生灌木（果树，经济价值高），具有典型的喜铵态氮肥等特征，适宜在氨氮含量较高的土壤中生长

## 附录 C

(资料性)

## 离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复技术应用案例

表 C.1 列出了离子型稀土矿区场地土壤及周边农田土壤污染钝化修复技术应用案例。

表 C.1 钝化修复技术应用案例情况表

序号	土壤类型	钝化剂种类/用量	钝化周期	评价方法	钝化效率	期刊来源
1	矿区土壤	凹凸棒/15%	50 天	TCLP 浸出	Pb: 65.7%	岩矿测试, 2020, 39(6): 847-855
2	矿区土壤	牛粪+锯末/5~6 kg/m <sup>2</sup>	2 年	CaCl <sub>2</sub> 提取	REEs: 80%~90%	Science of the Total Environment, 2022, 809: 152075
3	矿区土壤	牛粪+锯末/2.6 kg/m <sup>2</sup>	16 月	CaCl <sub>2</sub> 提取	REEs: 72.75%	Journal of Soils and Sediments, 2020, 20: 3669-3680
4	矿区土壤	磷酸二氢钾/1%	1 月	TCLP 浸出	REEs: 98%	Procedia Environmental Sciences, 2016, 31: 255-263
5	矿区土壤	过磷酸钙/0.5%	1 月	TCLP 浸出	REEs: 82.3%	Procedia Environmental Sciences, 2016, 31: 255-263
6	农田土壤	稻壳生物炭/10%	3 月	HAc 提取	REEs: 19.91%	中国环境科学, 2018, 38(10): 3823-3832
7	农田土壤	稻壳灰/10%	3 月	HAc 提取	REEs: 31.56%	中国环境科学, 2018, 38(10): 3823-3832
8	农田土壤	骨炭/5%	7 天	纯水淋溶	REEs: 68.5%	环境科学学报, 2016, 36(10): 3818-3825
9	农田土壤	骨炭/2.5%	约 100 天	土壤溶液	REEs: 92.0%	Chemosphere, 2019, 236: 124322
10	农田土壤	钙镁磷肥/2.5%	约 100 天	土壤溶液	REEs: 96.3%	Chemosphere, 2019, 236: 124322
11	农田土壤	过磷酸钙/2.5%	约 100 天	土壤溶液	REEs: 89.3%	Chemosphere, 2019, 236: 124322

## 附录 D

(资料性)

### 离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复方案编制大纲

列出了离子型稀土矿区场地土壤污染钝化修复方案编制大纲。

#### 1 总论

1.1 任务由来

1.2 编制依据

1.3 编制内容

#### 2 场地问题识别

2.1 所在区域概况

2.2 场地基本信息

2.3 场地环境特征

2.4 场地污染特征

2.5 土壤污染风险

#### 3 场地修复模式

3.1 场地修复总体思路

3.2 场地修复范围

3.3 场地修复目标

#### 4 修复技术论证

4.1 土壤钝化修复技术简述

4.2 土壤钝化修复技术可行性评估

5 修复方案设计

5.1 土壤钝化修复技术路线

5.2 土壤钝化修复技术工艺参数

5.3 土壤钝化修复工程量估算

5.4 土壤钝化修复工程费用估算

6 环境管理计划

6.1 修复工程监理

6.2 二次污染防范

6.3 修复效果评估监测

6.4 环境应急方案

7 成本效益分析

7.1 修复费用

7.2 环境效益

7.3 经济效益

7.4 社会效益

8 结论与建议

8.1 可行性研究结论

8.2 问题和建议

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 15676 稀土术语
- [2] GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）
- [3] GB 50015 建筑给水排水设计标准
- [4] GB 50194 建设工程施工现场供用电安全规范
- [5] JGJ 46 施工现场临时用电安全技术规范
- [6] JTG/T F30 公路水泥混凝土路面施工技术细则
- [7] HJ 164 地下水环境监测技术规范
- [8] HJ/T 166 土壤环境监测技术规范
- [9] HJ 682 建设用地土壤污染风险管控和修复术语
- [10] HJ 700 水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法
- [11] TD/T 1070.6 矿山生态修复技术规范 第 6 部分：稀土矿山
- [12] 广东省生态环境厅办公室. 关于印发《广东省建设用地土壤污染修复工程环境监理技术指南（试行）》的通知：粤环办（2020）75 号. [EB/OL]. (2020-11-24) [2024-10-14]. [https://gdee.gd.gov.cn/zwxw\\_1/content/post\\_3844582.html](https://gdee.gd.gov.cn/zwxw_1/content/post_3844582.html)
-