

T/GXAS

团 体 标 准

T/GXAS XXXX—XXXX

生物炭固载产脲酶微生物矿化治理岩溶区 重金属污染土壤技术规范

Technical specification for biochar immobilized urease producing
microbial mineralization treatment of heavy metal contaminated soil in
karst area

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

广西标准化协会 发 布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 工作程序 2

5 场地调查 2

 5.1 一般规定 2

 5.2 场地基本信息收集 2

 5.3 污染物识别 2

 5.4 污染程度与分布调查 3

 5.5 风险筛查与管制限值判定 3

6 重金属污染土壤治理工程设计 3

 6.1 一般规定 3

 6.2 资料复核 3

 6.3 治理目标和治理范围 3

 6.4 技术方案选择 3

 6.5 治理费用和周期 4

 6.6 治理方案设计 4

7 重金属污染土壤治理 6

 7.1 一般规定 6

 7.2 适用条件 6

 7.3 实验室小试 6

 7.4 现场中试 7

 7.5 治理工程实施 8

8 安全与环境保护 11

 8.1 一般规定 11

 8.2 施工期间安全与环境保护 11

 8.3 废液废气处理 12

9 治理效果验收及评估 12

 9.1 矿化效果验收及评估 12

 9.2 重金属污染土壤治理效果验收及评估 12

 9.3 验收判定 12

10 治理监测与维护 12

 10.1 治理监测 12

 10.2 维护 13

附录 A（资料性） 常用钙源 15

附录 B（资料性） 岩溶废弃矿山常见重金属污染物及其总量测定方法 16

附录 C（资料性） 岩溶废弃矿山常见重金属污染物及其浸出毒性浸出方法 17

参考文献 18

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。

本文件由桂林理工大学提出和宣贯。

本文件由广西标准化协会归口。

本文件起草单位：桂林理工大学、福州大学、广西环保产业投资集团有限公司、中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司、湖北工业大学、重庆市绿色生物建造高等研究院、河南大学、武汉大学、东南大学、广西壮族自治区环境保护科学研究院、江西水利电力大学、宁波大学、广西博环环境咨询服务有限公司、桂林市可持续发展促进中心、南京现代综合交通实验室、桂林优利特医疗电子有限公司、广西自然资源生态修复中心、中国建筑材料工业地质勘察中心广西总队。

本文件主要起草人：宋宇、黄翔、张树光、李佳明、刘锋涛、刘文博、陈凯斌、陈国桓、赖叶伟、陈宇、谢长娟、黄亚楠、朱贺天、黄明、崔明娟、许凯、刘富奇、张洁、谢久兵、李志坚、李波、陈盛金、黄威、覃新宇、黎秋君、谢常鹏、张靖、卢德海、雷婕、范荣洋、郭明凡、黄锦孙、陈豪、黄淞、韦成龙、程雨、唐瑜鸿、马强、舒航、杨阳、张建伟、边汉亮、郑俊杰、章荣军、杜延军、彭小玉、刘慧琳、高何凤、崔猛、王艳、朱宗伟、周实际、崔学兴、吴福、韦华周、江凡、韦文光、林志强、梁家琿、赖科、潘科、仲文斌、于明波、邢文豪、崔宇。

生物炭固载产脲酶微生物矿化治理岩溶区重金属污染土壤技术规范

1 范围

本文件界定了利用生物炭固载产脲酶微生物矿化治理岩溶区重金属污染土壤涉及的术语和定义,规定了场地调查、重金属污染土壤治理工程设计、重金属污染土壤治理、安全与环境保护、治理效果验收及评估、治理监测与维护等方面的要求。

本文件适用于岩溶区重金属污染土壤的治理。

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 5085.3 危险废物鉴别标准 浸出毒性
- GB 8978 污水综合排放标准
- GB 14554 恶臭污染物排放标准
- GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)
- GB/T 17141 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法
- GB/T 47298 土壤碳酸盐含量的测定 气量法
- GB/T 50123 土工试验方法标准
- HG/T 20713 重金属铅、锌、镉、铜、镍污染土壤原地修复技术规范
- HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则
- HJ 166 土壤环境监测技术规范
- HJ 491 土壤和沉积物 铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法
- HJ 680 土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法
- HJ 682 建设用地土壤污染风险管控和修复术语
- HJ 702 固体废物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法
- HJ 766 固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法
- HJ 780 土壤和沉积物 无机元素的测定 波长色散X射线荧光光谱法
- HJ/T 299 固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法
- HJ/T 300 固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法
- HJ/T 415 环保用微生物菌剂环境安全评价导则
- HJ 1185 区域性土壤环境背景含量统计技术导则
- NY/T 3041 生物炭基肥料
- T/GXAS 986 废弃矿山生态修复工程成效评估技术规范

3 术语和定义

HG/T 20713、HJ 682、NY/T 3041界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

生物炭固载产脲酶菌 biochar immobilized urease-producing bacteria

利用生物炭的孔隙结构、比表面积及表面官能团特性,使产脲酶菌附着、富集并保持活性形成的治理材料体系。

3.2

微生物诱导碳酸盐沉淀 microbial induced carbonate precipitation (MICP)

以产脲酶菌代谢活动为基础，通过催化尿素水解产生碳酸根离子，并在钙源存在条件下形成碳酸钙等矿物沉淀的过程。

4 工作程序

见图1。

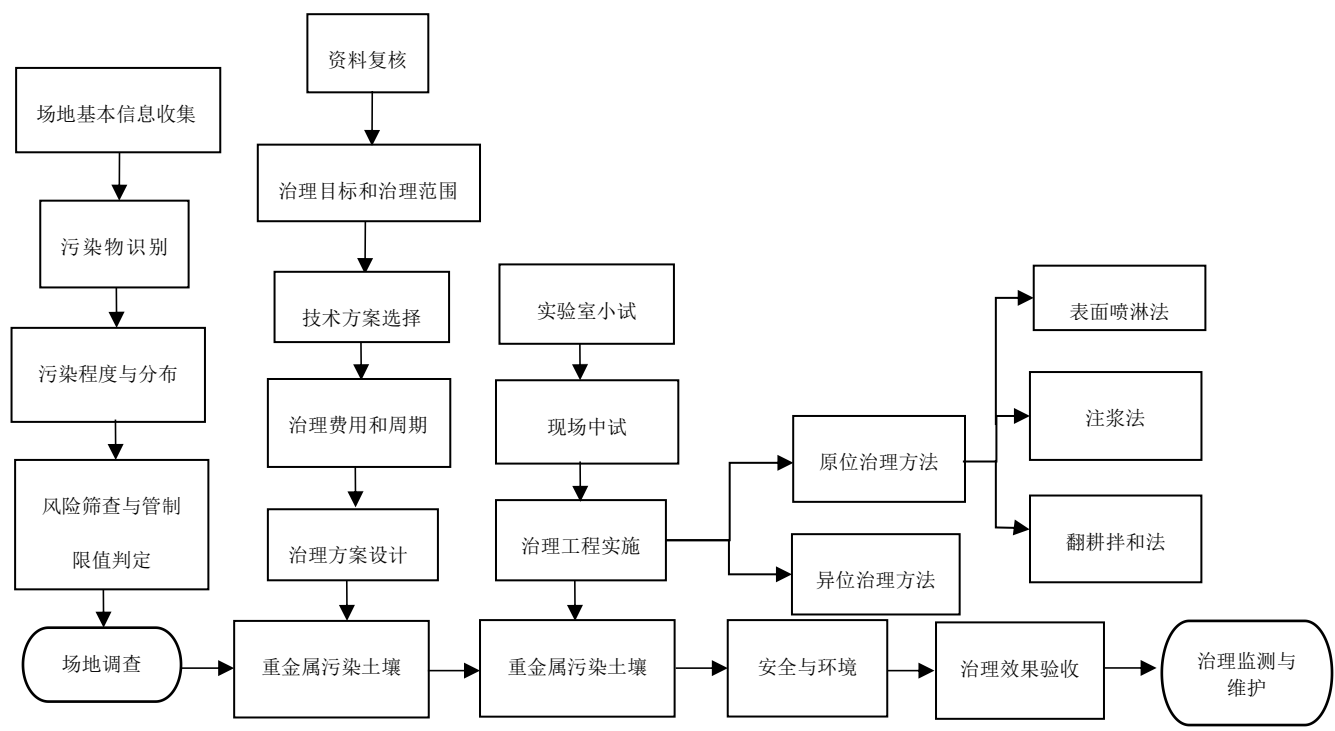


图 1 治理工作程序

5 场地调查

5.1 一般规定

- 5.1.1 治理工程实施前应开展污染场地调查与污染识别工作，查明场地污染状况、分布特征、岩溶发育特征及水文地质条件。
- 5.1.2 污染场地调查与污染识别、土壤环境监测分别按 HJ 25.1、HJ 166 的规定执行。

5.2 场地基本信息收集

- 5.2.1 应收集场地地理位置、地形地貌、气象水文、区域地质、岩溶发育特征及水文地质等基础资料。
- 5.2.2 应收集周边生态环境、居民区、水源地及其他敏感受体分布情况。
- 5.2.3 应收集矿山开采历史、冶炼或化工生产工艺、污染土情况等资料。
- 5.2.4 应明确场地现状用地类型及规划用途，区分农用地与建设用地。

5.3 污染物识别

- 5.3.1 识别范围应包括土壤固相污染物、地下水迁移态污染物。
- 5.3.2 目标重金属污染物总量及浸出浓度，包括铅（Pb）、镉（Cd）、铬（Cr）、铜（Cu）、锌（Zn）、汞（Hg）等。
- 5.3.3 次生污染物应包括微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP）工艺产生的铵根离子（NH₄⁺）、可溶性钙盐、生物炭固载产脲酶残留物。

5.4 污染程度与分布调查

- 5.4.1 应采用系统布点与分层布点相结合的方法，查明污染物种类、浓度、空间分布及垂向迁移特征。
- 5.4.2 采样点布设应覆盖全部污染区域，重点关注堆渣区、冶炼区、废水排放区及下游影响区。
- 5.4.3 岩溶区调查应特别关注溶洞、裂隙、地下暗河的分布及连通性，评估污染物迁移途径。

5.5 风险筛查与管制限值判定

土壤污染物总量按GB 15618规定的筛选值、管制值进行判定。超出筛选值的区域应纳入治理范围，超出管制值的区域应优先安排治理。

6 重金属污染土壤治理工程设计

6.1 一般规定

- 6.1.1 重金属污染土壤治理工程设计应以污染调查结果为基础，结合污染场地特征、岩溶发育特征及污染迁移条件和治理目标确定治理技术路线和工程实施方案。
- 6.1.2 采用生物炭固载产脲酶微生物矿化治理技术时，应充分考虑生物炭吸附固定效果、微生物诱导碳酸盐沉淀及重金属稳定化等多重作用机制，优化材料组成和工程参数。
- 6.1.3 治理工程设计内容应包括资料复核、治理目标、治理范围、技术方案选择、工程参数设计、治理费用等。

6.2 资料复核

- 6.2.1 开展治理工程设计前，应开展资料复核，资料复核内容宜包括：
 - a) 场地基本信息，包括土地利用历史、污染来源、岩溶发育特征及周边敏感目标；
 - b) 污染调查资料，包括污染物种类、污染浓度、污染分布范围及污染深度；
 - c) 土壤性质资料，包括土壤类型、颗粒组成、含水率、pH值、有机质含量及渗透性能等；
 - d) 水文地质资料，包括地下水埋深、流向、岩溶裂隙及地下水径流通道分布情况及地下水环境质量状况；
 - e) 已有治理工程资料及相关技术评价结果。
- 6.2.2 当已有资料不能满足工程设计要求时，应开展补充调查和现场检测。
- 6.2.3 污染土取样、运输、保存及检测应符合相关标准要求。

6.3 治理目标和治理范围

- 6.3.1.1 治理目标宜包括：
 - a) 降低重金属浸出浓度，治理后土壤重金属总量不高于GB 15618规定的风险筛选值，重金属浸出浓度应符合GB 5085.3的限值要求；
 - b) 提高重金属固化稳定化程度，有效态重金属降低率80%~95%，Cd、Pb宜>90%；
 - c) 促进重金属由弱酸可提取态向可还原态、可氧化态及残渣态等稳定赋存形态转化；
 - d) 无侧限抗压强度（UCS）宜较治理前提升0.5MPa~3MPa，测定方法参考GB/T 50123的规定；
 - e) 渗透系数不宜超过 1×10^{-7} cm/s，最大不超过 1×10^{-6} cm/s。
- 6.3.1.2 根据场地调查和检测结果，结合岩溶区溶洞、裂隙、地下暗河等岩溶构造的分布特征及连通性，确定土壤治理范围，包括污染边界、土层深度及污染物迁移范围等。

6.4 技术方案选择

- 6.4.1 治理技术方案应根据污染土性质、污染物特征、场地条件、岩溶发育特征、治理目标及工程经济性进行综合比选。技术方案选择应重点考虑以下因素：
 - a) 污染物去除或稳定化效果；
 - b) 技术适用范围；
 - c) 施工可实施性；
 - d) 环境影响；
 - e) 治理周期；

f) 工程成本。

6.4.2 技术方案确定后,应明确治理工艺流程、材料体系、施工方式及质量控制要求。

6.5 治理费用和周期

6.5.1 治理工程费用应根据污染土规模、治理技术、材料消耗量、施工方式及监测要求综合确定。宜包括但不限于污染调查及方案设计费用、室内试验费用、治理材料费用、工程施工费用、环境监测及效果评价费用。

6.5.2 治理周期应根据污染程度、治理范围、材料反应速率及工程实施条件确定。应充分考虑菌体活性保持、矿物生成过程及养护时间对工程周期的影响。

6.6 治理方案设计

6.6.1 总体设计

6.6.1.1 治理方案设计应根据确定的治理目标和技术路线,明确治理工艺、材料组成、施工参数及质量控制措施。

6.6.1.2 治理技术工艺流程宜包括:污染土预处理→治理材料制备→材料混合→矿化反应调控→养护→治理效果评价。

6.6.2 工程参数设计

应通过室内试验和现场条件分析确定,治理过程中应保证治理材料与污染土充分混合,并根据土层厚度、溶洞及裂隙发育程度、地下水条件等岩溶场地特征,合理确定材料投加量及施工参数,避免治理材料沿岩溶通道发生非预期迁移。主要设计参数包括:

- a) 生物炭类型及投加比例;
- b) 产脲酶菌浓度及投加量;
- c) 尿素和钙源浓度;
- d) 辅助调控材料类型及用量;
- e) 混合方式,宜采用二相法进行投加;
- f) 养护条件及时间。

6.6.3 治理材料

6.6.3.1 一般规定

6.6.3.1.1 治理材料应根据污染土类型、污染物特征、岩溶区环境条件、治理目标及工程条件进行选择。

6.6.3.1.2 治理材料主要包括生物炭、产脲酶菌、尿素、钙源及辅助调控材料等。

6.6.3.1.3 治理材料应满足相关产品质量要求,具有良好的环境相容性和工程适用性,不对微生物活性、生物矿化过程及周边生态环境产生明显不利影响。

6.6.3.2 生物炭

6.6.3.2.1 生物炭来源

生物炭宜采用秸秆、甘蔗渣、木屑、果壳、竹材及其他农林废弃物经限氧热解制备。

6.6.3.2.2 生物炭制备

6.6.3.2.2.1 生物炭热解温度宜为 300℃~700℃。生物炭使用前应进行预处理干燥,含水率应小于 15%。

6.6.3.2.2.2 生物炭应符合以下技术要求:

- a) 粒径控制在 0.25 mm~5 mm 范围内;
- b) pH 值为 7.0~10.5;
- c) 比表面积大于 100 m²/g;
- d) 总孔隙率大于 40%。

6.6.3.2.3 改性生物炭应符合以下技术要求：

- a) 粒径宜控制在 0.25 mm~5 mm 范围内；
- b) pH 值为 6.5~10.5；
- c) 比表面积大于 100 m²/g；
- d) 总孔隙率大于 40%；
- e) 改性过程中不引入对产脲酶菌生长及碳酸盐矿化反应具有明显抑制作用的物质；
- f) 改性后不产生明显有害物质或增加重金属等污染物释放风险；
- g) 改性生物炭具有良好的结构稳定性，使用过程中不应发生明显破碎、溶解或有害物质释放。

6.6.3.2.3 生物炭投加量

生物炭投加量宜为土壤（以质量计）的1%~10%，具体应通过实验室试验或现场试验确定，并结合岩溶构造发育程度、土层厚度及地下水条件合理确定投加量。

6.6.3.3 产脲酶菌

6.6.3.3.1 菌种要求

宜选择菌液浓度OD600值1.2~2.0、pH值6.5~10.5、活性8mmol/(min·OD600)~20mmol/(min·OD600)的菌种。如巴氏芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、假芽孢杆菌属、肠杆菌属、球形乳杆菌、斯氏假单胞菌、蜡样芽孢杆菌等高效产脲酶菌种，也可根据岩溶区土壤pH、地下水环境及现场环境条件选用具有相似矿化能力和环境适应性的菌种。

6.6.3.3.2 菌液保存

应现配现用，储存时间不宜超过72h。菌液制备、运输及储存过程中应避免高温、强酸、强碱及紫外线长时间照射。菌液使用前不应出现明显失活、污染或异常沉淀现象。

6.6.3.4 尿素及钙源

6.6.3.4.1 尿素要求

尿素应符合相关产品质量标准要求。尿素溶液浓度宜为0.25 mol/L~1.50 mol/L。

6.6.3.4.2 钙源要求

钙源宜采用氯化钙、乙酸钙、硝酸钙等易溶性钙盐，常见钙源见附录A。钙源溶液浓度宜为0.25 mol/L~1.50 mol/L。

6.6.3.4.3 配比要求

尿素与钙源摩尔比宜控制在1:1~2:1范围内。反应体系pH值宜控制在6.5~10.5范围内。

6.6.3.4.4 溶液配制

钙源溶液应充分溶解，不应存在明显沉淀或杂质。宜采用去离子水或满足工程要求的洁净水配制。

6.6.3.5 辅助调控材料

6.6.3.5.1 可根据需要添加镁盐、营养盐及 pH 调节剂等辅助材料。镁盐宜采用氯化镁、硫酸镁、醋酸镁等可溶性镁盐。

6.6.3.5.2 辅助调控材料应与生物炭-产脲酶菌体系具有良好的相容性，不应明显抑制菌体生长、脲酶活性及碳酸盐沉淀反应。

6.6.3.5.3 辅助调控材料种类及投加量应根据污染类型、土壤性质及治理目标通过试验确定。

6.6.3.5.4 所有辅助调控材料均不应应对土壤环境、地下水环境及周边生态系统造成新的污染风险。

6.6.3.6 固载产脲酶菌制备

6.6.3.6.1 一般规定

固载产脲酶菌应在治理材料投加前按设计要求完成制备。制备过程应确保产脲酶菌体能够充分附着于生物炭表面及孔隙结构内，并保持较高生物活性和固载均匀性。

6.6.4 菌液准备

选择符合6.6.3.3的产脲酶菌。

6.6.5 生物炭准备

选择符合6.6.3.2的生物炭。

6.6.6 混合固载

按设计投加量将生物炭与产脲酶菌菌液均匀混合，其中生物炭投加量按土体质量确定，产脲酶菌菌液用量根据土壤最优含水率及现场中试和实验室小试确定的投加参数确定。混合过程中应缓慢搅拌，混合完成后宜静置0.5 h~2 h。

6.6.7 现配现用

制备完成的生物炭-产脲酶菌体系宜在12 h内使用完毕；如需暂存，应置于4℃环境下贮存，并在制备后72 h内使用。使用前应重新检测脲酶活性及pH值，确保满足6.6.3.3的要求。

7 重金属污染土壤治理

7.1 一般规定

7.1.1 重金属污染土壤治理的工作程序包括实验室小试、现场中试、治理工程实施，并根据场地条件、污染特征、治理目标和工期要求，合理选择原位治理或异位治理方法。

7.1.2 原位治理适用于深层或不便开挖的污染土壤。施工应充分考虑岩溶区溶洞、裂隙、地下暗河等地质特征。

7.1.3 异位治理适用于污染集中、浅层污染土量适中、质量控制要求高的地块。

7.1.4 施工前应开展详细的地质勘察和现场试验，优化工艺参数。

7.1.5 施工过程中应同步开展过程监测和质量控制。

7.2 适用条件

7.2.1 适用土壤 pH 值宜为 6.5~10.5；当土壤处于酸性环境（ $\text{pH} < 5.5$ ）或强碱性环境（ $\text{pH} > 11$ ）时，应采取中和、调理或预处理措施。

7.2.2 土壤应具备治理介质能够实现有效迁移、扩散和均匀分布的水力条件和结构条件。

7.2.3 对结构致密或低渗透性土壤，应通过扰动、掺砂、裂隙化或其他工程措施改善其渗透性后方可实施。

7.2.4 岩溶发育区应评估溶洞、裂隙及地下水通道的连通性，避免治理介质沿岩溶通道发生大量迁移和流失。

7.2.5 不适用于地下水流速较大、岩溶裂隙及地下水径流通道高度发育，或治理介质难以稳定停留的场地条件。

7.2.6 不适用于以有机污染物、持久性有机污染物或放射性污染物为主要污染因子的污染场地。

7.2.7 不适用于重金属浓度过高且对产脲酶菌活性产生显著抑制作用，且未采取预处理或协同治理措施的污染土壤。

7.3 实验室小试

7.3.1 一般规定

7.3.1.1 工程实施前，开展实验室小试试验，验证治理技术适用性，并确定治理材料组成及关键工程参数。

7.3.1.2 实验室小试应采用具有代表性的现场污染土样，并结合场地岩溶发育特征、土层条件、地下水环境及工程实施条件合理设置试验条件。

7.3.1.3 小试方案应根据污染物类型、污染程度、土壤性质及治理目标进行设计。

7.3.2 试验内容

实验室小试宜包括以下内容：

- a) 不同类型生物炭及投加量对治理效果的影响；
- b) 产脲酶菌固载条件优化；
- c) 菌液浓度及矿化液配比优化；
- d) 辅助调控材料种类及用量优化；
- e) 养护条件及反应周期优化。

7.3.3 试验评价指标

实验室小试评价指标宜包括：

- a) 重金属浸出浓度；
- b) 重金属稳定化效果；
- c) 重金属赋存形态变化；
- d) 碳酸盐矿物生成量；
- e) 土壤强度、渗透性等工程性能指标。

7.3.4 参数确定

7.3.4.1 应根据实验室小试结果确定中试和工程实施应用参数，包括：

- a) 生物炭类型及投加量；
- b) 菌液浓度及投加比例；
- c) 尿素和钙源浓度；
- d) 辅助调控材料用量；
- e) 养护时间及施工参数。

7.3.4.2 现场条件与室内试验条件存在明显差异时，应开展现场中试试验验证后确定最终工程参数。

7.4 现场中试

7.4.1 一般规定

7.4.1.1 工程正式施工前，应根据污染场地条件、治理技术方案及室内试验结果开展现场中试，验证治理技术的工程适用性，并优化施工工艺参数。

7.4.1.2 现场中试区域应具有代表性，宜选择污染程度、土壤性质、岩溶发育特征、地质条件及施工环境与工程区域相近的位置。

7.4.1.3 现场中试应重点评价治理材料在实际场地中的迁移扩散能力、分布均匀性、矿化反应效果及施工可操作性。

7.4.2 中试内容

现场中试宜包括以下内容：

- a) 验证治理施工方式的适用性，包括表面喷淋法、注浆法、翻耕拌和法等；
- b) 确定治理材料投加方式及施工流程；
- c) 优化生物炭投加量、菌液浓度、尿素与钙源配比等材料参数；
- d) 确定施工关键参数，包括：注入压力、注入速率、注入量、注入间隔、灌注量、喷洒次数、混合次数、养护时间等；
- e) 评价治理材料空间分布及矿化反应效果。

7.4.3 中试监测

7.4.3.1 现场中试期间应开展过程监测，监测内容宜包括：

- a) 治理区域 pH 值变化；
- b) 土壤含水率变化；

- c) 治理介质扩散范围及分布均匀性;
- d) 矿化反应过程中碳酸盐矿物生成情况;
- e) 重金属稳定化效果;
- f) 必要时监测电导率变化及环境温度变化。

7.4.3.2 对于岩溶发育区,应重点监测治理介质沿土体、裂隙及渗流通道的迁移路径、扩散范围和流失情况,并监测地下水环境变化。

7.4.4 中试参数确定

7.4.4.1 应根据现场中试结果确定工程施工参数,包括:

- a) 施工方式;
- b) 材料投加比例;
- c) 施工压力及流量;
- d) 施工间隔;
- e) 施工轮次;
- f) 养护周期;
- g) 质量控制指标。

7.4.4.2 当现场中试结果不能满足设计治理目标时,应调整治理方案并重新开展验证。

7.4.5 中试成果

现场中试完成后,应形成中试报告。中试报告内容宜包括:

- a) 场地条件及中试区域概况;
- b) 试验方案及施工过程;
- c) 材料参数及施工参数;
- d) 监测结果;
- e) 治理效果评价;
- f) 工程施工参数建议。

7.5 治理工程实施

7.5.1 原位治理方法

7.5.1.1 一般要求

7.5.1.1.1 治理材料应均匀分布于目标污染区域,不应出现局部富集、遗漏或明显分层现象。

7.5.1.1.2 投加前应根据污染范围、治理深度、土壤性质及岩溶裂隙发育情况确定施工区域、施工方式及投加参数。

7.5.1.1.3 施工时,应先将生物炭均匀投加至目标污染土壤,再投加产脲酶菌液,待菌体充分附着后,依次投加尿素溶液和钙源溶液,促进微生物诱导碳酸盐沉淀反应。

7.5.1.1.4 投加顺序宜按照“生物炭投加→产脲酶菌液投加→菌体附着与适应→尿素溶液投加→钙源溶液投加→矿化反应养护”的流程进行。

7.5.1.1.5 投加过程中应避免治理材料沿岩溶裂隙、溶洞及地下水通道快速迁移或流失,必要时宜采取分区、分段、多点施工等措施。

7.5.1.2 表面喷淋法

7.5.1.2.1 适用场地

适用于浅层重金属污染土壤(治理深度宜小于0.5 m),以及矿山边坡、尾矿堆场、排土场及其他裸露地表污染区域。

7.5.1.2.2 土壤条件

适用于具有一定入渗能力的表层土壤。对于地表板结区域,宜先进行松土处理。

7.5.1.2.3 施工工艺

施工按以下步骤进行：

- a) 清理施工区域，必要时对土壤进行浅层松土；
- b) 按照 7.5.1.1.4 规定的投加顺序，将生物炭均匀撒布于污染土壤表面，并依次喷洒产脲酶菌液、尿素溶液及钙源溶液；
- c) 喷洒过程中应保持均匀，避免局部积液及地表径流；
- d) 喷洒完成后应及时覆盖保湿，并进行养护，养护时间宜为 7 d~28 d。

7.5.1.2.4 工艺参数优化

喷洒量、喷洒次数及喷洒间隔宜根据污染深度、土壤吸液能力及现场监测结果进行调整。对于边坡及易冲刷区域，宜采用少量、多次、分区喷洒方式。

7.5.1.3 注浆法

7.5.1.3.1 适用场地

适用于 0 m~20 m 中深层污染土壤，矿坑平台、尾矿堆积区、排土场等地形较平缓污染区域以及岩溶裂隙发育、机械翻耕困难或污染范围较大的废弃矿山场地。

7.5.1.3.2 土壤条件

适用于具有一定渗透性的砂土、粉土、砂质黏性土及经工程措施改善后的低渗透性土壤，渗透系数宜大于 1×10^{-5} cm/s。

7.5.1.3.3 施工工艺

施工宜按以下步骤进行：

- a) 清除施工区域杂物并整平场地；
- b) 施工前应根据污染范围、治理深度及岩溶发育情况布设注入孔，注入孔宜采用网格状或梅花状布置，孔间距、孔深应根据现场试验及工程设计确定；
- c) 按照 7.5.1.1.4 规定的投加顺序，将生物炭投加至目标污染区域，并采用钻孔注入方式依次注入产脲酶菌液、尿素溶液及钙源溶液；
- d) 注入宜采用低压、低流量施工方式，注入压力宜控制在 0.2 MPa~0.5 MPa；
- e) 注入速率应控制在 0.5 L/min~3 L/min，保持连续、均匀，不应形成地表积液或明显径流；
- f) 施工完成后应及时封孔，并采取覆盖、保湿等养护措施，养护时间宜为 7 d~28 d。

7.5.1.3.4 工艺参数优化

注入压力、注入量、注入轮次及注入间隔宜根据污染深度、土壤渗透性能及岩溶裂隙发育情况优化确定。对于岩溶裂隙发育区域，宜采用分区、分级及多点注入方式。

7.5.1.4 翻耕拌和法

7.5.1.4.1 适用场地

适用于浅层重金属污染土壤（治理深度宜为 0 m~1.0 m），以及矿山平台、排土场及施工条件允许机械作业的区域。不适用于坡度较大、地下水位较浅或岩溶裂隙高度发育的区域。

7.5.1.4.2 土壤条件

适用于能够进行机械翻耕和混合施工的土壤。不适用于坡度较大、地下水位较浅或岩溶裂隙高度发育的区域。

7.5.1.4.3 施工工艺

施工应按以下步骤进行：

- a) 清除施工区域杂物，对土壤进行翻耕松动；
- b) 按照设计要求均匀投加生物炭，并采用机械翻拌使其与污染土壤充分混合；

- c) 按照 7.5.1.1.4 规定的投加顺序, 依次喷洒或灌注产脲酶菌液、尿素溶液及钙源溶液;
- d) 完成施工后整平场地, 并采取覆盖保湿措施进行, 养护时间宜为 7 d~28 d。

7.5.1.4.4 工艺参数优化

翻耕深度、翻拌次数、施工轮次及养护时间宜根据土壤性质、污染程度及现场监测结果进行优化调整。

7.5.2 异位治理方法

7.5.2.1 一般要求

7.5.2.1.1 适用于污染深度宜不超过 5.0 m 的浅层污染土壤, 污染范围相对集中、污染土壤具备开挖和运输条件的废弃矿山场地, 尤其适用于局部高浓度污染区域、表层污染堆积区及原位治理条件受限区域。

7.5.2.1.2 不适用于污染范围过大、开挖工程量巨大或生态环境高度敏感区域。

7.5.2.1.3 对于岩溶区异位治理, 应开展开挖区域稳定性评价, 避免破坏地下溶洞、岩溶裂隙及地下水补给通道。开挖深度及范围不应引起边坡失稳、地面塌陷或污染扩散。

7.5.2.1.4 对于含有大量建筑垃圾、粒径较大岩块、高有机质或强酸性污染土壤, 应进行筛分、破碎或预处理后再实施治理。

7.5.2.2 适用场地

堆场宜选择地形平坦、地基稳定、远离居民区及敏感水体的区域, 并具备防渗、防雨及污染控制条件。岩溶区堆场宜避开溶洞、落水洞及地下水快速径流区域。

7.5.2.3 土壤条件

适用于经开挖筛分后的污染土壤。土壤粒径宜控制在 50 mm 以内; 对于大颗粒岩块或硬质夹杂物, 应进行破碎处理。土壤 pH 宜控制在 6.5~10.5 范围内; 对于强酸性或强碱性土壤, 应进行预处理后实施治理。高黏性或板结污染土宜进行破碎、松散处理, 提高生物炭、菌液及反应溶液的混合均匀性。

7.5.2.4 施工工艺

施工应按以下步骤进行:

- a) 污染土开挖前, 根据中试试验结果, 确定污染范围、污染程度及开挖边界。开挖过程中采取防扬尘、防散落及防二次污染措施, 避免扰动非污染区域;
- b) 污染土运输过程中采取覆盖、洒水抑尘等措施;
- c) 进入处理场地后的污染土先进行筛分、破碎及均化处理, 必要时调整含水率;
- d) 按照设计要求, 将生物炭均匀投加于污染土壤中并机械拌和均匀;
- e) 按照 7.5.1.1.4 规定的投加顺序, 依次加入产脲酶菌液、尿素溶液及钙源溶液。各组分应充分混合, 避免局部浓度过高导致微生物活性降低或矿化产物分布不均;
- f) 混合完成后的治理土宜采用分层堆筑方式进行养护, 堆体高度控制在 1.0 m~2.0 m, 并采取覆盖保湿措施;
- g) 养护期间应根据土壤含水率、pH 值及矿化反应情况进行动态管理, 养护时间宜为 7 d~28 d, 必要时补充菌液、尿素溶液或钙源溶液;
- h) 达到设计养护周期后, 应进行取样检测。满足污染控制、工程性能及环境安全要求后, 可进行回填利用或生态恢复。

7.5.2.5 工艺参数优化

生物炭投加量、菌液浓度、尿素及钙源比例、混合次数、堆体高度及养护周期宜根据污染程度、土壤性质及室内试验结果、现场中试优化确定。治理液用量宜根据土壤含水率、孔隙结构及现场混合效果确定。机械拌和次数宜控制在 2~4 次。结合场地岩溶构造及地下水条件, 合理控制堆场渗漏及污染物向地下水迁移风险, 必要时采取底部防渗、雨水导排及地下水监测措施。

7.5.3 施工方式选择

- 7.5.3.1 治理施工方式应根据污染深度、污染范围、土壤类型、岩溶发育程度、地下水条件及施工可达性等因素综合确定，并结合治理目标优选适宜的施工工艺。
- 7.5.3.2 对于污染范围较大且具备原位施工条件的场地，宜优先采用原位治理技术；对于污染程度较高、污染范围相对集中或原位治理难以实施的区域，宜采用异位治理技术。
- 7.5.3.3 岩溶裂隙发育、地下水埋深较浅或地下水连通性较强的区域，应优先选择治理介质迁移可控的施工方式，并采取分区施工、低压施工及防渗控制等措施，减少治理材料流失及污染迁移风险。
- 7.5.3.4 对于不同工程条件，宜优先采用表 1 所示的施工方式。

表 1 治理材料施工方式选择

场地条件	污染深度	推荐施工方式	适用特点
矿山边坡、尾矿堆场、裸露地表	<0.5 m	表面喷洒法	施工便捷，适用于大面积表层污染治理
地形平缓、可机械施工区域	0 m~1.0 m	翻耕混合法	材料混合均匀，适用于浅层污染土治理
矿坑平台、排土场等浅层污染区域	0 m~20 m	注浆法	治理介质渗透均匀，适用于大面积浅层污染治理
岩溶裂隙发育或地下水敏感区域	根据实际情况	注入法（分区、多点施工）	有利于控制治理介质迁移，提高施工安全性
污染集中、原位治理受限或高浓度污染区域	≤5 m	异位治理法（堆场处理）	开挖集中处理，治理效果稳定，便于质量控制

- 7.5.3.5 当场地条件复杂或污染分布不均时，可采用两种或两种以上施工方式联合实施。
- 7.5.3.6 施工过程中应根据现场监测结果及时优化施工参数，必要时调整施工方式、投加量、投加轮次及养护时间。
- 7.5.4 施工质量控制
- 7.5.4.1 施工记录应包括：施工时间、施工区域、材料种类及用量、材料配比、施工工艺、环境条件、监测结果、异常情况及处理措施。
- 7.5.4.2 施工期间宜监测 pH 值、含水率、温度、电导率。
- 7.5.4.3 应对材料投加量、投加均匀性及施工范围进行检查。
- 7.5.4.4 当出现材料流失、渗漏、异常沉降或治理效果异常时，应及时采取纠正措施。
- 7.5.4.5 工程完成后应形成完整的施工记录、监测记录及质量验收资料。

8 安全与环境保护

8.1 一般规定

- 8.1.1 治理过程应遵循相关规定，建立环境风险应急管理制度、应急预案、应急演练等应急体系管理。
- 8.1.2 施工过程应同步配套安全防护、废气治理、废水治理、固废处置措施。
- 8.1.3 应结合岩溶地区多雨气候特征以及裂隙、溶洞发育等地质特征，制定针对性的安全与环境保护措施。
- 8.1.4 治理过程不应造成岩溶区生态环境不可逆损害，加强产脲酶菌、生物炭等治理材料安全管理以及重金属向岩溶裂隙、地下水通道迁移的风险控制。

8.2 施工期间安全与环境保护

- 8.2.1 岩溶区遇极端天气（暴雨、强风等）应停止施工。
- 8.2.2 接触重金属污染土壤的岗位应配备防护服、防水靴等劳动防护装备，定期进行健康体检。
- 8.2.3 脲酶溶液、胶结液等化学试剂应安全运输与储存。
- 8.2.4 外掺剂不应引入重金属离子、有毒有机物。
- 8.2.5 施工前应对施工设备、注浆设备进行检查与维修，禁止设备破损线缆直接接触湿土或药液。

8.2.6 施工现场应制定完善的应急预案，包括溶液泄漏收集、人员伤亡急救、环境污染事故处置等内容，并配备相应应急物资。

8.3 废液废气处理

8.3.1 施工过程中产生的废液应设置集液沟、渗滤池或抽排水系统及时收集，并做好废液收集系统防渗措施，结合场地岩溶裂隙、溶洞及地下水通道的分布特征。废液宜优先回用，回用率不应低于60%。无法回用的废液应采用吹脱法、吸收法、化学沉淀法或生物脱氮处理工艺处理达标后排放，排放的水质应符合GB 8978的要求。

8.3.2 反应过程中产生的氨气应采取有效控制措施。表面处理区域宜采用覆盖保湿膜、无纺布或吸附材料控制；集中产生区域宜设置酸吸收装置或局部抽气系统收集处理，氨气排放应符合GB 14554或地方相关规定，并应根据风向和地形设置局部抽气系统。

9 治理效果验收及评估

9.1 矿化效果验收及评估

碳酸钙含量应按GB/T 47298的规定进行测定。治理后土壤中碳酸钙含量宜较治理前提高20%以上。

9.2 重金属污染土壤治理效果验收及评估

9.2.1 常见重金属污染物及其总量测定方法见附录B。

9.2.2 常见重金属浸出毒性检测应按GB 5085.3的规定执行，浸出方法优先采用HJ/T 299或HJ/T 300，常见重金属污染物及其浸出活性测定方法见附录C。

9.2.3 治理后土壤常见重金属浸出浓度应符合6.3中的要求。

9.2.4 区域性土壤环境背景值统计应参照HJ 1185的规定执行。

9.2.5 岩溶发育区宜结合场地岩溶发育特征及地下水条件，对治理区域周边地下水环境进行监测，关注重金属及治理过程中产生的相关污染物迁移情况，成效评估可参照T/GXAS 986的规定。

9.3 验收判定

9.3.1 所有检测项目均达到本文件要求的，评定为验收合格。

9.3.2 验收资料应包括：

- a) 施工方案及设计变更文件；
- b) 关键治理材料资料（生物炭、产脲酶菌、尿素、钙源等的质量证明及性能检测报告）；
- c) 施工记录（材料用量、施工工艺参数、养护时间等）；
- d) 治理效果检测报告；
- e) 废液废气处理及环境监测记录。

9.3.3 验收合格后应按有关要求开展后续环境管理及跟踪监测工作。

10 治理监测与维护

10.1 治理监测

10.1.1 监测指标及评价要求

治理效果评估的各项监测指标及评价要求应符合表2的规定。环境安全指标应包括氨氮残留、可溶性盐含量及二次污染评估，微生物菌剂安全评价按HJ/T 415的规定执行。

表 2 监测指标及评价要求

类别	指标	评价要求
污染控制	重金属浸出浓度	满足6.3的要求
生物矿化	CaCO ₃ 含量	较治理前提高20%以上，矿化产物应具有颗粒胶结、孔隙填充及结构桥联作用
工程性能	无侧限抗压强度（UCS）	较治理前提高30%以上
工程性能	承载比（CBR）	较治理前提高20%以上或满足设计要求
工程性能	抗剪强度	较治理前提高20%以上
工程性能	渗透系数	降低1个数量级以上
耐久性	强度保持率（干湿循环后）	不低于70%

10.1.2 区域划分

- 10.1.2.1 监测点位应覆盖全部治理区域，布设应结合施工工艺、污染分布特征及场地岩溶发育特征。
- 10.1.2.2 环境敏感区应根据场地周边敏感受体分布情况设置监测点位，包括居民区、地表水体、水源保护区及农田等。

10.1.3 监测采样方法

- 10.1.3.1 采样方案应明确采样点坐标、采样深度、采样频次及样品编号规则。
- 10.1.3.2 土样采集宜采用系统布点与分层布点相结合的方法，垂向采样深度应大于治理影响深度 0.5 m 以上，每一监测层位不少于 3 个样品。
- 10.1.3.3 物理力学指标测定应采用原状土样，减少扰动并保持样品原始含水率及结构。
- 10.1.3.4 化学分析与生物指标测定可采用扰动样，样品应去除杂物后充分混匀。
- 10.1.3.5 样品应于采集后 4 h 内转入低温环境中保存，运输过程应保持温度记录。

10.1.4 监测频次确定

- 10.1.4.1 治理前应至少开展 1 次基线调查。
- 10.1.4.2 治理过程中宜每 7 d 监测一次关键指标。
- 10.1.4.3 养护阶段宜每 14 d 监测一次。
- 10.1.4.4 治理完成后应至少开展 1 次验收监测。
- 10.1.4.5 岩溶敏感区及地下水敏感区宜开展长期跟踪监测，监测周期宜为 3 个月、6 个月和 12 个月。

10.1.5 监测结果分析

治理后应形成明显碳酸盐矿物沉淀，土壤力学强度、抗渗性能及重金属稳定化效果应达到设计要求。

10.2 维护

10.2.1 治理后场地恢复

- 10.2.1.1 治理施工结束后，应根据工程设计要求对治理区域进行覆土处理，宜采用植被恢复、表层覆盖及水土保持措施。
- 10.2.1.2 覆土应覆盖全部治理区域，有效隔断污染土壤与人体、大气环境之间的直接暴露途径。
- 10.2.1.3 覆土材料、厚度及施工要求应根据场地用途、污染风险等级及工程条件确定。
- 10.2.1.4 在完成覆土处理的基础上，可根据场地利用要求和生态恢复需求开展植被恢复。
- 10.2.1.5 复绿宜选择适应当地环境条件的草本植物，避免因植物选择不适造成新的生态风险。

10.2.2 治理后环境监测

- 10.2.2.1 应对治理后的地下水及土壤进行监测，评价治理工程长期稳定性。
- 10.2.2.2 当监测期间地下水中目标重金属浓度持续满足相关环境标准要求，且未出现明显升高趋势时，可认为治理措施具有良好的长期环境稳定性。
- 10.2.2.3 当出现地下水重金属浓度升高、土壤浸出浓度增加或污染迁移风险增强时，应开展原因分析，并采取补充治理或风险控制措施。地下水监测应利用已有地下水监测井或根据场地条件新建监测井。
- 10.2.2.4 监测井布设应覆盖污染区域、地下水流向下游区域及环境敏感区域。

10.2.2.5 对于岩溶地区，应结合地下水径流通道、溶洞及裂隙发育情况合理布设监测点位，重点关注地下水径流下游及污染物可能迁移区域。

附 录 A
(资料性)
常用钙源

常用钙源见表A. 1。

表 A. 1 常用钙源

序号	名称	化学式
1	二水氯化钙	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
2	无水氯化钙	CaCl_2
3	硝酸钙四水	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
4	醋酸钙	$\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$
5	甲酸钙	$\text{Ca}(\text{HCOO})_2$
6	氢氧化钙	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
7	废弃贝壳	CaCO_3

附 录 B

(资料性)

岩溶废弃矿山常见重金属污染物及其总量测定方法

岩溶废弃矿山常见重金属污染物及其总量测定方法见表B. 1。

表 B. 1 岩溶废弃矿山常见重金属污染物及其总量测定方法

序号	重金属种类	测定方法	标准编号
1	Pb	石墨炉原子吸收分光光度法	GB/T 17141
		火焰原子吸收分光光度法	HJ 491
2	Cd	石墨炉原子吸收分光光度法	GB/T 17141
		波长色散X射线荧光光谱法	HJ 780
3	As	微波消解/原子荧光法	HJ 680
4	Hg	微波消解/原子荧光法	HJ 680
5	Cr	火焰原子吸收分光光度法	HJ 491
6	Zn	火焰原子吸收分光光度法	HJ 491
7	Cu	火焰原子吸收分光光度法	HJ 491

附 录 C
(资料性)

岩溶废弃矿山常见重金属污染物及其浸出毒性浸出方法

岩溶废弃矿山常见重金属污染物及其浸出毒性浸出方法见表C. 1。

表 C. 1 岩溶废弃矿山常见重金属污染物及其浸出毒性浸出方法

序号	重金属种类	测定方法	标准编号
1	浸出前处置	固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法	HJ/T 299
2		固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法	HJ/T 300
3	Pb	电感耦合等离子体质谱法	HJ 766
4	Cd	电感耦合等离子体质谱法	HJ 766
5	Hg	微波消解/原子荧光法	HJ 702
6	Cr	电感耦合等离子体质谱法	HJ 766
7	Zn	电感耦合等离子体质谱法	HJ 766
8	Cu	电感耦合等离子体质谱法	HJ 766

参 考 文 献

- [1] GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].
 - [2] GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S].
 - [3] GB 18599—2020 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准[S].
 - [4] GB/T 23739—2009 土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法[S].
 - [5] T/CSES 153—2024 有机污染场地土壤生物修复技术规范 微生物固定化生物炭载体[S].
 - [6] T/GDAEPI 14—2023 电子废物拆解场地复合污染土壤生物炭固载微生物原位修复技术规范[S].
 - [7] T/GDTR 01—2023 岩溶山地区金属矿区土壤污染风险管控与修复技术规范[S].
 - [8] T/WSES 0001—2023 土壤重金属钝化剂富硅生物炭制备技术规程[S].
 - [9] 王欣文, 苏超. 产脲酶微生物矿化修复铜污染溶液效果研究[J]. 环境工程, 2023(S2).
 - [10] 张大奕, 刘志强, 么琳颖, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀生物炭联用技术修复农田污染土壤的关键机制和应用前景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(6): 1958–1980.
-