

T/GXAS

团 体 标 准

T/GXAS XXXX—XXXX

植物源脲酶矿化治理岩溶区重金属污染土壤技术规范

Technical specification for the treatment of heavy metal contaminated soil by plant source urease mineralization in karst areas

（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 II

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

6 重金属污染土壤治理工程设计 2

 6.1 一般规定 2

 6.2 资料复核 2

 6.3 治理目标和治理范围 2

 6.4 技术方案选择 3

 6.5 治理费用和周期 3

 6.6 治理方案设计 3

7 重金属污染土壤治理 4

 7.1 一般规定 4

 7.2 适用条件 4

 7.3 实验室小试 4

 7.4 现场中试 5

 7.5 治理工程实施 5

8 安全与环境保护 8

9 治理效果验收及评估 8

 9.1 矿化效果验收及评估 8

 9.2 重金属污染土壤治理效果验收及评估 8

 9.3 验收判定 8

10 治理监测与维护 9

附录 A（资料性） 常见的产生植物源脲酶的植物种类、脲酶活性 10

附录 B（资料性） 常用钙源 11

附录 C（资料性） 原位治理不适用或需预处理的情况 12

附录 D（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 1

附录 E（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 错误！未定义书签。

参考文献 错误！未定义书签。

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、中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司、广西环保产业投资集团有限公司、河南大学、湖北工业大学、重庆市绿色生物建造高等研究院、江西水利电力大学、福州大学、武汉大学、东南大学、宁波大学、桂林电子科技大学、广西壮族自治区环境保护科学研究院、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、广西博环环境咨询服务有限公司。

本文件主要起草人：宋宇、黄翔、张树光、李佳明、刘锋涛、张铭致、陈凯斌、陈国桓、赖叶伟、孔智麟、黄晨楠、李喜庆、范荣洋、郭明凡、黄锦孙、陈豪、黄淞、韦成龙、程雨、唐瑜鸿、张洁、刘富奇、李志坚、谢久兵、李波、罗世政、黄威、黎秋君、覃新宇、张靖、常鹏、卢德海、雷婕、张建伟、边汉亮、马强、舒航、杨阳、崔猛、黄明、崔明娟、许凯、郑俊杰、章荣军、杜延军、王艳、吴迪、程峰、彭小玉、刘慧琳、高何凤、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、毛国斌。

植物源脲酶矿化治理岩溶区重金属污染土壤技术规范

1 范围

本文件界定了植物源脲酶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 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 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 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
- T/GXAS 986 废弃矿山生态修复工程成效评估技术规范
- T/GXAS 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

3 术语和定义

HG/T 20713、HJ 682界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

植物源脲酶矿化 plant-derived urease enzyme-induced carbonate precipitation

从豆科植物等来源提取的脲酶催化尿素水解生成碳酸根离子，碳酸根离子与钙离子结合生成碳酸钙沉淀的过程。

3.2

胶结液 cementation solution

由尿素、钙源配制而成用于注入或喷淋至污染土中的混合水溶液材料。

4 工作程序

见图1。

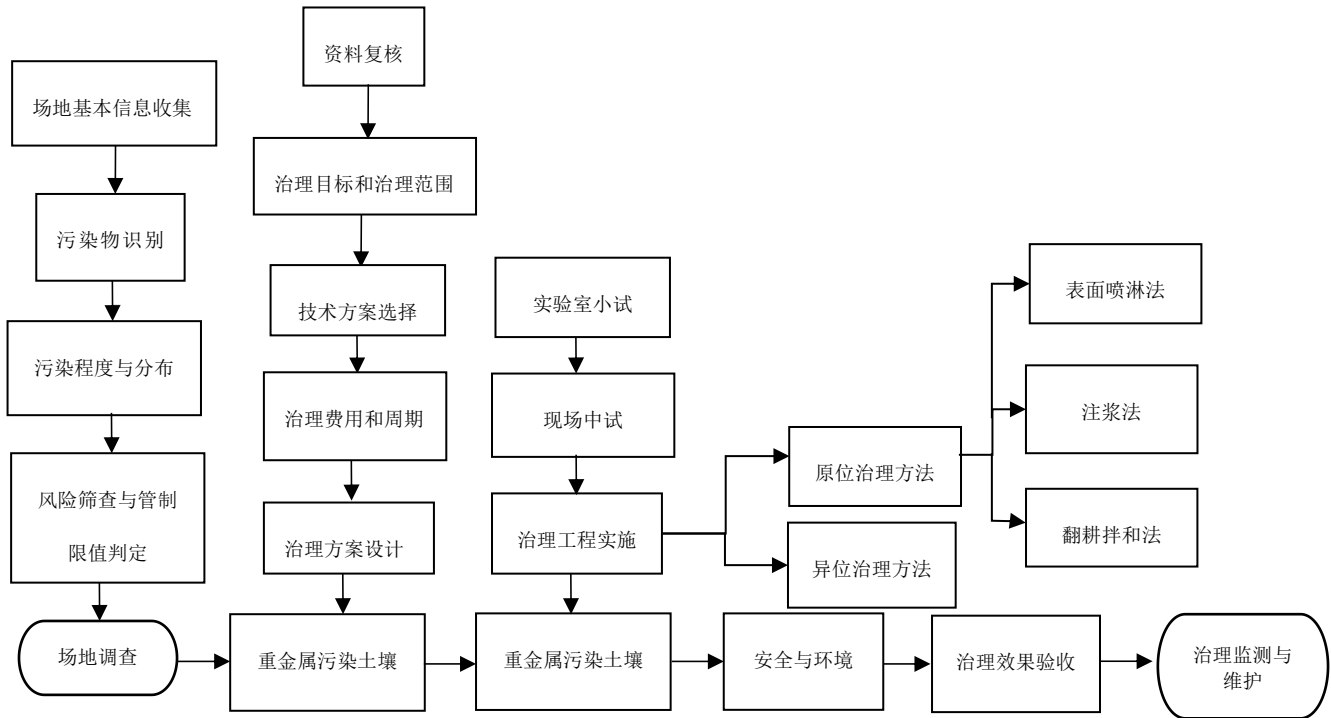


图 1 治理工作程序

5 场地调查

应符合T/GXAS XXXX的规定。

6 重金属污染土壤治理工程设计

6.1 一般规定

采用植物源脲酶矿化治理技术时，应充分考虑植物源脲酶矿化效果、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。其他应符合T/GXAS XXXX的规定。

6.2 资料复核

应T/GXAS XXXX的规定。

6.3 治理目标和治理范围

6.3.1 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 0.5 MPa~3 MPa，测定方法参考 GB/T 50123 的规定；
- e) 渗透系数不宜超过 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，最大不应超过 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 。

6.3.2 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

应符合T/GXAS XXXX的规定。

6.5 治理费用和周期

除应符合T/GXAS XXXX的规定，还应充分考虑脲酶贮存、活性保持、矿化反应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 应 T/GXAS XXXX 的规定。

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) 脲酶来源及活性测定；
- b) 植物源脲酶掺量及酶胶比；
- c) 胶结液中尿素和钙源浓度；
- d) 辅助调控材料类型及用量；
- e) 混合方式，包括一相法和二相法，优先采用一相法进行投加；
- 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 植物源脲酶矿化治理所用材料包括脲酶、尿素、钙源及外掺剂等。

6.6.3.1.3 所有治理材料应符合国家相关产品质量标准要求，不应引入新的重金属污染。

6.6.3.2 脲酶

6.6.3.2.1 脲酶来源

脲酶应采用植物源脲酶，从豆科植物或种子中提取，包括但不限于大豆、刀豆、西瓜籽等，常见的产生植物源脲酶的植物种类、脲酶活性见附录A。

6.6.3.2.2 脲酶制备

6.6.3.2.2.1 将植物源（如大豆、刀豆、西瓜籽等）烘干，磨碎，筛分后放入密封袋中保存备用。

6.6.3.2.2.2 按质量配比将豆粉与水混合，搅拌 30min 后静置沉淀至溶液分层。取上层清液离心 30min，过滤、收集，贮存备用。

6.6.3.2.2.3 脲酶提取可加入精提剂进行脲酶精提，或采用不同尺寸滤网进行过滤。

6.6.3.2.2.4 豆粉浓度应根据脲酶活性选取，宜为 70 g/L~100 g/L。

6.6.3.2.3 脲酶活性测定

脲酶活性采用电导率法测定。将脲酶溶液与1.00 mol/L尿素溶液按1:9比例混合，通过电导率仪测定电导率变化，并按公式（1）计算脲酶活性，脲酶活性宜为8 mM/min~14 mM/min。

$$U = \Delta\sigma \times 1.11/\Delta t \times 100 \cdots \cdots \cdots (1)$$

式中：

- U —— 脲酶活性，单位为毫摩尔每分钟（mM/min）；
- $\Delta\sigma$ —— 电导率变化量，单位为毫西门子每厘米（mS/cm）；

Δt —— 反应时间，单位为分钟（min）。

6.6.3.3 胶结液

6.6.3.3.1 尿素及钙源要求

6.6.3.3.1.1 尿素、钙源应符合相关产品质量标准要求。

6.6.3.3.1.2 钙源宜采用氯化钙、乙酸钙、硝酸钙等易溶性钙盐，也可选用废弃贝壳等低成本钙源。常用钙源见附录B。

6.6.3.3.1.3 尿素、钙源应满足纯度要求，不应含有影响矿化效率的杂质。

6.6.3.3.1.4 可添加脱脂奶粉或生物炭等外掺剂增强成核和固定效果。外掺剂不应影响脲酶活性、矿化效率及环境存在显著负面影响，使用量应经室内试验验证。

6.6.3.3.2 胶结液配制

6.6.3.3.2.1 胶结液采用尿素与钙源按比例加水混合制备，设计浓度应经实验室小试、现场中试校核。

6.6.3.3.2.2 尿素溶液浓度宜为 0.25 mol/L~1.50 mol/L。

6.6.3.3.2.3 钙源溶液浓度宜为 0.25 mol/L~1.50 mol/L。

6.6.3.3.2.4 尿素与钙源摩尔比宜控制在 1:1~1:2 范围内。

6.6.3.3.2.5 胶结液应充分溶解，不应存在明显沉淀或杂质。

6.6.3.3.2.6 溶液用水宜采用去离子水或满足工程要求的洁净水。

6.6.3.3.3 贮存方法

脲酶、胶结液应即配即用，如需暂存应置于4℃环境下贮存，在制备后72 h内使用。使用前应按6.6.3.2.3进行脲酶活性测定。胶结液取用前应充分搅拌混合。

7 重金属污染土壤治理

7.1 一般规定

应符合T/GXAS XXXX的规定。

7.2 适用条件

7.2.1 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。

7.2.2 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。

7.2.3 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。

7.2.4 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。

7.2.5 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。

7.2.6 根据不同土壤渗透性、孔隙率条件，应采用不同尺寸滤网、精提剂对脲酶溶液进行过滤或精提。

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，确定脲酶活性、胶结液浓度、酶胶比最优配比方案。

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) 脲酶提取条件及方法优化；

- b) 脲酶浓度及胶结液配比优化;
- c) 辅助调控材料种类及用量优化;
- d) 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) 脲酶提取方法;
- b) 脲酶浓度、尿素和钙源浓度;
- c) 酶胶比;
- d) 辅助调控材料用量;
- e) 养护时间及施工参数。

7.3.4.2 室内试验应验证治理后重金属浸出浓度等关键指标是否达到治理目标值。

7.3.4.3 植物源脲酶矿化治理液注入/喷洒/拌和方法分为一相法与二相法。一相法将脲酶溶液与胶结液预先混合成单一处理液一次性注入; 二相法先注入脲酶溶液、后注入胶结液。宜优先选用一相法。

7.3.4.4 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

应T/GXAS XXXX的规定。

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) 优化脲酶、尿素、钙源及外掺剂等材料参数;
- 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;
- 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

应T/GXAS XXXX的规定。

7.4.4 中试参数确定

应T/GXAS XXXX的规定。

7.4.5 中试成果

应T/GXAS XXXX的规定。

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 适用土壤含水率宜小于 35%。

7.5.1.1.2 浅层污染宜采用表面喷淋法，黏性土宜采用翻耕拌和法，中深层污染（0 m~20 m）宜采用注浆法。

7.5.1.1.3 场地地下水流速不宜过高，不应存在强还原或强酸环境。

7.5.1.1.4 岩溶发育区应评估溶洞连通性，避免治理溶液大量流失。

7.5.1.1.5 原位治理不适用或需预处理的情况见附录 C。

7.5.1.2 表面喷淋法

7.5.1.2.1 适用场地

应T/GXAS XXXX的规定。

7.5.1.2.2 土壤条件

适用于渗透系数较高的砂土、粉砂土等土壤。

7.5.1.2.3 施工工艺

施工按以下步骤进行：

- a) 场地整平：清除地表杂物、浮石、杂草及植物残留根系，平整坡面。坡面过大时应设置挡板或分台；
- b) 取现场污染土样进行实验室小试，确定最优治理配比；
- c) 现场制备脲酶、胶结液，或室内制备后妥善保存运输至现场，贮存方法按 6.6.3.3.3 的规定执行；
- d) 脲酶、胶结液使用前应充分搅拌，胶结液应澄清、洁净；
- e) 宜采用一相法进行喷淋，溶液充分混合后及时使用，避免矿化反应导致喷管堵塞；
- f) 采用二相法时，应先喷淋脲酶溶液、后喷淋胶结液，二者间隔时间不宜过长；
- g) 喷淋应采用喷雾器或喷灌系统均匀喷淋。单轮喷淋量宜为 $4\text{ L/m}^2 \sim 12\text{ L/m}^2$ ，分多轮进行，每轮间隔 24 h。可根据重金属污染浓度、土壤渗透系数而定，高污染、深度大可增加喷淋次数和喷淋量；
- h) 施工环境温度不应低于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或高于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可根据实际情况采取必要的措施降温或升温，最宜温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- i) 喷淋后应立即覆盖保湿膜或无纺布，低温或干旱条件下宜增加脲酶用量或延长养护周期；
- j) 喷淋完成后自然或人工保湿养护 7 d~14 d。

7.5.1.2.4 工艺参数优化

溶液总量宜按土壤孔隙体积的1.5~3倍计算。可先采用低浓度胶结液（ $0.3\text{ mol/L} \sim 0.5\text{ mol/L}$ ）喷淋诱导成核，再以高浓度胶结液喷淋强化沉淀。

7.5.1.3 注浆法

7.5.1.3.1 适用场地

应符合T/GXAS XXXX的规定。

7.5.1.3.2 土壤条件

应符合T/GXAS XXXX的规定。

7.5.1.3.3 施工工艺

施工应按以下步骤进行：

- a) 勘察与布孔：采用地球物理探测与钻探手段确定污染范围、裂隙分布和地下水流向。注浆孔采用网格或梅花形布置，孔间距宜为 $0.5\text{ m} \sim 2\text{ m}$ ，孔径 $50\text{ mm} \sim 100\text{ mm}$ ，可根据现场试验及工程设计调整；（混凝土）
- b) 脲酶、胶结液制备按 5.2.2 和 5.3.2 的规定执行；

- c) 可采用一相法或二相法施工，优先采用一相法；
- d) 注浆设备应包含高压注浆泵、注浆管、流量及压力监测系统；
- e) 采用自下而上分段注浆，每段 1 m~3 m，注入压力宜控制在 0.2 MPa~0.5 MPa；
- f) 注入量宜为孔隙体积的 1 倍~4 倍，注入速率应控制在 0.5 L/min~3 L/min；
- g) 注浆应分 3~6 轮完成，每轮间隔 1 d~3 d；
- h) 注浆孔应避免直接打入地下水主要溶洞层或强径流通道，必要时采取预封堵措施。可采用分级注浆方式，先注入低浓度胶结液 0.3 mol/L~0.5 mol/L，再注入高浓度胶结液；
- i) 注浆完成后封孔养护 7 d~14 d。

7.5.1.3.4 工艺参数优化

岩溶区特殊措施包括预注封堵浆控制流失、负压辅助抽吸提高均匀性、结合水平定向钻或多孔连通注浆等。地下低温区或低pH区域宜延长反应时间或增加注浆量。注浆量及配比方案可以根据现场情况进行优化。

7.5.1.4 翻耕拌和法

7.5.1.4.1 适用场地

应符合T/GXAS XXXX的规定。

7.5.1.4.2 土壤条件

应符合T/GXAS XXXX的规定。

7.5.1.4.3 施工工艺

施工应按以下步骤进行：

- a) 施工前清除地表杂物、浮石、大块岩渣及障碍物。对不平整场地进行平整或设置分台。
- b) 脲酶、胶结液制备按 5.2.2 和 5.3.2 执行。
- c) 采用机械翻耕设备对污染土壤进行翻耕松动，翻耕深度宜为 0.3 m~1.0 m。
- d) 溶液用量按土壤孔隙体积的 1.5~3 倍计算；现场应先测定土壤含水率和容重以供计算单次拌合面积的土壤质量，再确定溶液总量。溶液可分批配制，分次喷洒。
- e) 分层分次拌和：第一层厚度 0.3 m~0.5 m，均匀喷洒治理液的 1/2~2/3 后翻拌 2~3 次；再喷洒剩余治理液，整体翻拌宜 2~4 次；单批拌和时间控制在 5 min~15 min。
- f) 多轮拌和宜进行 2~4 轮，每轮间隔 1 d~3 d。
- g) 拌和完成后整平土面、轻度压实，压实度控制在 95% 以下，覆盖保湿膜、无纺布或 2 cm~5 cm 细土。
- h) 养护期间根据土壤墒情补充喷洒清水或低浓度溶液保湿，养护时间宜为 7 d~14 d；
- i) 处理完成后进行表面整形，如回填 10 cm~30 cm 表层耕植土或覆盖层。

7.5.1.4.4 工艺参数优化

7.5.1.4.4.1 溶液浓度、酶活性及添加剂比例应根据室内试验结果进行优化调整。

7.5.1.4.4.2 翻耕深度、拌和轮次及间隔时间可结合土壤渗透性和反应监测数据动态优化。压实度应根据后续植被恢复需求优化。

7.5.1.4.4.3 养护期间保湿措施和补充溶液量可根据实时土壤含水率、pH 和温度监测结果进行优化。低温或干旱条件下宜增加脲酶用量或延长养护周期。

7.5.2 异位治理方法

7.5.2.1 一般要求

应符合T/GXAS XXXX的规定。

7.5.2.2 适用场地

应符合T/GXAS XXXX的规定。

7.5.2.3 土壤条件

适用土壤粒径控制在50 mm以内，高黏性或板结土壤需预先破碎松散；对于大颗粒岩块或硬质夹杂物，应进行破碎处理。

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) 挖掘后的污染土运输至堆场时应采取覆盖、洒水抑尘等措施；
- c) 入场土壤应筛分破碎，粒径控制在 50 mm 以下，必要时预先调节含水率和 pH 值；
- d) 脲酶、胶结液制备按 5.2.2 和 5.3.2 的规定执行；
- e) 采用专用土壤拌和设备或分层堆筑法，将土壤与酶诱导碳酸钙沉淀治理液均匀拌和；
- f) 拌和完成后按堆高 1.0 m~2.0 m 堆筑成规则土堆，整平、轻度压实，压实度 85%~90%，覆盖保湿膜或土工布；
- g) 养护期间定期翻堆保湿或补充低浓度溶液，养护时间宜为 14 d~28 d；
- h) 处理完成后取样检测，合格后回填原场地或生态覆盖。回填时应分层压实至设计密实度。

7.5.2.5 工艺参数优化

溶液用量宜为土壤最优含水率配制或按孔隙体积的1.5~3.5倍。拌和次数宜为2~4次，堆高和养护周期可结合温湿度监测数据动态调整，并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

应符合T/GXAS XXXX的规定。

7.5.4 施工质量控制

应符合T/GXAS XXXX的规定。

8 安全与环境保护

应符合T/GXAS XXXX的规定。

9 治理效果验收及评估

9.1 矿化效果验收及评估

应符合T/GXAS XXXX的规定。

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 D。

9.2.2 常见重金属浸出毒性检测应按 GB 5085.3 的规定执行，常见重金属污染物及其浸出毒性浸出方法参照 T/GXAS XXXX 的执行。

9.2.3 治理后土壤重金属浸出浓度应符合 6.3 中的规定。

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（脲酶活性、尿素、钙源质量证明）；
- c) 施工记录（溶液用量、拌和轮次、养护时间等）；
- d) 治理效果检测报告；
- e) 废液废气处理记录。

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

应符合T/GXAS XXXX的规定。

附 录 A

(资料性)

常见的产生植物源脲酶的植物种类、脲酶活性

常见的产生植物源脲酶的植物种类、脲酶活性见表A. 1。

表 A. 1 常见的产生植物源脲酶的植物种类、脲酶活性

序号	来源	豆粉掺量 (g/L)	脲酶活性 (mM/min)
1	大豆	100	15~16
2	刀豆	30	21~25
3	黑豆	100	4~5
4	绿豆	100	0.25~0.5
5	西瓜籽	100	10~12
6	剑豆	30	20~25

附 录 B
(资料性)
常用钙源

常用钙源见表B. 1。

表 B. 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 C
(资料性)

原位治理不适用或需预处理的情况

原位治理不适用或需预处理的情况见表C. 1。

表 C. 1 原位治理不适用或需预处理的情况

序号	不适用情况	处理方法
1	高黏性土	预注浆改善或联合浅层搅拌
2	强酸性土	外掺剂调节pH
3	地下水流速高、暗河	设置截流或回抽系统
4	高有机质土	/

附 录 D
(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D. 1。

表 D. 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