

《可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复技术规范》
(征求意见稿)
编制说明

《可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复技术规范》
团体标准
起草工作组
二〇二六年一月

《可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复技术规范》（征求意见稿）编制说明

一、项目背景

1. 任务来源

随着我国工业化与城镇化进程的快速推进，矿产资源开采、有色金属冶炼、化工生产、电镀加工及皮革制造等重点行业的高速发展，在创造巨大经济效益的同时，也造成了严重的土壤及地下水环境问题。特别是在我国部分工业集聚区及遗留地块，以铬（Cr）、砷（As）、汞（Hg）等为代表的可变价重金属与石油烃、卤代烃等有机污染物形成的复合污染问题日益凸显，其污染物赋存形态复杂、浓度差异大、空间分布不均，已成为当前土壤污染防治领域的“硬骨头”[1, 2]。此类复合污染场地具有极高的环境风险与治理难度。一方面，可变价重金属在环境介质中对氧化还原电位（Eh）和酸碱度（pH）的变化极为敏感，容易发生价态转化，从而改变其迁移能力和生物毒性。另一方面，共存的有机污染物往往通过络合、吸附或竞争作用影响重金属的形态，甚至在传统的单一修复技术（如化学氧化）实施过程中，有机物的降解中间产物可能诱导重金属的异常活化，导致“顾此失彼”和二次污染风险[3]。长期以来，针对此类复杂场地的治理，行业内多采用异位固化/稳定化或单纯的化学氧化技术。然而，现有技术普遍存在修复效率低、药剂消耗量大、长期稳定性差、易反弹以及工程化适用性不足等瓶颈问题，难以满足国家对污染地块“安全利用”和“绿色低碳”的修复需求[4]。面对可变价重金属-有机物复合污染场地修复成本高昂、长效机制缺失的严峻形势，亟需研发并规范一套基于特定污染物价态调控与协同降解的绿色修复技术体系。

为了贯彻落实《中华人民共和国土壤污染防治法》及《“十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划》，推动环保产业向精细化、绿色化方向发展，规范和指导可变价重金属-有机物复合污染场地的修复工程实践，航天凯天环保科技股份有限公司联合中南大学、湖南艾布鲁环保科技股份有限公司等单位，基于国家重点研发计划及多项省部级科研课题的最新研究成果，结合大量实验室小试、中试及现场示范工程数据，向中国科技产业化促进会提出申请，立项编制《可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复技术规范》团体标准，以满足目前国家及场地修复企业对环境友好型复合修复材料的渴求，解决该类场地复合污染严重且修复难度大的问题，为实际可变价重金属-有机物复合污染场地修复提供行为指南和

条例规范。

2. 工作过程

(1) 准备阶段：2024年6月-2024年12月，项目立项并筹备组织开展标准的制定工作。2024年12月底，召开工作组启动会议，标准工作组提交工作计划以及标准编制组人员组成等方案。

(2) 调研阶段：2025年1月至4月，标准编制组开展广泛、深入的调研，收集、整理了国内外相关标准、科研成果、专著、论文等，以及专家的意见与建议并进行了分析与探讨。同时，研究工程应用情况。

(3) 起草阶段 2025年5月-7月，标准编制组经过多次研究和讨论，充分听取各单位的意见并研究相关资料，形成标准草案稿。

(4) 草案稿研讨阶段：2025年8月-12月，标准编制组经过多次研究和讨论，充分听取各单位的意见并研究相关资料，明确标准的技术内容以形成《可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复技术规范》征求意见稿。

(5) 征求意见阶段：标准编制组开展广泛、深入的调研，收集、整理了国内外相关标准、科研成果、专著、论文以及专家的意见和建议并进行分析与探讨。同时，结合工程项目实践，2026年1月完成《可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复技术规范》征求意见稿。

(6) 送审阶段：标准编制组根据各方意见与建议对标准内容进行修改和完善，形成《可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复技术规范》送审稿。

二、标准编制的必要性

1. 行业发展规划及产业政策要求

当前，我国生态文明建设已进入以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期[5]。土壤与地下水作为生态环境的重要组成部分，其污染防治工作直接关系到国家粮食安全、水安全及人居环境安全。可变价重金属（如 Cr、As、Hg 等）与有机物（如石油烃、有机溶剂等）形成的复合污染，因其污染物来源广泛（涉及电镀、化工、有色冶炼、皮革制造等多个重点行业）、迁移转化机理复杂、环境风险高，已成为制约污染地块安全利用和区域环境质量改善的突出短板[6-8]。为规范此类场地的治理，国家及地方出台了一系列法律法规及产业政策，对修复技术的绿色化、长效化及规范化提出了明确要求：

《中华人民共和国土壤污染防治法》明确规定，实施土壤污染风险管控和修复活动，应当因地制宜、科学合理，提高针对性和有效性，并防止对土壤和周边环境造成新的污染。该法强调了“预防为主、保护优先、分类管理、风险管控、污染担责、公众参与”的原则，要求对建设用地土壤污染风险管控和修复名录中的地块，必须结合土地利用规划，采取移除、清理、原位或异位修复等措施。此外，《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》也明确提出要推动工业固体废物综合利用，降低固体废物危害性。本标准提出的利用固废基材料进行修复的技术路线，正是对上述法律精神的积极响应，旨在通过“以废治废”的绿色模式，解决复杂的土壤复合污染问题，同时规避修复过程中的二次污染风险[9-12]。

“十四五”规划对绿色低碳修复的战略导向 生态环境部等七部门联合印发的《“十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划》（环土壤〔2021〕120号）[1]明确提出，要“探索绿色低碳修复技术路径，鼓励采用原位修复、生物修复等低能耗、低排放技术”。规划指出，我国土壤复合污染问题依然突出，部分地区重金属与有机污染物交织，传统的高能耗（如热脱附）、高扰动修复模式已难以满足碳达峰、碳中和背景下的行业发展需求。该规划特别强调了要加强对化工、电镀等行业遗留地块中重金属-有机物复合污染的协同治理技术攻关。本标准规范的“特异性微生物原位修复”及“非均相催化氧化耦合修复”技术，属于典型的绿色、低碳、环境友好型技术，符合国家对修复产业转型升级的战略导向。

《关于进一步加强重金属污染防治的意见》（环固体〔2022〕17号）[2]指出，要聚焦重点行业、重点区域和重点污染物，深入推进重金属污染精准治理。意见特别强调了对铅、汞、镉、铬、砷等重点重金属污染的排放控制及历史遗留问题解决。针对可变价重金属（如Cr(VI)、As(III)）毒性大、易迁移的特点，政策鼓励采用化学稳定化、生物固化等长效控制措施，防止污染物在环境条件改变下发生“返溶”或“再活化”。本标准通过规定特异性菌剂与矿物基钝化材料的技术指标，旨在实现对可变价重金属的定向价态转化与长效稳定，填补了现有规范在重金属价态精准调控方面的技术空白。

《关于环保系统进一步推动环保产业发展的指导意见》及《环保装备制造业高质量发展行动计划（2022-2025年）》中均提到，要提升土壤污染修复装备的自动化、智能化水平，重点发展原位注入、异位淋洗及多功能一体化修复装备。目前，虽然我国已针对单一污染类型发布了如《污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化》（HJ 1282）、《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》（HJ 1165）等标准，但针对重金属-有机物复合污染，特别是涉及复杂价态转化的场地，尚缺乏系统性的技术规范，导致工程实践中常出现技术选择不当、修复过度或修复不足、长效监管缺失等问题。

综上所述，制定《可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复技术规范》，是落实《土壤污染防治法》等法律法规要求、响应“十四五”绿色低碳修复战略、解决复合污染治理技术难题、规范行业工程实践的迫切需要。本标准的实施将有效指导相关场地的精准调查、科学设计与规范施工，推动我国复合污染场地修复行业向精细化、绿色化、长效化方向迈进。

2. 国内外相关标准情况

鉴于可变价重金属与有机物复合污染带来的环境风险具有长期性、隐蔽性及跨介质迁移性，该类场地的精准治理与长效管控已成为国内外关注的焦点[13, 14]。我国在土壤与地下水污染防治方面起步较晚但发展迅速。2011年，国务院批复《全国地下水污染防治规划（2011-2020年）》，初步建立了地下水污染防治体系。2016年国务院印发《土十条》后，我国土壤环境管理体系逐步完善。2019年实施的《中华人民共和国土壤污染防治法》及《中华人民共和国水污染防治法》（修正案），更是从法律层面确立了土壤与地下水“风险管控”与“修复”并重的治理策略。目前，我国已发布了一系列配套技术导则与标准，如《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 36600-2018）、《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）、《建设用地土壤修复技术导则》（HJ 25.4-2019）、《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）以及针对单一技术的《污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化》（HJ 1282-2023）等。

然而，现行标准体系多侧重于单一介质（仅土壤或仅地下水）或单一污染物（仅重金属或仅有机物）的规范。针对重金属-有机物复合污染，特别是涉及价态变化敏感、交互作用强的复杂污染场地，尚缺乏系统性的工程技术规范。例如，现有的异位化学氧化技术规范难以防止有机物氧化过程中引发的重金属（如三价铬）反向活化风险；现有的地下水修复导则多为通用性原则，缺乏针对“可变价重金属羽流控制”与“有机物降解”协同处理的精细化参数指导[15-17]。本标准提出的“非均相催化-生物耦合”及“土水协同修复”等绿色长效技术，旨在填补这一空白（表1）。

表1 国内现行土壤及地下水污染防治相关法律标准及场地污染修复相关技术规范和指南

国内现行土壤及地下水污染防治相关法律及标准	
《中华人民共和国环境保护法》	《中华人民共和国环境影响评价法》
《中华人民共和国土壤污染防治法》	《中华人民共和国土地管理法》
《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》	《地下水管理条例》
国内场地污染修复相关技术规范和指南	
GB36600-2018 土壤环境质量建设用地土壤污	HJ 25.4-2014 污染场地土壤修复技术导

染风险管控标准（试行）	则
HJ 25.5-2018 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）	DB45/T 2144-2020 工业企业重金属污染地块修复技术规范
HJ 1165-2021 污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附	HG/T 20713-2020 重金属铅、锌、镉、铜、镍污染土壤原地修复技术规范
DB42/T 1464-2018 农业土壤生物修复菌剂	HJ 1282-2023 污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化
DB12/T 951-2020 农田土壤镉和莠去津复合污染原位钝化修复技术规程	GB/T 14848-2017 地下水质量标准
HJ 25.6-2019 污染地块地下水修复和风险管控技术导则	T/ACEF 079-2023 重金属-有机物复合污染土壤修复技术规范 稳定化-堆体式热脱附
T/GDSES 9.4-2023 污染地块安全利用保障技术第 4 部分：复合污染地块绿色高效修复技术集成指南	

欧美等发达国家在污染场地管理方面建立了较为完善的法律法规与技术标准体系，这对我国标准制定具有重要的借鉴意义。美国的《综合环境反应、赔偿与责任法》（CERCLA，即超级基金法）和《资源保护与回收法》（RCRA）构建了基于风险的全过程管理框架，并高度重视地下水污染的防控。美国 EPA 发布了一系列关于可渗透反应墙（PRB）、原位化学氧化（ISCO）及监测自然衰减（MNA）的技术指南，重点关注重金属形态转化与有机物降解的耦合机制。欧盟的《水框架指令》（WFD）和《地下水指令》（GWD）确立了地下水“良好化学状态”的目标，强调预防污染物输入及控制污染羽流扩散。荷兰的《土壤质量法令》则注重土壤与地下水功能的可持续管理，倡导采用结合生物、化学手段的温和修复技术。此外，ASTM International（美国材料与试验协会）发布了关于“绿色与可持续修复（GSR）”的标准指南，强调在修复全生命周期中降低能耗、保护水资源。这些国际标准普遍关注污染物的跨介质归趋及修复行为的生态环境足迹，与本标准强调的“绿色长效”及“土水共治”理念高度契合。

尽管国外已有成熟的技术指南，但由于我国的水文地质条件（如低渗透性地层分布广）、污染特征（高浓度复合污染多发）及管理制度与国外存在差异，直接套用国外标准难以适应我国当前高强度开发背景下复合污染场地的治理需求。因此，需要制定符合我国国情、针对性强的技术规范（表 2）。

表 2 国外现行土壤及地下水污染防治相关法律标准及场地污染修复相关技术规范和指南

国外现行土壤及地下水污染防治相关法律及标准	
Comprehensive Environmental Response,	Resource Conservation and Recovery Act（美

Compensation and Liability Act (美国)	国)
Canadian Environmental Protection Act(加拿大)	Federal Contaminated Sites Action Plan (加拿大)
Environmental Protection Act 1990: Pt. 2A (英国)	National Environment Protection Measures (澳大利亚)
Contaminated Land Management Act 1997 No 140 (澳大利亚)	EU Groundwater Directive (2006/118/EC)(欧盟)
EU Water Framework Directive (2000/60/EC) (欧盟)	Soil Quality Decree (荷兰)
Soil Quality Decree (Besluit bodemkwaliteit) (荷兰)	
国外场地污染修复相关技术规范和指南	
ASTM E2893-16 Standard Guide for Greener Cleanups (美国)	EPA 542-R-11-012 Introduction to In Situ Bioremediation of Groundwater (美国)
EPA 600-R-08-107 In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation (美国)	ISO 18504:2017 Soil quality — Sustainable remediation (国际标准)
Guidance on the Management of Contaminated Sites (加拿大)	Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality (澳新)

三、标准制定的基本原则和技术路线

1. 标准制定的基本原则

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。标准的制订以满足可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复技术的可操作性、安全性的要求为基本原则。

2. 标准制定的技术路线

标准的规范性一般要素，规范性技术要求，资料性要素等技术内容的编排及陈述形式的修订均遵循《环境保护标准编制出版技术指南》(HJ 565-2010) 及《标准化文件的起草》的有关规定。本标准制定编制的技术路线图见图 3。

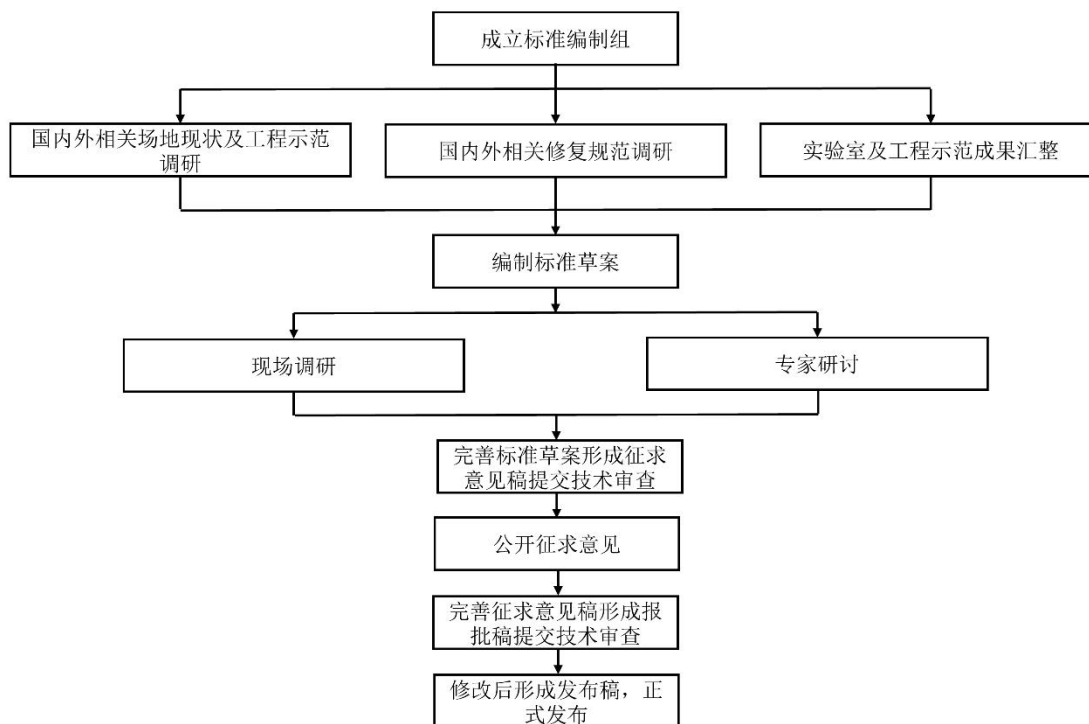


图 1 标准制定编制的技术路线图

四、标准主要技术内容

1. 范围

本文件规定了可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复的术语和定义、基本规定、非均相修复材料与特异性修复菌剂、修复技术、修复装备、质量控制与效果评估、安全与环保要求。

本文件适用于含Cr、Hg、As等可变价重金属与有机物复合污染场地的土壤及地下水修复工程的设计、施工、验收与运行维护，其它类似复合污染场地修复可参照执行。

2. 规范性引用文件

GB/T 6920 水质 pH值的测定 玻璃电极法

GB 8978 污水综合排放标准

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 18599 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准

GB/T 19587 气体吸附BET法测定固态物质比表面积

GB 34330 固体废物鉴别标准 通则

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 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
HJ/T 299 固体废物浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法
HJ/T 399 水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法
HJ/T 415 环保用微生物菌剂环境安全评价导则
HJ 597 水质 总汞的测定 冷原子吸收分光光度法
HJ 834 土壤和沉积物 半挥发性有机物的测定 气相色谱-质谱法
DB43/T 2828 重金属土壤修复稳定剂技术规范
DB43/T 2848 典型工业园区重金属污染土壤风险评估技术规范

3. 术语和定义

本章节规定了可变价重金属、有机污染物、可变价重金属-有机物复合污染、特异性修复菌剂、固废基催化材料、矿物基钝化材料、原位修复、异位修复的定义。为了保证标准术语的准确性、科学性及与现行标准体系的协调性，本标准中大部分通用术语参考了《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》（HJ 682）及《土壤环境 词汇》（HJ 1231），针对本标准涉及的专用术语，参考了相关学术文献及行业共识进行了精准定义。

（1）可变价重金属（Variable-valence heavy metal）：该定义旨在区分铅、镉等价态相对稳定的重金属。参考了环境化学的基本定义，强调了铬（Cr）、砷（As）、汞（Hg）等元素在环境氧化还原条件变化下发生价态转换（如 Cr(VI)/Cr(III)、As(III)/As(V)）的特性，及其不同价态在毒性、迁移性及生物有效性方面的显著差异。这制定了本标准技术路线选择（价态调控）的根本依据。

（2）有机污染物（Organic pollutant）：定义参考了 HJ 1231，指对生态环境或人体健康产生危害的碳基化合物，但在本标准中特指与可变价重金属共存并产生交互作用的有机物（如石油烃、有机溶剂等），排除了无机碳化合物。

（3）可变价重金属-有机物复合污染（Combined pollution of variable-valence heavy metal and organics）：该术语是本标准的核心对象。定义强调了两种污染物在物理空间上的共存，更强调了两之间存在的络合、氧化还原、竞争吸附等交互作用。这种交互作用导致单一修

复技术难以奏效，从而确立了本标准采用“耦合修复”及“协同治理”的技术导向。

(4) 特异性修复菌剂 (Specific remediation agent): 该定义是在《农用微生物菌剂》(GB 20287) 及《环保用微生物菌剂环境安全评价导则》(HJ/T 415) 的基础上, 结合本标准技术特点提出的。区别于常规的降解菌剂, 本定义强调了菌剂功能的“特异性”——即具备“定向转化重金属价态”与“降解有机物”的功能, 这是实现绿色长效修复的关键。

(5) 固废基催化材料 (Solid waste-based catalytic material): 该定义响应了“无废城市”建设需求。参考《固体废物鉴别标准 通则》(GB 34330), 界定了以工业或农业固体废物(如改性赤泥、矿渣)为主要原料, 经改性后用于催化氧化的材料, 明确了其“以废治废”的属性。

(6) 矿物基钝化材料 (Mineral-based passivation material): 定义参考了《重金属土壤修复稳定剂技术规范》(DB43/T 2828), 指利用天然或改性矿物通过吸附、沉淀等物理化学作用降低重金属迁移性的材料, 强调了其环境安全性与长效稳定性。

(7) 原位修复 (In-situ remediation) 与异位修复 (Ex-situ remediation): 这两个术语的定义严格遵循了《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》(HJ 682-2014) 中的标准表述, 确保了工程技术分类与国家现行标准体系保持高度一致, 便于行业内的沟通与执行。

4. 基本规定

标准第4节规定了修复工程实施的总体原则、前期调查要求、修复目标值的设定依据以及修复方案编制的基本规范。这些规定是确保修复工程科学性、合规性及有效性的基础。

(1) 标准第4.1条确立了“安全优先、绿色高效、因地制宜、长效稳定”的十六字原则。针对传统物理化学修复技术(如异位热脱附、强氧化)能耗高、易破坏土壤结构及污染物易反弹(如六价铬的再活化)等痛点, 本标准响应国家“减污降碳”战略, 明确提出优先采用“基于非均相修复材料与特异性修复菌剂的绿色低碳技术”。这不仅降低了修复过程的碳足迹, 更通过生物定殖与矿物钝化构建长效稳定的微生态系统, 降低二次污染风险。复合污染场地的修复极其依赖水文地质条件。本条规定技术选型必须综合考虑“污染类型(价态/种类)”、“污染程度”及“水文地质条件(渗透系数、地下水位)”。例如, 对于渗透性差的粘性土壤, 原位注入技术受限, 需转向异位修复; 而对于地下水位高、连通性好的场地, 则更适宜采用原位阻隔或PRB技术。明确了“勘察-设计-施工-评估-管控”的闭环管理模式, 并鼓励采用智能化装备与数字化监测手段, 旨在提升修复工程的精细化管理水平。

(2) 标准第4.2条在常规调查基础上, 针对本标准涉及的技术特点提出了特殊要求。规定采样布点与检测方法必须符合《建设用地土壤污染状况调查技术导则》(HJ 25.1) 和《建

设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》(HJ 25.2)的规定,确保基础数据的法律效力。针对原位修复技术对地层条件的敏感性,强制要求调查内容涵盖“地下水动力学参数(渗透系数、流速等)”。这些参数是计算药剂注入半径、布井间距及反应墙厚度的核心依据。鉴于本标准核心技术涉及微生物修复,而极端环境(高温、高盐等)会显著抑制微生物活性,因此本条特别规定:“对于高温、高盐等特殊环境场地,应补充微生物群落结构与污染物形态分析”。这一规定为判断场地是否适合投放特异性菌剂、是否需要进行驯化提供了科学依据,避免了盲目投菌导致的修复失败[18]。

(3) 标准第 4.3 条明确了修复后的质量验收依据。依据土地利用规划,执行《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600);若涉及农用地流转或复垦,则需执行《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618)。修复后的地下水质量应符合《地下水质量标准》(GB/T 14848)的要求。这一规定确保了修复工程的终点判定有法可依,保障了地块安全利用的底线。

(4) 标准第 4.4 条规定了修复方案的完整性要求。除常规工程概况外,特别强调了“技术选型论证”与“材料用量与装备配置”。这是为了杜绝工程设计中“拍脑袋”定药剂量的现象,要求设计必须基于小试或中试数据。针对可变价重金属易随地下水迁移的特性,本条强制要求“涉及地下水修复的项目,应同步编制地下水污染防控专项方案”,体现了“土水共治”的系统治理思维。

5. 非均相修复材料与特异性修复菌剂

标准第 5 条对非均相修复材料与特异性修复菌剂的技术指标、安全性能及贮存运输要求进行规定。

5.1 非均相修复材料

标准第 5.1 条规定了固废基催化材料和矿物基钝化材料的要求。

(1) 原料要求:为响应国家“无废城市”建设及循环经济发展战略,本标准明确界定固废基材料应以工业或农业固体废物为主要原料。规定原料的资源化利用鉴别需符合《固体废物鉴别标准 通则》(GB 34330),原料贮存需符合《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599),从源头上确保了材料的合法性与环保性。

(2) 固废掺量($\geq 60\%$)的设定:本标准创新性地提出了“固废原料质量分数应 $\geq 60\%$ ”的硬性指标,该数据是编制组基于多项固废资源化利用课题的研究成果确定的。实验数据表明,当电解锰渣、铜尾矿、污泥等固废基质的掺量达到 60%以上时,通过改性工艺仍能保

持优异的骨架结构与机械强度。设定此下限是为了防止部分产品仅添加少量固废作“噱头”，而大量消耗原生矿物资源，从而确保材料名副其实的“绿色低碳”属性。

(3) 催化活性指标（过渡金属 $\geq 10\%$ ，比表面积 $\geq 100 \text{ m}^2/\text{g}$ ）：针对非均相催化氧化工艺，规定了过渡金属（Fe、Mn 等）质量分数应 $\geq 10\%$ 。在类芬顿反应体系中，活性金属组分过低时，对氧化剂的催化分解效率显著下降，难以产生足够的活性氧物种（ROS）以快速降解有机污染物。同时，规定比表面积应 $\geq 100 \text{ m}^2/\text{g}$ （依据 GB/T 19587 测定），旨在提供充足的吸附位点与反应活性中心，保障“吸附-催化”协同作用的物理基础。

(4) 安全限值（GB 18599 第I类）：作为施入土壤和地下水环境的修复材料，其自身的安全性是底线。本标准严格规定材料的重金属浸出液浓度应符合 GB 18599 中“第I类一般工业固体废物”的限值要求。这是工业固废管理中最严格的等级，意味着该材料即使在自然环境下长期堆存，其渗滤液也不会对环境造成污染，从而彻底规避了修复过程中的二次污染风险。

5.2 特异性修复菌剂

标准第 5.2 条规定了特异性修复菌剂的要求。

(1) 筛选与鉴定（16S rRNA $\geq 99\%$ ）：规定采用 16S rRNA 基因测序法进行鉴定，并要求序列相似性 $\geq 99\%$ 。在微生物分类学中，99%的相似度通常被认定为同种（Species）甚至同株水平，这一高标准要求是为了确保菌种身份的唯一性与功能确定的精准性，避免因菌种混杂导致修复效果不稳定。

(2) 核心功能菌相对丰度（ $\geq 90\%$ ）：相比于常规农用菌剂（GB 20287）仅关注有效活菌数总量，本标准引入了“相对丰度”概念（基于高通量测序技术）。提出 $\geq 90\%$ 的指标要求，旨在确保投加的菌剂在初期具有绝对的群落优势。在竞争激烈的复合污染土壤中，只有高丰度的功能菌才能快速占据生态位并定殖，克服土著微生物的竞争压力。

(3) 宽耐受范围（10~70 °C，pH 3.0~9.0）：这一指标的设定充分考虑了复合污染场地的复杂工况。化工、冶炼场地往往伴随酸碱污染或氧化反应放热。实验室筛选的普通菌株往往难以存活。本标准规定的宽温、宽 pH 耐受范围，是筛选“特异性”菌种的核心门槛，保证了菌剂在极端环境下的存活率与活性。

(4) 生物安全性（HJ/T 415）：明确规定菌种必须无致病性，且需按照《环保用微生物菌剂环境安全评价导则》（HJ/T 415）进行评价，确认为环境安全级。这是生物修复技术应用的前提，防止外来物种入侵或病原菌扩散风险。

(5) 贮存与运输条件：参考了微生物制剂的一般保存规律及工程实践经验，规定了 4 °C

和 25 °C 条件下的不同保质期，以及运输过程中的冷链要求（超过 48 h 需冷链）。这些规定旨在解决生物制剂在物流环节易失活的行业痛点，确保菌剂到达施工现场时仍具备足够的生物活性。

6. 修复技术

标准第 6 条针对可变价重金属-有机物复合污染场地的复杂性，构建了三维井原位修复技术、“高级氧化-稳定化-微生物强化”耦合原位修复技术、“活性渗透反应墙-微生物氧化”地下水原位修复技术和“淋洗+稳定化”异位修复技术的立体修复技术体系。本标准规定的四项核心技术，均经过了大量试验研究与工程示范验证，旨在解决传统单一技术难以同时去除两类性质差异巨大污染物的行业难题。

6.1 三维井原位修复技术

(1) 针对传统“五点法”或“行列法”布井在异质性土壤中易产生“死区”和“短路”的问题，本标准推荐采用“三维井”技术。该技术通过上、下层井位功能的灵活切换（注/抽轮换），改变地下流场流线，实现对污染晕的“立体扫描式”淋洗，显著提高了药剂波及系数。

(2) 适用条件 ($K \geq 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$)：编制组参考了国内外原位淋洗/注入技术的工程经验及《水文地质手册》。当土壤渗透系数小于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ （即粉质粘土或粘土）时，流体在孔隙介质中的迁移主要受毛细力控制而非重力或压力驱动，强制注浆极易导致土体水力压裂而非均匀渗透，不仅修复效率低且容易造成污染物非受控扩散。因此，设定此阈值作为原位水力循环技术的适用红线。

(3) 工艺参数（井间距 1.5~3.0 m）：基于中试工程中药剂扩散半径的实测数据。在典型的中高渗透性地层中，单井有效影响半径通常在 0.8~1.5 m 之间。为保证井间修复区域的有效重叠，避免修复盲区，规定井间距宜为 1.5~3.0 m。

(4) 终点判断（相对偏差 $\leq 3\%$ ）：借鉴了化学传质过程中的“渐近线”原理。当抽提液中污染物浓度连续两次测定偏差小于 3% 时，表明淋洗过程已受限于解吸速率（拖尾效应），继续淋洗将呈指数级增加药剂成本且收益极低。此时切换为稳定化阶段，是经济与效果的最佳平衡点。

6.2 “高级氧化-稳定化-微生物强化”耦合原位修复技术

(1) 耦合路线的科学性：这是本标准解决“复合污染”最核心的技术创新。针对重金属与有机物交互作用强的问题，单纯氧化会活化重金属（如将 Cr(III) 氧化为 Cr(VI)），单纯生物修复启动慢。本标准提出了“先氧化破络并降解高浓有机物、后稳定化重金属、最后微

生物深度净化”的时间序列耦合策略。

(2) 微生物接种量 ($\geq 1.0 \times 10^8$ CFU/g): 土壤中土著微生物密度通常在 1.0×10^6 CFU/g~ 1.0×10^8 CFU/g 量级。为确保外源特异性菌剂在投加后能迅速克服土著菌竞争, 占据优势生态位, 编制组将接种量下限设定为 $\geq 1.0 \times 10^8$ CFU/g。这一数据既能保证定殖成功率, 在工程发酵制备成本上也是经济可行的 (相比实验室级别的 1.0×10^9 CFU/g 量级)。

(3) 反应间隔期 (养护 5 d~7 d): 规定了高级氧化与生物强化之间必须有“静置期”或“稳定化期”。这是为了确保残留氧化剂 (如过氧化氢、过硫酸盐) 完全分解, 避免其对后续投加的菌剂产生杀灭作用。

6.3 “活性渗透反应墙-微生物氧化”地下水原位修复技术

(1) 填料层级设计: 采用了“吸附富集-缓冲传质-生物降解”的分层设计理念。

(2) 改性高岭土-生物炭复合颗粒 (0.5~1.0 mm): 利用小粒径材料的高比表面积, 在第一级快速截留高浓度有机物削峰。

(3) 改性生物炭 (3~5 mm): 利用大粒径材料作为水力传导骨架和微生物载体, 防止墙体物理堵塞。

(4) 微生物层: 布置在后端, 利用微生物对富集的有机物进行原位矿化, 实现填料的“生物再生”。

(5) 填料形态 (颗粒状): 基于工程经验总结一直接填充粉末状粘土遇水会形成泥饼阻水层, 必须通过造粒改性保证其孔隙度。

6.4 “淋洗+稳定化”异位修复技术

(1) 粒径控制 (≤ 10 mm): 依据淋洗动力学原理, 污染物主要富集在细颗粒 (粘粒、粉粒) 表面。将土壤破碎筛分至 10 mm 以下, 既能保证淋洗药剂与土壤颗粒的充分接触, 又能防止大块石砾损坏搅拌桨和筛网, 是淋洗设备的典型进料参数。

(2) 液固比 (3:1 ~ 10:1): 这是平衡修复效率与废水处理成本的关键经济指标。实验表明, 液固比低于 3:1 时, 泥浆粘度过大, 传质受阻; 高于 10:1 时, 污染物去除率提升边际效应递减, 但后续废水处理设施规模将成倍增加。该范围涵盖了不同质地土壤 (砂土需水量小, 粘土需水量大) 的最佳操作区间。

(3) 覆土厚度 (≥ 300 mm): 针对异位修复后的土壤回填, 标准引用了园林绿化工程的相关规范。300 mm 是草坪及浅根系地被植物生存所需的最小土层厚度, 该规定旨在保障修复后场地的生态恢复功能, 防止水土流失。

7. 修复装备

标准第7条针对可变价重金属-有机物复合污染场地的复杂性，针对前述修复技术的落地实施，规定了关键核心装备的技术参数与构造要求。

7.1 “原位钻进-喷注一体化装备”

(1) 针对复合污染场地地层异质性强、污染物分布不均的特点，传统的大型旋挖钻机扰动大，且难以实现药剂的精准分层注入；而简易的手持式注浆管无法达到深部修复要求。本标准推荐采用“液压直推”与“回转钻进”相结合的一体化装备。该类装备利用静压力与高频冲击将探杆压入土层，具有“低扰动”的显著优势，能最大限度保持地层原状结构，防止污染物在修复过程中非受控扩散。

(2) 注浆压力（4~12 MPa）的设定：这是原位注入技术最核心的工艺参数。编制组结合中试数据发现，当注浆压力低于4 MPa时，在粉质粘土或压实填土中，药剂难以克服地层围压进行有效渗透，导致扩散半径过小，形成修复盲区。当压力超过12 MPa（特别是达到20 MPa以上的高压旋喷级别）时，极易产生水力压裂效应，药剂会沿着裂隙“短路”流走，而非均匀渗透接触污染物。因此，本标准设定的4~12 MPa是实现“渗透性注浆”的最佳压力区间。

(3) 力学性能（下压力 ≥ 59 kN，提升力 ≥ 30 kN）：下压力 ≥ 60 kN是为了确保设备能穿透一般的硬塑粘土层达到30 m深度；提升力 ≥ 30 kN则是为了克服深部钻探时的孔壁摩擦阻力，保证探杆能安全回收。

(4) 外形尺寸限制：规定长 \times 宽 \times 高宜控制在3800 mm \times 1600 mm \times 2500 mm以内，且桅杆可折叠。这是考虑到污染场地多位于工业遗留地块或城区，作业空间受限（如厂房内），紧凑型设计便于设备在受限空间内的快速部署与转场。

7.2 土壤洗脱装置

(1) 一体化设计的必要性：传统的异位淋洗生产线占地面积大，且往往将泥浆处理与水处理分开，导致现场泥水横流，二次污染风险高。本标准定义的“土壤洗脱装置”强调集“物理淋洗”与“废液在线处理”于一体。

(2) 进料粒径（ ≤ 10 mm）：土壤中的重金属与有机物主要富集在粒径较小的粘粒与粉粒表面。规定进料前破碎筛分至10 mm以下，一方面是为了保护设备内部搅拌组件不被大块石砾损坏，另一方面是为了确保淋洗剂能充分包裹细颗粒土壤，提高解吸效率。

(3) 过滤与吸附组件：要求配置“多孔陶瓷或网状纤维滤材”及“化学吸附材料”。这是为了实现淋洗废液的即时再生，使处理后的水能立即回用于淋洗前端，减少新鲜水的消耗，

符合“绿色修复”原则。

7.3 地下水处理一体化设备

(1) 工艺组合(活性炭+超滤): 针对重金属-有机物复合污染, 单一技术难以奏效。活性炭用于吸附溶解态有机物(如石油烃、有机溶剂)及部分重金属络合物; 超滤用于截留悬浮物及胶体。

(2) 超滤截留粒径(0.01 μm): 在地下水环境中, 许多重金属(如 Pb、Cr)并非完全呈溶解态, 而是吸附在胶体(粒径范围 0.001~1 μm)表面进行迁移(胶体促排效应)。传统的砂滤(精度~50 μm)或微滤(精度~0.1 μm)无法有效去除这些载重金属胶体。本标准强制规定超滤单元截留粒径应达到 0.01 μm 级别。这一参数设定的先进性在于, 它能有效切断重金属的“胶体迁移”路径, 确保出水重金属总量(不仅是溶解态)稳定达标。

(3) 压差报警功能: 针对自动化运行需求, 要求设备具备滤料堵塞压差报警功能。这是保障无人值守或少人值守条件下设备安全运行、防止滤芯击穿的关键配置。

8. 修复流程

依据修复工程“科学决策、精准施策、闭环管理”的原则, 标准第 8 条制定了本标准的修复流程。

(1) 场地污染特性分析: 区别于传统仅关注污染物总量的调查, 本环节强调对污染物赋存状态(价态)、“交互作用机制”及“土著微生物群落”的深度解析。这一诊断结果直接决定了后续三大核心要素的选择: 非均相材料制备、特异性菌种选育及装备选型。这种“先诊断、后定制”的流程设计, 从源头上保证了修复方案的针对性。

(2) 强调“中试优化”的风险控制机制在“修复工艺选择与设计”与“工程实施”之间。可变价重金属-有机物复合污染的修复涉及复杂的生物-化学耦合反应(如氧化剂与还原菌的衔接、pH 值的动态平衡)。实验室数据往往难以直接放大至复杂的地质环境。通过中试, 可以在小规模区块内验证药剂投加比、菌剂定殖率及工艺参数(如注浆压力、反应时间)的有效性, 及时修正设计偏差。这一环节虽然增加了前期工作量, 但能有效规避大规模施工失败的风险, 体现了工程实施的严谨性。

(3) “原位与异位”的分类分级决策流程图明确了“原位修复”与“异位修复”的双轨路径。依据场地水文地质条件及污染程度进行科学分流。对于中高渗透性、中低浓度污染区域, 优先进入“原位修复”路径, 贯彻“绿色低碳、少土方开挖”的原则; 对于低渗透性粘土或高浓度重污染源区, 则进入“异位修复”路径, 采用淋洗+稳定化技术进行兜底治理。这种分类决策机制确保了技术选型的经济性与可行性。

(4) 修复后定期监测与评估：针对可变价重金属易因环境条件改变（如酸雨淋溶、氧化还原电位波动）而发生“再活化”或“反弹”的风险，以及地下水污染修复常见的“拖尾效应”，本标准强调了验收后的长效监管。若采样检测未达到 GB 36600 或 GB/T 14848 规定的目标值，必须返回工程实施阶段，针对薄弱环节进行补充修复（如补充投加菌剂或稳定剂），直至达标。

9. 质量控制与效果评估

本标准第 9 条规定了施工过程中的质量控制与效果评估要求。

9.1 施工质量控制

(1) 标准第 9.1.1 条规定了严格的材料进场验收制度。明确要求复测指标必须符合本文件“5.1 非均相修复材料”和“5.2 特异性修复菌剂”的规定。这一条款是标准内部逻辑闭环的关键，防止施工单位使用劣质的普通氧化剂替代固废基催化材料，或使用通用菌剂冒充特异性菌剂，从而确保“绿色、精准”的技术路线不走样。

(2) 针对固废基材料与土壤混合难的问题，特别强调了“混合均匀”的要求，防止因局部药剂过量导致土壤板结或 pH 失衡，或因药剂不足导致修复盲区。

(3) 要求记录“压力、流量、搅拌速率”等关键运行参数。在原位修复中，注浆压力直接决定了药剂的扩散半径；在异位淋洗中，搅拌速率影响污染物的解吸效率。这些数据的实时记录与归档，为后续的质量追溯提供了客观依据，也呼应了本标准对“智能化装备”的推广要求。

(4) 标准第 9.1.3 条设定了“施工期间每 7 天进行一次中间检测”的频率。这一频率设定是基于可变价重金属-有机物复合污染修复反应动力学的特征。在“高级氧化”阶段，氧化剂（如过硫酸盐）在催化作用下的半衰期通常在数小时至数天，7 天足以覆盖氧化反应的剧烈变化期，及时捕捉 pH 值波动及重金属价态（如 Cr(VI)）的瞬间反弹。在“生物强化”阶段，外源投加的特异性菌剂定殖并进入对数生长期通常需要 3-5 天。7 天的监测周期恰好能评估菌剂是否成功定殖（通过有机物降解速率及代谢产物判断）。

(5) 动态调整：规定根据监测结果及时调整工艺参数。例如，若监测发现 pH 偏离菌种耐受范围（3.0~9.0），应立即调整缓冲剂投加量。

9.2 效果评估

(1) 土壤验收（HJ 25.5）：严格规定土壤修复效果评估执行《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》（HJ 25.5）。这是目前国家法定的一票否决性标准，确保本团体标准下的修复工程能够通过环保部门的验收备案，具备法律效力。

(2) 地下水验收与长效监管 (HJ 25.5 & HJ 25.6): 针对地下水, 本标准做出了精细化区分。验收阶段 (即工程结束时) 执行 HJ 25.5, 重点关注污染物浓度是否达标; 而运行期间及修复后的长期监测参照 HJ 25.6 《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》。由于地下水污染具有流动性和拖尾效应, 短期达标不代表长期安全。引入 HJ 25.6 是为了规范后续的“监测自然衰减”及长期环境监管, 确保可变价重金属不会随地下水环境改变而发生二次活化, 真正实现“长效修复”。

10. 安全与环保要求

本标准第 10 条针对复合污染修复过程中涉及的有毒化学品使用、高压设备运行及危险废物产生等高风险环节, 制定了严格的管控措施。

10.1 施工安全

(1) 施工安全: 人员防护 (职业健康档案): 鉴于场地中存在的六价铬、汞、砷及挥发性有机物均具有高致毒性或致癌性, 除常规劳动防护用品外, 本标准要求建立“职业健康档案”并定期检查。这是为了长期追踪施工人员的健康状况, 防范职业病风险。

(2) 管线安全距离 (≥ 2.0 m): 针对原位修复中的“高压旋喷”或“直推注入”工艺, 其高压射流对周边土体具有极强的切割破坏力。编制组结合市政施工经验, 将钻孔点位与地下管线的水平安全距离设定为 ≥ 2.0 m。这一标准高于一般土建施工的 1.0 m 要求, 旨在预留足够的缓冲空间, 杜绝因高压射流击穿地下燃气或供水管线引发的次生灾害。

(3) 电气安全 (接地电阻 $\leq 4 \Omega$): 修复现场多涉及大功率电气设备 (如注浆泵、空压机、水处理一体机)。规定接地电阻 $\leq 4 \Omega$ 是依据《建筑物防雷设计规范》及电气安全强制性标准设定的, 确保在潮湿的修复现场不发生漏电伤人事故。

10.2 环境保护

(1) 标准第 10.2 条重点规范了施工过程中的污染物排放控制, 特别是修正了行业内常见的危废管理误区。

(2) 废水回用优先: 响应“绿色修复”理念, 要求淋洗废液与清洗废水“优先回用于生产工艺”, 减少新鲜水消耗和废水排放量。

(3) 固废分类管理: 明确将废弃钻杆、一般包装材料等按 GB 18599 (一般工业固废) 管理; 而将“废化学试剂包装” (如氧化剂桶)、“沾染高毒性污染物的废吸附材料” (如吸附了汞的活性炭) 严格界定为危险废物, 必须执行 GB 18597 标准。这一区分至关重要, 有效规避了将危废混入一般固废处置的法律风险, 符合当前环保督察的高标准要求。

10.3 应急措施

标准第 10.3 条构建了突发环境事件的应急屏障。

(1) 化学品泄漏应急：针对修复过程中使用的强氧化剂（如过硫酸盐）或酸碱调节剂，规定现场必须配备“中和剂”与“吸油毡”。一旦泄漏，立即进行酸碱中和或吸附，防止污染物扩散进入雨水管网或土壤深层。

(2) 极端天气响应（防径流）：考虑到可变价重金属（如 Cr(VI)）极易溶于水随地表径流迁移，本标准特别强调了暴雨等极端天气下的“覆盖、围挡”措施。这是防止修复现场成为新的污染源，避免污染物随雨水冲刷造成大面积二次污染的关键手段。

11. 附录说明

附录对特异性修复菌种涉及的检测方法进行了补充说明。

12. 参考资料

[1] 生态环境部, 国家发展改革委, 财政部, 等. 关于印发《“十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划》的通知 (环土壤〔2021〕120号) [EB/OL].

[2] 生态环境部. 关于进一步加强重金属污染防治的意见 (环固体〔2022〕17号) [EB/OL].

[3] X. Liu, Y. Jia, J. Sun, et al., Experimental study of high-voltage pulse blasting-electrokinetic method for remediation of Cr, Cd and pyrene co-contaminated soil, *Journal of Hazardous Materials*, 501 (2026) 140804.

[4] J. Nie, Q. Wang, L. Han, et al., Synergistic remediation strategies for soil contaminated with compound heavy metals and organic pollutants, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12 (2024) 113145.

[5] 中国环境保护产业协会. 2022 年中国环保产业发展状况报告 [R].

[6] 史栋方, 李发永, 师美玲, 等. 绿洲农业区规模化养殖场及周边土壤重金属、抗生素复合污染分析与风险评估[J/OL]. 环境科学研究, 1-17[2026-01-22].

[7] C. Xue, Y. Yi, L. Zhou, Z. Fang, Simultaneous remediation of co-contaminated soil by ball-milled zero-valent iron coupled with persulfate oxidation, *J. Environ. Manage.* 340 (2023) 118004..

[8] Y. Wang, J. Paul Chen, Y. Yang, P. Zhang, Salt ions affect the remediation of Cr(VI)-contaminated groundwater using a simulated permeable reactive barrier filled with sulfidated nano-scale zerovalent iron (S-NZVI), *J. Environ. Manage.* 387 (2025) 125825.

[9] H. Xu, H. Zhang, C. Qin, X. Li, D. Xu, Y. Zhao, Groundwater Cr(VI) contamination and

remediation: a review from 1999 to 2022, *Chemosphere*. 360 (2024) 142395.

[10] REDDY, K. and KUMAR, G. (2018), Green and sustainable remediation of polluted sites: new concept, assessment tools, and challenges. *ce/papers*, 2: 83-92.

[11] H. Guo, Y. Wang, L. Liao, Z. Li, S. Pan, C. Puyang, Y. Su, Y. Zhang, T. Wang, J. Ren, J. Li, Review on remediation of organic-contaminated soil by discharge plasma: plasma types, impact factors, plasma-assisted catalysis, and indexes for remediation, *Chem. Eng. J.* 436 (2022) 135239.

[12] 解梦娣,于多.重金属-有机物复合污染联合修复技术在化工污染土壤中的研究[J]. *山东化工*,2025,54(13):183-184+190.

[13] X. Wang, Y. Teng, X. Wang, Y. Xu, R. Li, Y. Sun, W. Hu, L. Zhao, W. Ren, Y. Luo, Effects of combined pollution of organic pollutants and heavy metals on biodiversity and soil multifunctionality in e-waste contaminated soil, *J. Hazard. Mater.* 440 (2022) 129727.

[14] M.K. Al Hassan, A. Alfarsi, M.S. Nasser, I.A. Hussein, I. Khan, Ionic liquids and nades for removal of organic pollutants and heavy metals in wastewater: a comprehensive review, *J. Mol. Liq.* 391 (2023) 123163.

[15] [1]程功弼,田英,许孟一,等.一种用于土壤地下水取样修复的新型设备的研究[C], *环境工程* 2017 增刊 1. 江苏盖亚环境科技股份有限公司, 2017:203-208.

[16] C. SU, L. LI, Z. YANG, L. CHAI, Q. LIAO, Y. SHI, J. LI, Cr(VI) reduction in chromium-contaminated soil by indigenous microorganisms under aerobic condition, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 29 (2019) 1304-1311.

[17] 王慧璋,邹建.固废资源化利用在土壤修复中的技术应用[J]. *黑龙江粮食*, 2025, (08):102-104.

[18] 顾赟之.重金属-有机物复合污染场地的修复技术研究[J]. *皮革制作与环保科技*, 2024,5(22):123-125.

[19] M. Li, Z. He, H. Zhong, W. Sun, M. Ye, Y. Zhou, A novel multi-components hierarchical porous composite prepared from solid wastes for benzohydroxamic acid degradation, *J. Colloid. Interface. Sci.* 630 (2023) 714-726.

[20] Q. Zeng, S. Li, W. Sun, L. Hu, H. Zhong, Z. He, Eco-friendly leaching of rubidium from biotite-containing minerals with oxalic acid and effective removal of Hg^{2+} from aqueous solution using the leaching residues, *J. Clean. Prod.* 306 (2021) 12716.

五、应用效果

该部分内容对修复剂在实验室小试及实际场地修复中的修复效果进行了补充说明。

案例一：改性电解锰渣/污泥生物炭复合催化材料降解苯甲羟肟酸[19]

(1) 材料制备方法

首先采用一锅法制备 Fe/C-Mn 前驱体。将电解锰渣和污泥按 1:2 的比例添加到 0.5 M K_2CO_3 溶液中反应 30 min。然后，再加入 0.43 M HNO_3 溶液继续反应 20 min。通过 0.45 μm 的过滤膜后，滤膜上的固体于 60°C 烘干后即为 Fe/C-Mn 的前驱体。最后，将前驱体置于管式炉中，在氩气氛围下进行不同温度的热解，得到的产物分别为 Fe/C-Mn₄₀₀、Fe/C-Mn₆₀₀ 和 Fe/C-Mn₈₀₀。为了比较，采用相同的方法制备 EMR₈₀₀、SS₈₀₀ 和 H-Fe/C-Mn₈₀₀（电解锰渣和污泥在混合前均经过 HNO_3 处理 8 h）。

(2) 降解效果及机制

60 min 内，Fe/C-Mn₈₀₀ 能去除水溶液中 95.6% 的 BHA（20 mg/L）。Fe/C-Mn₈₀₀ 的表面性质和电子构型可由过渡金属（Fe、Mn）、持久性自由基和石墨 N 调控。含 N 碳基质的等级多孔结构有助于 BHA 的大量吸附，促进表面三元活性络合物（PMS/Fe/C-Mn₈₀₀/BHA）的形成，单电子和双电子传递途径同时进行，共同完成对 BHA 的分解。该体系对不同的 BHA-金属复合污染物具有一定的总有机碳和金属去除效率。TOC 的去除率大小与络合物的吉布斯自由能值有关。C=O 和 -OH 对有机物降解有重要作用，而 C-C 和 C=O 参与金属的吸附。

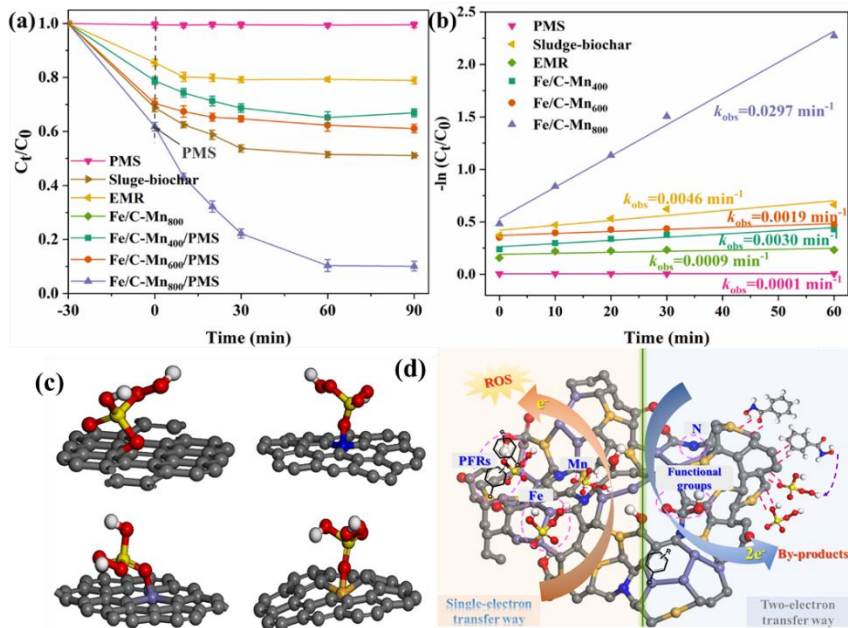


图 2 改性电解锰渣/污泥生物炭复合材料降解苯甲羟肟酸

案例二：黑云母 SiO₂/草酸亚铁复合钝化材料去除 Hg²⁺[20]

(1) 修复剂制备方式

将高铁黑云母（广东河源）矿物破碎，磨矿至 74 μm 以下。称取 7.56 g 二水合草酸加入 20 mL 去离子水中溶解，然后加入 5 g 的矿样，封膜并进行搅拌混合后，放入 90 °C 恒温磁力搅拌水浴锅中，持续剧烈搅拌反应 3 h。反应完成后，将混合物趁热抽滤，反复用去离子水洗涤三次后，将产物放入干燥箱中，80 °C 下干燥 12 h 即得到二氧化硅负载纳米草酸亚铁的复合材料（SNFC）。

(2) 去除效果及机制

该复合材料对 Hg²⁺ 的去除过程符合拟二级动力学模型和 Langmuir 模型，最大吸附量为 357.14 mg/g。复合材料去除 Hg²⁺ 的行为是一个 pH 和温度依赖性行为，随着 pH 值的升高，复合材料对 Hg²⁺ 的去除能力下降，温度的升高降低了 Hg²⁺ 的去除率，但提升了 Hg²⁺ 的去除速率。同时，复合材料去除 Hg²⁺ 过程中，产生了一种新的大小、长度不一的棒状结构，且被证明为 HgC₂O₄。Hg²⁺ 的去除机制包括离子交换，还原-氧化、表面络合和静电吸附，且以离子交换为主。将该修复材料与土壤调理剂结合应用于广东韶关矿区土壤修复，修复后植被覆盖率超过 95%。

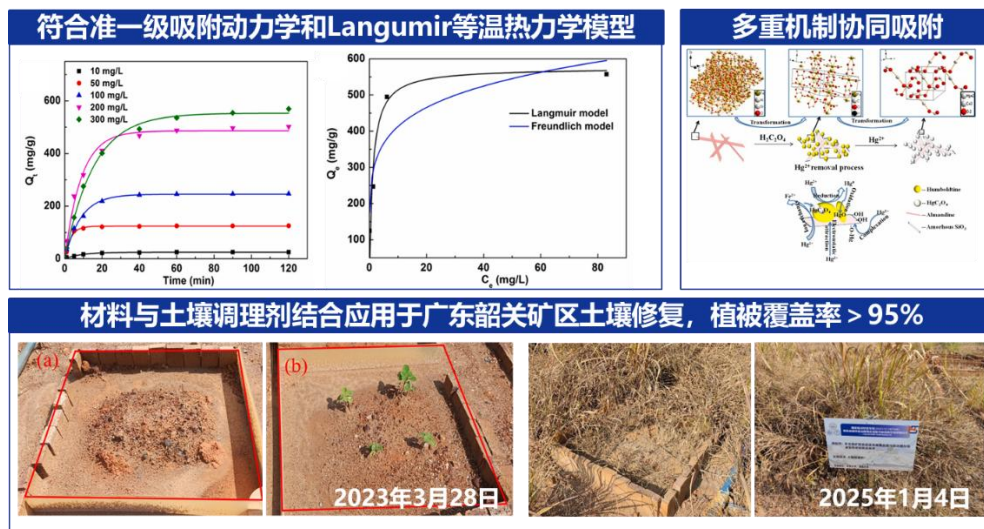


图 3 黑云母 SiO₂/草酸亚铁复合钝化材料去除 Hg²⁺

案例三：生物炭包埋固定化菌群 GYB1 修复土壤重金属和 PCBs 复合污染

(1) 修复剂制备方式

菌群 GYB1 从广东贵屿地区长期被 PCBs 污染的某电子废弃物拆解场土壤富集而得，可以 PCBs 为唯一碳源进行大量繁殖，菌群相对稳定，其优势菌为：假单胞菌属（50.20%）、窄食单胞菌属（46.34%）、无色杆菌属（0.84%）和假黄单胞菌属（0.78%）。

生物炭为玉米秸秆生物质在 500 °C 的缺氧条件下高温热解 4 h 制得，烧制好的生物炭放置至室温用去离子水清洗除灰后烘干。随后，用球磨机研磨成粉末并过 150 目筛网备用。

生物炭包埋固定菌群修复剂的制备：在 30 °C, 160 rpm 的诱导培养基中培养菌群 GYB1，培养 36 h 后离心收集湿菌体。将 50 mL (2 g 湿重) 的菌悬液 (8×10^9 CFU/mL) 与 2 g 生物炭按 1:1 (w/w) 混合，在 160 rpm 30 °C 下震荡 2 h，使得菌群固定在生物炭孔道内。随后，将 50 mL 已灭菌的 2% 海藻酸钠溶液 (w/v) 加入到混合体系中，形成海藻酸钠、生物炭微生物悬浮液。用 10 mL 注射器将混合后的液体逐滴滴入 2% CaCl_2 (w/v) 溶液中得到包埋固定化小球，继续在 CaCl_2 溶液中固化 12 h 后置于 4 °C 冰箱。最后用无菌水冲洗 3 遍，得到 0.01-0.02 g 直径为 1-3 mm 的生物炭包埋固定菌群修复剂。

(2) 修复剂对土壤中 PCBs 的去除效果

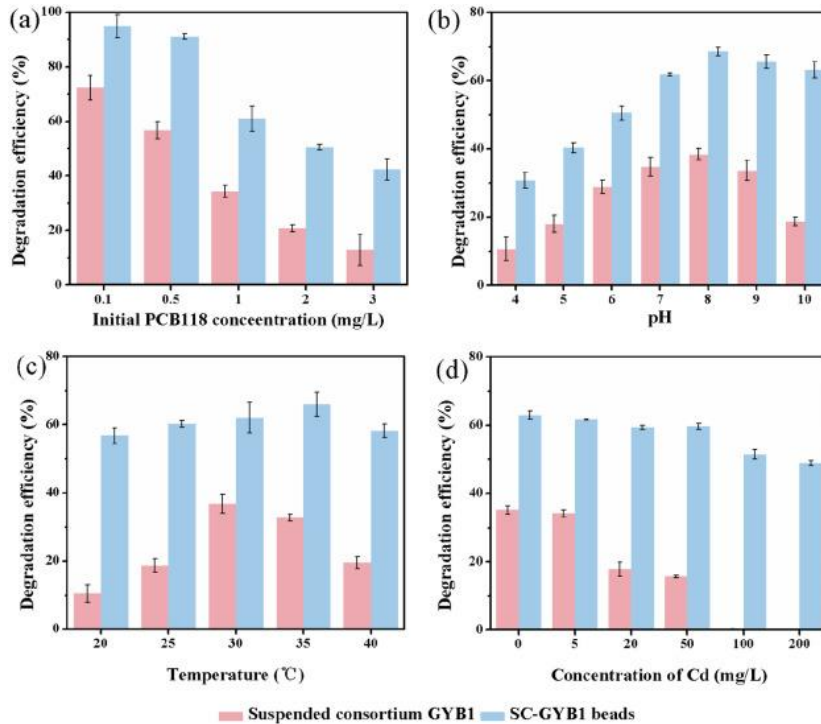


图 4 不同条件下 GYB1 菌群和生物炭包埋固定菌群修复剂对 PCBs 的去除效果

如图 4，与游离菌群相比，生物炭包埋固定菌群修复剂无论是在污染物浓度、土壤 pH 和环境温度变化下还是在毒害重金属胁迫下，均表现出更优异的抗干扰能力以及 PCBs 降解能力。

此外，本项目前期实验室小试阶段向土壤中添加了 1.5 mg/kg Cd 和 250 $\mu\text{g}/\text{kg}$ PCB 118 以探究生物炭包埋固定菌群修复剂在具备较大生物毒性的重金属 Cd 胁迫下对 PCBs 的去除效果，结果如图 5 所示，包埋固定化可有效缓解重金属对微生物的毒性效应，且与游离菌和生物炭固载菌群修复剂相比，海藻酸钠包埋小球表现出更高的污染物去除率，并加快了污染

物去除速率。

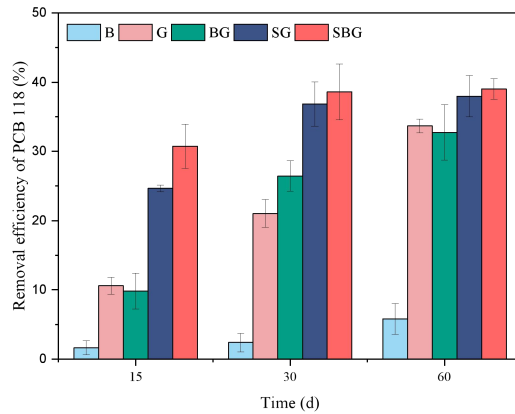


图 5 不同处理组对土壤 PCB 118 的修复效果 (B 为生物炭, G 为游离菌群, BG 为生物炭固载菌群修复剂, SG 为包埋固定菌群, SBG 为生物炭包埋固定化菌群修复剂)

案例四：应用转化情况说明

自 2018 年-2024 年, 研发的固废基催化材料、矿物基钝化材料及特异性修复菌剂通过航天凯天环保科技股份有限公司和湖南艾布鲁环保科技股份有限公司转化落地, 广泛应用于全国范围内多个实际场地修复工程中, 如汨罗市屈子祠镇土法炼铅历史遗留重金属污染综合治理建设项目、临武县三十六湾、香花岭地区重金属污染综合治理工程-两江口至浸槽段重金属治理第四标段项目、江西省吉安市新干县沂江乡痕头村污染农田修复项目等共 86 个场地 EPC 修复工程, 累计合同金额超 20 亿元, 推动了科技成果转化, 实现新兴技术从实验室走向实际修复工程。所有修复指标达到项目要求, 并实现了土地再利用, 取得了显著的社会和经济效益。

六、采用国际标准和国外先进标准的程度, 以及与国际、国外、国内同类标准水平的对比情况

本标准制定过程中, 未检索到国际标准或国外先进标准, 标准水平达到国际领先水平。

七、本标准预期的经济效益和社会效益

本标准制定的对可变价重金属-有机物复合污染场地修复流程和技术要求, 可提升可变价重金属-有机物复合污染场地修复工程施工工作的科学先进性和经

济合理性，为可变价重金属-有机物复合污染场地绿色长效修复工作提供技术支撑，预期经济效益和社会效益显著。

八、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准符合现有的法律、法规和强制性国家标准的规定。

九、标准重大分歧意见的处理经过和依据

本标准的制定过程中未出现重大的分歧意见。

十、标准性质的说明

本标准为中国科技产业化促进会发布的标准，属于团体标准，供会员和社会自愿使用。

十一、贯标的措施和建议

建议按照国家有关团体标准管理规定和中国科技产业化促进会团体标准管理要求，在会员中推广采用本标准，鼓励社会各有关方面企业自愿采用该标准。

十二、废止现行有关标准的建议

无。

十三、其他应予说明的事项

无。