

ICS 13.030.01

CCS Z00

T/SSSC

中国土壤学会团体标准

T/SSSC 0 —2025

锂渣基人造土壤矿区生态修复技术规范

Technical specification for ecological restoration of mining areas using lithium
slag-based artificial soil

(征求意见稿)

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

中国土壤学会 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	2
4 总体要求	3
5 本底调查	5
6 锂渣基人造土壤制备	7
7 生态修复	10
附录 A	15

前 言

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。

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。

本文件由中国土壤学会提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院南京土壤研究所、生态环境部固体废物与化学品管理技术中心、江西赣锋锂业集团股份有限公司、中国科学院过程工程研究所、中国科学院赣江创新研究院、生态环境部南京环境科学研究所、江西九岭锂业股份有限公司。

本文件主要起草人：滕应、徐勇峰、赵玲、任文杰、张靖云、许涓、彭爱平、李会泉、王东、李强、甘信宏、卜元卿、张后虎、魏冬冬、姚丽。

锂渣基人造土壤矿区生态修复技术规范

1 范围

本文件规定了锂渣基人造土壤用于矿区生态修复的总体要求、本底调查、锂渣基人造土壤制备、生态修复等内容。

本文件适用于露天开采矿区生态修复工程的主要环节，重点规范以锂渣为主要原料制备人造土壤并用于矿区土壤重构的技术过程。本文件不适用于铀钍及伴生放射性矿区的生态修复。

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 3838 地表水环境质量标准

GB 4284 农用污泥污染物控制标准

GB 5085.7 危险废物鉴别标准通则

GB 8978 污水综合排放标准

GB 15618 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB 18599 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准

GB 36600 土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB/T 12719 矿区水文地质工程地质勘查规范

GB/T 14848 地下水质量标准

GB/T 15776 造林技术规程

GB/T 19610 有机肥料鸡粪有机肥

GB/T 32740 自然生态系统土壤长期定位监测指南

- GB/T 33891 绿化用有机质
- GB/T 38360 裸露坡面植被恢复技术规范
- HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则
- HJ 164 地下水环境监测技术规范
- HJ 557 固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法
- HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境
- HJ 737 土壤和沉积物 铍的测定 石墨炉原子吸收分光光度法
- HJ 1080 土壤和沉积物 铊的测定 石墨炉原子吸收分光光度法
- HJ 1172 全国生态状况调查评估技术规范 一生态系统质量评估
- HJ 1315 土壤和沉积物 19 种金属元素总量的测定 电感耦合等离子体质谱法
- HJ/T 20 工业固体废物采样制样技术规范
- HJ/T 91 地表水和污水监测技术规范
- HJ/T 166 土壤环境监测技术规范
- LY/T 2241 森林生态系统生物多样性监测与评估规范
- NY/T 1121.4 土壤检测 第 4 部分 土壤容重的测定
- NY/T 1121.6 土壤检测 第 6 部分 土壤有机质的测定
- NY/T 1342 人工草地建设技术规程
- NY/T3034 土壤调理剂通用要求
- TD/T 1036 土壤复垦质量控制标准
- DB36/ 1282 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

锂渣 lithium slag

以锂云母、锂辉石等为主要原料，经火法或湿法冶炼生产锂产品过程中于焙烧熟料浸出工序产生的固体残渣。该残渣具有多孔、质轻的物理特性，主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等，且呈偏碱性，此特性是其作为土壤改良基质应用的基础。

3.2**锂渣基人造土壤 lithium slag-based artificial soil**

以锂渣为主要原料，与建筑渣土、有机物料及其他功能助剂按特定配比人工复合而成的基质材料，主要用于重构矿区土壤剖面、改良基质理化性质及修复受损的生态系统。

3.3**矿区生态修复 mine ecological restoration**

通过人为干预和自然恢复相结合的方式，修复受损矿区的生态系统结构，恢复其生态功能与服务，并使之与周边自然环境协同共生的过程。

[来源：DB53/T 1269，3.4，有修改]

4 总体要求**4.1 基本原则****4.1.1 安全性原则**

应确保锂渣基人造土壤从制备到生态修复应用的全过程环境与人员安全。须对原料及成品进行系统性环境风险评估，确保其长期使用不会对周边原生土壤、地下水及生态系统造成二次污染。同时，应规范施工操作，保障人员安全与健康。

4.1.2 科学性原则

锂渣基人造土壤的配方设计与应用方案应遵循科学规律。应基于矿区立地条件、修复目标及原料特性，通过科学论证确定组分配比、制备工艺与生态恢复技术，确保其具备良好的理化性质与生

态功能。

4.1.3 合规性原则

锂渣基人造土壤的制备、运输、施工及后期管护全过程，应符合国家及地方相关的环保法规、产品标准与技术规范。应建立全过程环境监控体系，确保修复效果满足既定生态环境质量标准。

4.1.4 可行性原则

锂渣基人造土壤的技术方案应具备全面的可行性。需综合考虑技术成熟度、经济成本、当地资源条件及工程可操作性，确保技术路线科学、经济合理、便于实施与推广，实现生态效益与实用价值的统一。

4.2 工作流程

锂渣基人造土壤用于生态修复工作程序见图 1。

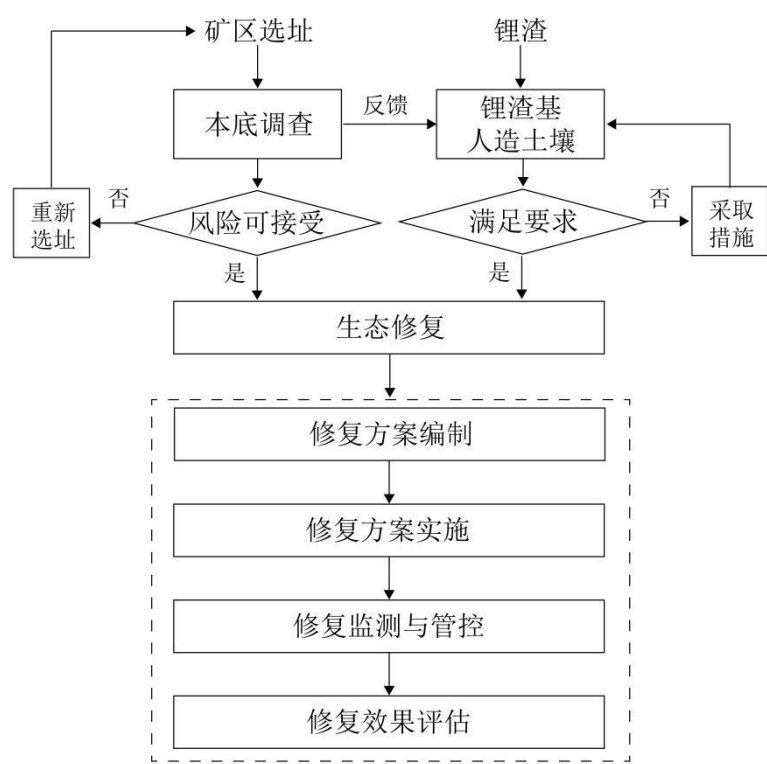


图 1 锂渣人造土壤基质用于矿区生态修复的工作流程

4.3 矿区选址要求

4.3.1 使用锂渣基人造土壤进行生态修复时，选址应统筹考虑区域国土空间规划、生态环境保护规

划以及水土资源保护专项规划等要求，严格落实“三线一单”管控规定，并依法履行环境影响评价与排污许可管理制度。同时，生态恢复目标及相关技术措施应契合矿区长远发展战略，符合《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范》等专项技术标准的要求。

4.3.2 使用锂渣基人造土壤进行矿区生态修复时，应避免滑坡、泥石流多发带和活动断层等地质灾害极高和高风险区，避开饮用水水源保护区、自然保护地及生态保护红线等环境敏感区域。

4.3.3 使用锂渣基人造土壤进行矿区生态修复时，须确保回填区地质条件满足地基承载力要求，防止因局部下沉对防渗、管道等设施造成破坏，从而杜绝由此引发的环境与安全风险。

4.3.4 使用锂渣基人造土壤进行矿区生态修复时，场地选址的适宜性，应综合考量区域水文地质、工程地质及环境地质等基础资料，结合场地现状调查与污染特征分析结果，并以不稳定斜坡、渗透性等地质灾害风险为核心评估内容来确定，兼顾技术可行性与经济合理性。

5 本底调查

5.1 一般要求

通过文献调研、资料收集、现场调查和人员访谈相结合的方式，详细考察地表矿区所在水文地质单元的自然环境、环境质量本底和环境风险等，确保调查的全面性和规范性。

5.2 矿区调查

5.2.1 矿区调查内容应包括地质结构、地形地貌、水文地质、气象与土地利用调和生态现状的基本特征。

5.2.2 地质结构调查宜包括矿区所处的地形地貌、地层结构、地层稳定性和区域岩性等。

5.2.3 地形地貌调查宜包括影响矿区安全的危岩体、高边坡和破碎斜坡等岩体形态的规模、分布和发育程度等，同时明确矿区地质灾害隐患的类型、分布、规模及其现状。

5.2.4 水文地质调查宜针对矿区及其流域的地表水和地下水的基本水文特征确定，宜包括包气带特征、地表水水系特征、多年平均径流量及其特征值、地下水类型、含水层分布特征、水力联系，以及

地下水的补给和排泄情况和地下水水位动态变化等，且应符合 GB/T 12719 和 HJ 610 的规定。

5.2.5 气象与土地利用调查宜包括多年平均的气象要素，如降水、蒸发、气温、风向和风速，以及相应的土地条件、利用现状和规划等。

5.2.6 生态现状调查宜包括矿区及其周边植被类型、群落结构、优势植物种类和常见植物种类，以及动物种群类型和数量等。

5.3 环境质量调查

5.3.1 调查矿区及周边区域范围内土壤、地表水及地下水的环境质量本底值。

5.3.2 土壤质量本底值调查。根据地表矿区周边地形特征、主导风向和地表径流方向设置采样点，且应符合 HJ/T 166 中监测布点与采样的要求；监测指标可参照 GB 36600、GB 15618 并结合锂渣的污染特征因子合理确定，应包括但不限于：pH、镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍等基本重金属指标，以及铍、铊、氟、锰等锂渣特征污染物。具体指标的检测应参照 HJ 1315、HJ 737 及 HJ 1080 等标准执行。

5.3.3 地表水质量本底值调查。矿区周边如有受影响的地表水，则遵循 HJ/T 91 中监测布点与采样要求；监测指标可参照 GB 3838 并结合锂渣的污染特征因子合理确定，应包括但不限于：pH、化学需氧量、氨氮、总磷、氟化物等基本指标，以及铍、铊、氟、锰等锂渣特征污染物。

5.3.4 地下水质量本底值调查。在矿区地下水流向上下游及周边设监测井，遵循 HJ 164 中监测布点与采样要求；监测指标可参照 GB/T 14848 并结合锂渣的污染特征因子合理确定，应包括但不限于：pH、总硬度、硫酸盐、氯化物、氟化物等基本指标，以及铍、铊、氟、锰等锂渣特征污染物。

5.4 环境风险评估

基于矿区和环境质量本底调查结果、生态恢复后土地利用性质、规划用途等，按照 HJ 25.3 的规定进行环境风险评估，重点评估地下水及周边土壤的环境风险。如果评估结果显示环境风险在可接受范围内（如污染物浓度增量未超过风险控制值），则该区域可作为锂渣基人造土壤用于生态修复的

适宜区。

6 锂渣基人造土壤制备

6.1 原料要求

6.1.1 锂渣原料要求

(a) 对锂渣贮存场的采样按照 HJ/T 20 的要求采集样品。

(b) 采集的锂渣样品按照 HJ 557 规定方法获取浸出液，锂渣特征污染物浓度、pH 值等物理化学指标可参照 GB 5085.7 测定。

(c) 锂渣的浸出液特征污染物浓度应符合 GB 18599 的规定，且 pH 值为 6-9，属于一般工业固体废物。

6.1.2 锂渣基人造土壤要求

(a) 锂渣基人造土壤应由符合 6.1.1 要求的锂渣与多种辅助材料复配而成。辅助材料应包括但不限于建筑渣土、有机物料、团粒促进剂、保水剂、微生物菌剂、重金属稳定剂及结构稳定剂。有机物料的选用范围包括活性污泥、禽畜粪便有机肥、农林废弃物（如秸秆、木屑）等。所有有机物料应满足有机质含量宜大于 30%，重金属含量宜低于 GB 15618 筛选值；其中，活性污泥宜符合 NY/T3034 的规定，禽畜粪便有机肥宜符合 GB/T 19610 的规定。

(b) 锂渣及辅助材料宜经干燥处理后粉碎过筛（锂渣粒径 ≤ 2 mm，建筑渣土与钢渣粒径 ≤ 5 mm，有机物料中污泥与鸡粪为 2-5 mm 颗粒、秸秆为 5-10 mm 纤维段）。应根据不同土层（表土层、淋溶层、淀积层、母质层）的功能目标进行配方设计。配方优化应确保锂渣基人造土壤中有害金属元素含量低于 DB36/ 1282 规定的第二类用地风险筛选值。

(c) 优化后的锂渣基人造土壤应满足环境稳定性要求，并通过毒性浸出试验进行验证。浸出液须按照 HJ 557 方法制备，其特征污染物（包括铍、铊、氟、锰等）应依据 GB 5085.7 等方法进行检测，检测结果须同时满足以下条件：浸出液中任何一种特征污染物的浓度均不应超过 GB 8978 规定

的最高允许排放浓度（第二类污染物按一级标准执行），且须同时满足表 1 规定的限值。

表 1 浸出毒性及毒性物质含量限值要求

序号	污染物项目	指标	毒性物质含量限制
1	pH	6~9	$\frac{12\text{Be}+3\text{Cr}+3\text{Ni}+3\text{As}+2\text{Cd}+2\text{Ti}+3\text{Se}}{1000}$ $+\frac{\text{Mn}+2\text{Zn}+2\text{Ba}}{30000}+\frac{\text{Pb}}{5000}<1$
2	总镉 (Cd, mg/L)	≤ 0.1	
3	总铬 (Cr, mg/L)	≤ 1.5	
4	六价铬 (Cr ⁶⁺ , mg/L)	≤ 0.5	
5	总砷 (As, mg/L)	≤ 0.5	
6	总铅 (Pb, mg/L)	≤ 1.0	
7	总镍 (Ni, mg/L)	≤ 0.5	
8	总钡 (Ba, mg/L)	≤ 0.7	
9	总铍 (Be, mg/L)	≤ 0.005	
10	总铊 (Tl, mg/L)	≤ 0.005	
11	总锌 (Zn, mg/L)	≤ 2.0	
12	总锰 (Mn, mg/L)	≤ 2.0	

6.2 锂渣基人造土壤制备流程

6.2.1 原料选择与预处理

选择化学成分稳定、重金属含量低的锂渣作为原料，复配其它可增加人造土壤有机质等材料原料，进行进行破碎、杂质剔除等预处理。

6.2.2 锂渣基人造土壤的制备

(a) 应根据生态修复目标、人造土壤性能及成本控制要求，进行多原料复配方案设计。配方应以锂渣和建筑渣土为主体骨架，耦合使用已腐熟的有机物料，并可掺入团粒促进剂、保水剂、微生物菌剂、重金属稳定剂等功能助剂进行优化。推荐的不同土层功能配方参见附录 A 表 A.1。

(b) 将按配方计量的各原料充分复混、搅拌均匀。随后与水混合（制备原料与水的质量比为(3-5):1），在适宜条件下进行堆置养护。

(c) 混合料在 10-40℃下养护 30-90 天。养护期间应每 3-5 天补充水分，保持物料潮湿。养护结束后，测定其 pH 值、EC 值、养分含量、有机质含量、重金属含量、容重、孔隙度、水稳性团聚体含量等关键指标，综合评估并筛选出最优配方。该养护过程可参照 GB/T 33891 的规定执行。

(d) 将优化后的锂渣基人造土壤基质自然风干后得到锂渣基人造土壤。

6.2.3 包装、存贮及运输

锂渣基人造土壤基质在分装，存贮和运输过程中应保持干燥状态，避免淋雨和浸水。

6.3 锂渣基人造土壤质量要求

6.3.1 外观及感观。均匀粉末及颗粒混合物，无可见杂物、无异味、无结块。

6.3.2 质量要求。锂渣基人造土壤应符合 pH 值范围在 6.5-8.5，容重范围在 1.1-1.4 g/cm³（按 NY/T 1121.4 测定），有机质含量大于 15 g/kg（按 NY/T 1121.6 测定），重金属含量符合 GB 36600 规定的风险筛选值。

7 生态修复

7.1 一般要求

7.1.1 生态修复目标和任务应根据矿区生态修复方案以及国土空间总体规划、生态修复规划等相关规划确定。

7.1.2 生态修复宜包含有修复方案编制、修复方案实施、修复监测与管控、修复效果评估等。

7.1.3 通过生态修复实现的土地利用方向，应符合区域总体规划和相关法规要求。当修复后的土地需满足特定用途时，其环境质量应达到相应标准。用作建设用地的，还应满足 GB 36600 和 DB36/1282 的要求；用作农用地的，还应满足 GB 15618 的要求，但不宜作为耕地使用。

7.1.4 使用锂渣基人造土壤进行生态修复时，应确保其满足本文件 6.1.2 和 6.3 的规定，并符合生态修复目标的要求。

7.2 修复方案编制

7.2.1 前期调查评估方案

应基于本文件第 5 部分的调查结果，编制详细的评估方案，内容宜包括：

（a）生态修复目标量化：明确界定待修复区域的目标生态系统类型（如草地、灌丛、森林）、预期植被覆盖率、土壤环境质量等级及生物多样性恢复目标。

（b）立地条件分析：综合地形、气候、土壤本底值及水文地质条件，评估生态修复的约束性与可行性。

(c) 先锋植物筛选：根据目标生态系统和立地条件，筛选抗逆性强、速生且具改土功能的乡土先锋植物物种不少于 3~5 种，并确定其合理的混交模式与配置比例。

7.2.2 锂渣基人造土壤配方设计方案

应依据本文件第 6 部分的材料要求与修复目标，制定具体的配方与剖面构建方案，内容宜包括：

(a) 分层配方设计：分别确定表土层、淋溶层、淀积层和母质层的优化配方，明确各层中锂渣、建筑渣土、有机物料及各类功能助剂的干基质量配比，其设计可参照附录 A。

(b) 剖面结构参数：设计土壤剖面的总厚度及各分层厚度。表土层厚度宜为 20~30 cm，淋溶层宜为 15~25 cm，淀积层宜为 20~40 cm，母质层厚度根据实际需求确定。各层的容重、孔隙度等物理指标应设定预期目标值。

7.2.3 修复工程设计方案

修复工程方案应具备详细的工程技术要求，内容应包括：

(a) 场地平整与基底处理：明确坡度整理要求（一般宜 $\leq 30^\circ$ ），并提出基底压实度、稳定性及防渗处理的具体技术指标。

(b) 人造土壤工程工艺：规定锂渣基人造土壤的制备（含水率控制范围、均匀度要求）、运输（防扬散、防遗撒）与铺设（分层摊铺、压实度控制）的全工艺流程及质量控制关键节点参数。

(c) 植被恢复工程：设计植物种苗规格、种植密度（如株行距）、种植时间（宜在雨季或土壤墒情良好时）及基肥施用标准。

(d) 配套工程措施：设计截排水沟、沉沙池等水土保持设施的布设位置、结构尺寸与容量；必要时，设计灌溉系统的布设方案。

7.2.4 环境安全保障方案

应制定贯穿项目全周期的环境风险管理方案，内容应包括：

(a) 风险管控措施：明确针对污染物迁移、边坡稳定等风险的工程阻断（如围堰、护坡）或生物阻隔（如种植低富集植物）措施。

(b) 长期监测方案：布设土壤、地下水及地表水监测点，形成监测网络图。明确监测指标、监测频率和监测期限。

(c) 应急预案：制定针对极端天气或意外污染事件的应急响应流程与处置措施。

7.3 修复方案实施

7.3.1 材料准备

所使用的锂渣基人造土壤应经检验合格，并保留批次检测报告。

7.3.2 地形地貌重塑

对已开采的废弃露天矿区进行削坡、整形以及稳定性重塑，地形地貌重塑应符合 TD/T 1036 的规定。

7.3.3 土壤重构

(a) 覆土材料：土壤重构应以锂渣基人造土壤为主要材料，可因地制宜与矿区原土、其他客土或改良材料按特定比例混合使用。所有材料均不得对环境产生二次污染。

(b) 剖面构建：覆土结构仿照成熟自然土壤剖面的层次与功能，自上而下配置表土层、淋溶层、淀积层与母质层。覆土层次与厚度可根据矿区实际情况确定，并参照 TD/T 1036 执行。

(c) 土壤养护与管理：在铺设锂渣基人造土壤后，应以生物有机肥、菌肥等进行养护，旨在快速引入并激活有益微生物群落，持续提升土壤肥力与生物活性。可根据实际情况引入土壤动物，以促进生态系统功能的完整恢复。

7.3.4 植被恢复

植被恢复应综合坡度、水土保持等因素，优先采用原生表土与乡土物种，禁用有害外来种，构建近自然群落，选抗逆性强且与周边景观协调的植被，植被恢复技术应符合 GB/T 38360、GB/T 15776 和 NY/T 1342 的规定。

7.4 风险管控与安全防范

应在修复方案中制定贯穿项目全周期的风险管控制度，重点针对污染物迁移、植被被采食、生

物安全及边坡稳定等潜在风险，采取设置物理隔离、筛选低富集非牧草植物、实施护坡工程及开展社区宣教等防范措施，并建立应急预案，以主动规避和应对各类环境与安全风险。

7.5 修复监测与管控

7.5.1 土壤监测

土壤监测按本文件 5.3.2 执行监测，土壤监测频次不应少于每年 1 次，直至相关指标在连续 3 年内年均指标持续稳定且无明显上升趋势。

7.5.2 地表水监测

地表水监测按本文件 5.3.3 执行监测，地表水监测频次不应少于每半年 1 次，直至相关指标在连续 3 年内年均指标持续稳定且无明显上升趋势。

7.5.3 地下水监测

地下水监测按本文件 5.3.4 执行监测，地下水监测频次宜为每年在丰水期、平水期和枯水期各监测 1 次，直至相关指标在连续 3 年内年均指标持续稳定且无明显上升趋势。

7.5.4 生态系统监测

可根据实际需求对矿区及周边区域生态系统质量、生物多样性、植物群落特征、土壤动物、土壤微生物等指标监测，可参照 GB/T 32740 和 HJ 1172 分析确定，监测频次每年宜 1 次。

7.5.5 补救措施

若监测发现植被长势不良、覆盖率不达标、土壤质量退化或水土流失等问题，应及时诊断原因，并采取包括补种、土壤改良、水肥管理或工程固坡等在内的针对性措施进行有效补救。

7.6 修复效果评估

7.6.1 评估时间。

修复效果评估应分阶段实施。短期评估应在植被重建完成、并经历至少 2 个完整生长周期（约 3 年）后进行，重点评估植被定居与生态系统的初步恢复状况；长期跟踪评估宜间隔 5~8 年开展一次，旨在监测生态系统的长期稳定性、自我维持能力及演替趋势。

7.6.2 评估指标。

评估应依据修复目标选择指标体系，指标体系宜包括：

（a）土壤指标：重金属含量应符合 GB 15618 或 GB 36600 规定的风险筛选值；土壤容重、孔隙度、水稳性团聚体、有机质以及养分含量等宜达到基于 TD/T 1036 确定的设计方案目标。

（b）植被指标：植被覆盖率、生物量、物种多样性等应达到基于 GB/T 15776 或 GB/T 38360 确定的预定目标，并形成稳定、自我维持的植物群落。

（c）生态指标：生态系统结构与功能应呈现稳定或正向演替趋势，宜参照 LY/T 2241 中规定的方法与要求进行综合选定。

7.6.3 评估报告。

应编制修复效果评估报告，对修复成效进行总结，并明确后续长期管护要求。

附录 A

(资料性)

锂渣基人造土壤优化配方方案

表 A.1 不同土层功能的锂渣基人造土壤优化配方方案

成分	表土层 (%)	淋溶层 (%)	淀积层 (%)	母质层 (%)	主要功能说明
锂渣	49.9 - 71.0	72.0 - 86.9	68.5 - 90.9	72.1 - 93.6	主体基质，实现一般工业固废资源化
建筑渣土	5.0 - 19.0	3.6 - 13.0	3.4 - 13.6	—	调节土壤结构，提供矿物骨架
有机物料	7.5 - 23.8	5.0 - 17.4	1.4 - 9.1	—	提供养分和有机质，促进植物生长
团粒促进剂	0.3 - 1.4	0.7 - 2.6	—	—	促进土壤团粒结构形成，改善理化性质
保水剂	0.02 - 0.14	—	—	—	增强表层土壤保水能力，助力植被成活
微生物菌剂	0.01 - 0.21	0.02 - 0.17	—	—	引入有益微生物，激活土壤生态功能
重金属稳定剂	0.3 - 3.1	0.7 - 4.8	0.4 - 4.1	0.4 - 5.0	固定重金属，防止迁移，确保环境安全

注：以上所有成分比例均以干基质量计算。“—”表示此土层配方中不含该成分。