

《改性磷石膏应用于土地复垦技术规范》
编制说明
(征求意见稿)

《改性磷石膏应用于土地复垦技术规范》编制组

二〇二五年七月

目 录

一、制定标准的背景、必要性、目的和意义	1
(一) 任务来源	1
(二) 制定标准的必要性	1
(三) 制定标准的意义	1
二、编制组简况	2
(一) 主要起草单位和起草人员任务分工	2
1、主要起草单位	2
2、起草人员任务分工	2
(二) 主要工作过程	2
1、前期调研与准备阶段	2
2、中试验证与技术提炼阶段	3
3、标准文本编制与专家论证阶段	3
三、国内外现状	3
(一) 国外标准制定情况	3
(二) 国家标准制定情况	4
(三) 行业标准制定情况	5
(四) 地方标准制定情况	6
(五) 其他（团体标准）	7
四、标准主要内容的确定依据及内容的说明	8
(一) 实验室小试	8
1、前期磷石膏改性设计	8
2、磷石膏基土地复垦材料的配制及配方优选	8
3、前期小试初步结论	9
(二) 现场中试	9
1、复垦工艺	9
2、改性磷石膏土地复垦工程示范	10
3、安宁、宣威、开远示范点结果与分析	12
4、东川区工程示范点结果与分析	14
(三) 技术要点凝练与标准制定支撑	14
1、材料体系优化验证了改性配方的科学性	14
2、造地工艺试验支撑了技术路径和适用区域划分	15
3、作物产出与品质提升验证了复垦效果的可行性	15
4、水环境监测结果支撑了生态安全控制要求	15
5、多区域应用验证增强了标准的适用性与推广性	15

(四) 主要内容说明	15
1、适用范围	15
2、规范性引用文件	15
3、术语和定义	15
4、总体要求	15
5、磷石膏改性技术要求	16
6、改性磷石膏用于土地复垦技术要求	16
7、监测与管理要求	17
五、贯彻标准的要求和措施建议	18
(一) 深化标准制定的战略目标	18
(二) 工程实践落地的推进策略	18
1、技术普及与示范推广	18
2、起草单位标准执行与数据反馈	18
3、标准升级与区域协同	18
(三) 长效保障机制建议	18
1、政策激励与监管	18
2、技术支撑与保障体系	19
3、标准动态修订与更新	19
六、标准实施的环境效益和经济技术分析	19
(一) 环境效益分析	19
(二) 经济技术分析	19

一、制定标准的背景、必要性、目的和意义

（一）任务来源

随着国家对磷石膏综合利用提出更高要求，各地在“双碳”战略、固废资源化政策的推动下，亟须拓展磷石膏在新兴领域的应用路径。土地复垦作为磷石膏资源化利用的潜力方向之一，兼具生态修复与资源再利用双重功能，特别适用于磷石膏产区土地损毁较为严重的区域。然而，目前该领域尚无国家或行业层面的技术标准，在改性工艺、性能要求、施工方法、环境安全等方面均缺乏统一规范，严重制约了磷石膏在土地复垦领域的规模化、规范化应用。

在承担云南云天化环保科技有限公司、昆明川金诺化工股份有限公司等企业工程项目的过程中，云南农业大学、北京建工环境修复股份有限公司等单位在项目实施和评估阶段发现，实际工程对磷石膏改性处理、质量判定、场地适配、环境监测等均提出了标准化需求。尤其在推进磷石膏土地复垦试点工程中，企业和管理部门均对制定可操作性强的技术标准提出迫切需求。

因此，制定本团体标准，是工程实践中“问题导向、需求牵引”的成果回应，旨在填补“改性磷石膏土地复垦”领域的标准空白，为产业提供系统化、标准化的技术依据，推动磷石膏在土地复垦领域的安全、高效应用，助力固废资源利用与生态修复的深度融合。

（二）制定标准的必要性

磷石膏是湿法磷酸生产的主要副产物，具有产量大、堆存量高、环境风险大的特点。我国年新增磷石膏约 8000 万吨，2024 年利用率约 57%，云南省年产约 2400 万吨，2024 年利用率 77%左右，堆存问题日益突出，对土地资源与生态环境造成持续压力。建材利用和水泥缓凝剂等传统用途已经趋于饱和且利用量呈下降趋势，拓展土地复垦等新兴利用路径势在必行。

土地复垦作为磷石膏资源化利用的重要方向，具有“以废复地、生态修复、保障耕地”三重效益，特别适用于采矿废弃地、地灾损毁地等区域。实践表明，改性磷石膏具备良好的地形重构与土壤培育功能，具有广泛的应用前景。

然而，目前“改性磷石膏用于土地复垦”尚无国家或行业标准，相关改性工艺、材料指标、施工技术、环境监测等缺乏统一规范，制约了技术推广和工程监管。

因此，制定本团体标准，是补齐磷石膏综合利用标准体系短板、推动固废资源高效利用的重要举措，对促进磷化工产业绿色转型、提升土地资源可持续利用水平具有现实和长远意义。

（三）制定标准的意义

本标准旨在为改性磷石膏在土地复垦中的安全、规范、科学应用提供技术依据和操作指南，推动磷石膏从“末端堆存”向“源头减量—多途径利用”转变，

实现资源化利用与土地复垦的协同增效。制定《改性磷石膏应用于土地复垦技术规范》旨在实现以下目标：明确磷石膏改性处理的技术参数与质量控制要求，有效降低其环境风险；规定土地复垦的材料配比、技术及质量要求，提升土地复垦质量与生态安全性；形成可推广的团体标准，为磷石膏资源化利用提供技术依据，解决磷化工产业固废处置难题。本标准的实施将显著提升磷石膏在土地复垦中的资源化利用水平，为云南省生态文明建设和循环经济发展提供技术支撑，同时为全国同类地区提供可复制的经验。

二、编制组简况

（一）主要起草单位和起草人员任务分工

1、主要起草单位

本标准由云南农业大学、云南云天化环保科技有限公司、北京建工环境修复股份有限公司、昆明川金诺化工股份有限公司、云南红富化肥有限公司共同完成，汇聚了高校科研力量、工程实施经验以及磷化工企业的实际需求，形成了协同创新、分工明确的标准编制团队。

2、起草人员任务分工

云南农业大学：作为标准牵头单位，主要负责标准总体框架设计、核心技术路线制定、标准文本撰写及环境与土壤方面技术要求的归纳整合，并负责组织协调编制工作，统筹推进标准的技术论证和资料汇编。

北京建工环境修复股份有限公司：主要负责土地复垦工程实践部分的技术方案提供与标准化提炼，包括土地复垦施工工艺、工程设计、土地整治及地貌重塑等内容，同时承担标准中关于“磷石膏改性技术要求”及“监测与管理要求”等章节的技术支撑。

云南云天化环保科技有限公司：作为改性磷石膏主要供方，负责提供磷石膏改性实践数据与工艺参数，参与“原材料指标要求”“改性技术及质量控制”等内容的技术论证，保障标准内容的可操作性与工程适应性。

昆明川金诺化工股份有限公司：结合自身磷石膏副产资源的特点与工程应用需求，参与改性处理工艺技术参数的提供及土地复垦材料适配性研究，协助开展中试工程与现场验证工作。

云南红富化肥有限公司：提供与改性磷石膏协同利用相关的实际案例支撑，参与标准中“监测与管理要求”相关内容的完善，协助推进环境监测体系的构建与指标筛选。

（二）主要工作过程

1、前期调研与准备阶段

在标准立项前，编制组对磷石膏资源现状、利用途径、政策导向及相关标准体系进行了全面梳理，调研覆盖了国内多个磷化工主产区，重点关注云南省磷石

膏堆存问题与土地损毁现状。结合云天化、川金诺等重点企业的实际需求，明确了“改性磷石膏+土地复垦”这一新兴路径的技术瓶颈和标准空白，为标准定位和结构设计提供了基础支撑。

2、中试验证与技术提炼阶段

编制组依托云南东川、安宁等地已实施的磷石膏土地复垦试点工程，开展了典型工程案例收集与中试验证。重点围绕磷石膏改性处理工艺、材料质量控制、土地平整与土壤重构技术、复垦后环境质量及农产品安全监测等方面进行技术提炼与归纳，为标准技术条款提供实践依据。同时对比国内外相关标准及案例，形成适应性强、可推广的规范体系。

3、标准文本编制与专家论证阶段

在完成实践验证的基础上，编制组开展了标准草案编写工作，围绕适用范围、术语定义、总体要求、改性工艺、复垦技术、环境监测与管理等内容进行系统规范，明确控制指标与技术要求。标准草案经起草单位内部讨论并经过多次修改后，组织专家进行论证评审，最终形成征求意见稿。

三、国内外现状

(一) 国外标准制定情况

各国关于磷石膏利用相关政策法规如表 3-1 所示，关于土地复垦相关政策法规如表 3-2 所示。

表 3-1 国外磷石膏相关政策法规汇总

国家	政策法规
美国	美国环保署将磷石膏定义为“技术增强型自然放射性物质”。其磷石膏利用过程主要控制铀、钍和镭等放射性元素含量，对重金属、氟化物和磷等指标没有明确规定。1992 年，法规禁止磷石膏用于建筑和路基建设，仅允许 226 镭浓度<0.37Bq/g 的磷石膏用于农业。佛罗里达州作为磷肥生产核心区域，要求磷石膏堆场必须配备防渗层和渗滤液收集系统，并定期监测放射性核素和重金属（砷、铅等）的迁移。
欧盟	欧盟《废弃物框架指令》要求磷石膏必须按有害废物标准管理，严格限制填埋和排放。欧盟规定用于建材的磷石膏放射性核素总量需≤1 Bq/g。欧盟本土磷矿资源有限，主要依赖进口，法国、德国是磷酸生产核心区域。随着环保政策趋严，荷兰等国已停止磷酸生产，从源头减少磷石膏增量。欧洲磷石膏实际利用率较低，大部分仍以堆存或填埋为主。
印度	印度磷石膏利用过程主要控制放射性元素含量，对重金属等指标没有明确规定。印度的大多数磷酸厂都在工厂附近堆放磷石膏。磷酸厂的运营和磷石膏由两个独立的国家机构—中央污染控制委员会和原子能监管委员会进行监管。在满足条件的情况下，使用磷石膏可获得监管部门审批，在农业应用中也没有限制。
日本	日本的磷石膏综合利用技术较为先进，利用率高达 90%，主要用于生产石膏板和石膏粉等建材产品。政策法规方面主要通过掺混不同来源、污染程度不同的磷石膏以达到环保标准。
俄罗斯	俄罗斯农业部将磷石膏作为盐渍土壤改良剂纳入“国家农产品出口计

国家	政策法规
	划”，并要求对退化土壤进行强制性改良，自 2019 年起补贴农业企业使用磷石膏进行盐碱地修复。俄罗斯道路管理局批准“用于公路路面建造的磷石膏技术规范”，在道路建设和维修中使用“路基磷石膏”。

表 3-2 国外土地复垦相关政策法规汇总

国家	政策法规
美国	美国的土地复垦主要从露天煤矿复垦发展而来，1977 年 8 月 3 日，美国国会通过并颁布《露天采矿管理与复垦法》，首次实现了在全国范围建立统一露天矿管理和复垦标准，要求矿主必须对开采造成的土地破坏恢复到原状态，同时要改善矿区破坏的生态环境。
加拿大	20 世纪 70 年代后期，加拿大颁布实施《露天矿和采石场控制与复垦法》，明确了复垦资金的来源，规定了政府各级部门的职责以及土地复垦技术标准。加拿大不仅每年组织召开国际土地复垦年会和编辑出版《国际露天采矿、复垦与环境》杂志，政府还出资支持土地复垦研究。
德国	德国土地复垦立法比较完善，第一部复垦法规是 1950 年 4 月 25 日颁布的《普鲁士采矿法》，此外还有《废弃地利用条例》《土地保护法》《矿山采石场堆放条例》《控制污染条例》等，这些法律法规对土地复垦的程序、内容、操作步骤进行了详细的规定。
澳大利亚	澳大利亚与土地复垦有关的法律主要包括《采矿法》《原住民土地权法》《环境保护法》和《环境和生物多样性保护法》等。澳大利亚政府规定，任何经济活动必须遵守国家生态可持续发展战略，复垦应贯穿于矿业项目规划、实施和闭矿的全过程。
英国	英国从 1944 年《城乡规划法》实施起，规定地方政府有权要求恢复荒芜的土地。1951 年，英国的《矿物开采法》规定提供一笔资金用于因采用地面剥离开采法而造成的荒地复原工作，通过方便的拨款以满足土地复垦的高成本需要。1969 年，英国颁布了《矿山采矿场法》，要求矿业主开矿时必须同时提出采后的复垦和管理工作，并明确按农业或林业复垦标准复垦。1980 年，英国实施“弃用地拨款方案”，为弃用地和签证污染地的土地复垦提供资金支持。1990 年，英国颁布了《环境保护法》，首次将污染行为界定为犯罪，该法案责令当地政府检查本地区是否存在有害于人类健康和环境的污染地，并规定了土地复垦抵押金制度。

（二）国家标准制定情况

国内关于磷石膏出台了磷石膏分级和处理处置的国家标准，关于土地复垦出台了土地利用、各类矿山土地复垦及生态修复的国家标准。通过查询并汇总，与磷石膏及土地复垦相关的标准如表 3-3 所示。

表 3-3 国内相关标准汇总

序号	标准名称	实施时间	主要内容
1	《磷石膏》 (GB/T 23456-2018)	2019-05-01	根据附着水、二水硫酸钙、氟、磷和镁含量差异，将磷石膏分为三级。
2	《磷石膏的处理处置规范》 (GB/T 32124-2024)	2025-04-01	规定了湿法制酸产生的磷石膏的处理处置要求及方法。
3	《一般工业固体废物贮存和 填埋污染控制标准》 (GB 18599-2020)	2021-07-01	规定了一般工业固体废物贮存场、填埋场的选址、建设、运行、封场、土地复垦等过程的环境保护要求，以及

序号	标准名称	实施时间	主要内容
			替代贮存、填埋处置的一般工业固体废物充填及回填利用环境保护要求，以及监测要求和实施与监督等内容。
4	《土地基本术语》 (GB/T19231)	2003-11-01	规定了土地科学和土地管理中的土地基本术语。
5	《土地利用现状》 (GB/T 21010-2017)	2017-11-01	规定了土地利用现状分类与编号。
6	《土地复垦条例》（中华人民共和国国务院令 第 592 号）	2011-03-05	为规范土地复垦活动，加强土地复垦管理，提高土地利用的社会效益、经济效益和生态效益，制定的条例。
7	《金属矿土地复垦与生态修复技术规范》 (GB/T 43933)	2024-08-01	规定了金属矿土地复垦与生态修复的技术路径、工程实施、监测评价等。适用于金属矿开采过程中的矿山土地复垦与生态修复技术工作。
8	《煤矿土地复垦与生态修复技术规范》 (GB/T 43934)	2024-08-01	规定了生产煤矿土地复垦与生态恢复的技术路径、工程实施、监测评价等。适用于煤炭资源开采过程中的矿山土地复垦与生态修复技术工作。
9	《矿山土地复垦与生态修复监测评价技术规范》 (GB/T 43935-2024)	2024-08-01	规定了矿山土地复垦与生态修复的工作流程、监测、复垦修复评价等。适用于生产矿山土地复垦和生态修复活动的监测与评价工作。

(三) 行业标准制定情况

相关行业关于磷石膏用途主要为磷石膏用于建筑材料、土壤改良、充填、筑路材料等方面，土地复垦主要有国土资源部、国家能源局及农业农村部出台的相关标准，具体标准如表 3-4 所示。

表 3-4 行业内相关标准汇总

序号	标准名称	实施时间	主要内容
1	《磷石膏利用和贮存污染控制技术规范》 (征求意见稿)	/	规定了磷石膏在利用和贮存过程中的污染控制要求及监测和环境管理要求。
2	《水泥生产用磷石膏》(NY/T 1060-2006)	2006-05-01	规定了用于制备水泥缓凝剂的磷石膏，根据二水硫酸钙含量将磷石膏分为两级。
3	《磷石膏土壤调理剂》 (HG/T 4219-2011)	2012-07-01	规定了磷石膏土壤调理剂的产品指标，主要包括钙、硫、pH、游离水、水溶性氟离子(≤0.3%)、砷、镉、铅、铬和汞的含量。
4	《制品用过硫磷石膏矿渣水泥混凝土》(JC/T 2391-2017)	2017-10-01	规定了制品用过硫磷石膏矿渣水泥混凝土的性能要求、分类、标记、试验方法、检测规则等，磷石膏应为 GB/T23456 规定的一级指标。
5	《土地复垦质量控制标准》 (TD/T 1036-2013)	2013-02-01	规定了露天采矿、挖沙取土、地下采矿、堆放固体废物等损毁土地复垦应遵循的技术要求和应达到的质量要求。

序号	标准名称	实施时间	主要内容
6	《土地整治煤矸石回填技术规范》（NB/T 11431-2023）	2024-06-28	规定了煤矸石分类、入场、回填选址、工程实施及环境监测等相关内容。
7	《闲置宅基地复垦技术规范》（NY/T 4323-2023）	2023-06-01	规定了闲置宅基地复垦技术规范、质量控制标准、实施技术要求。

（四）地方标准制定情况

云南、贵州、湖北、内蒙古等地方关于磷石膏出台了改性磷石膏用于矿山生态修复、磷石膏无害化处理技术、磷石膏改良碱化土地等标准，具体标准如表 3-5 所示。

表 3-5 地方相关标准汇总

序号	标准名称	实施时间	主要内容
1	《改性磷石膏水泥缓凝剂》（DB53/T 396-2012）	2012-05-01	规定了调节水泥凝结时间使用的改性磷石膏水泥缓凝剂的要求、试验方法、检验规则、标志、运输和贮存等。
2	《改性磷石膏用于矿山废弃地生态修复回填技术规范》（DB53/T 1269-2024）	2024-08-08	规定了改性磷石膏用于矿山废弃地回填和生态修复的基本要求及工作流程。改性后磷石膏中污染物满足 I 类固废要求。
3	《改性磷石膏综合利用 矿山生态修复 环境风险评估规范》（DB5301/T 98-2023）	2023-12-01	规定了改性磷石膏用于露天开采矿山生态修复的环境风险评估。
4	《改性磷石膏综合利用 矿山生态修复 环境风险评估规范》（DB5301/T 99-2023）	2023-12-01	规定了改性磷石膏用于露天开采矿山生态修复的过程环境监管。用于露天矿山生态修复的改性磷石膏应满足 GB 18599 中第 I 类一般工业固体废物的要求，且有机物含量超过 5% 的改性磷石膏不应用于矿山生态修复。
5	《改性磷石膏综合利用 矿山生态修复 环境风险评估规范》（DB5301/T 100-2023）	2023-12-01	规定了改性磷石膏用于露天开采矿山生态修复后的环境质量跟踪和修复成效评估。矿山生态修复后，应对地下水、地表水和土壤环境质量进行跟踪监测。
6	《磷石膏改良碱化土壤技术规程》（DB15/T835-2015）	2015-05-10	规定了磷石膏改良碱化土壤技术流程，包括磷石膏施用、配套灌溉、配套施肥及配套农艺措施等。
7	《磷石膏及其综合利用产品质量标准》（DB 4205/T 063-2019）	2019-05-01	规定了磷石膏等级划分、质量要求以及利用产品（石膏建材、混凝土、水泥缓凝剂和土壤调理剂）的质量要求。
8	《磷矿开采磷石膏充填采矿技术规范》（DB52/T 1179-2017）	2017-11-08	规定了磷石膏充填采矿系统布置、充填系统、采场充填工艺和充填体水质监测，未对充填材料中污染物进行限定。

序号	标准名称	实施时间	主要内容
9	《磷石膏无害化处理技术规范》(DB 5117/T 75-2023)	2023-07-31	规定了磷石膏无害化处理工艺,并针对不同利用途径和贮存的磷石膏指标进行控制。
10	《磷石膏基植生材料生态修复应用技术规范》(DB 5117/T 76-2023)	2023-07-31	规定了磷石膏基植生材料生态修复技术的材料、实施、监测、验收和管护要求。
11	《公路磷石膏复合稳定基层材料应用技术规程》(DB42/T 1991-2023)	2023-05-28	规定了路面结构及防排水、配合比设计、施工、施工质量和环境管理与质量监测等要求。

(五) 其他(团体标准)

除国内外、相关行业、省份外,关于磷石膏及土地复垦还出台了相关团体标准和企业标准,具体标准如表 3-6 所示。

表 3-6 其他标准汇总

序号	标准名称	实施时间	主要内容
1	《磷石膏制土壤调理剂》(T/CPCIF 0308-2023) (T/CPFIA 0009-2023)	2024-03-18	规定了以磷石膏为主要原料的土壤调理剂的技术指标及有毒有害物质限量要求,主要包括钙、硫、水溶性氟、钠、砷、镉、铬、铅、汞、铊的含量。
2	《磷石膏预处理技术规范》(T/CSPSTC 69-2021)	2021-11-01	规定了不同用途磷石膏预处理、生产工艺环境、存放、处置和运输、质量验收等要求。其中用于土壤改良或生态修复的磷石膏预处理后水溶性五氧化二磷 $\leq 1.2\%$,总金属含量符合 GB 15618 和 GB 36600 中相关规定。
3	《磷石膏无害化处理指南(试行)》(T/CPFIA 0011-2024)	2024-03-01	规定了磷石膏无害化处理工艺,并针对不同利用途径和贮存的磷石膏提出控制要求。充填和生态修复材料污染物满足 GB 8978 一级标准,筑路材料所用磷石膏中水溶性氟离子和水溶性五氧化二磷含量分别 $\leq 0.1\%$ 和 0.2% ,土壤调理剂中水溶性氟离子含量 $\leq 0.2\%$ 。
4	《磷石膏无害化处理用于矿山废弃地生态修复回填技术规范》(T/KMSHJBHLHH 001-2022)	2022-12-1	规定了磷石膏无害化处理用于露天矿山废弃地生态修复技术的回填材料要求、施工要求、生态修复、跟踪监测及生态修复成效评估。回填材料重金属指标主要包括砷、镉、六价铬、铅、汞,浸出液指标满足 GB 8978 一级标准。
5	《磷石膏基绿化土壤材料材料应用技术指南》(T/YPACI-003-2024)	2024-12-31	规定了磷石膏基绿化土壤材料的技术指标和应用,用于制备磷石膏基绿化土壤材料主要有二水石膏和半水石膏,磷石膏基绿化土壤材料 pH 在 5.5-8.5 范围内。用于石漠化治理、矿山复垦、边坡治理、退化林草地治

序号	标准名称	实施时间	主要内容
			理和园林绿化的用地性质为建设用地时，相关指标满足 GB 36600 中筛选值要求，用地性质为农用地时，相关指标满足 GB 15618 中筛选值要求，按照 HJ557 制备的浸出液氟化物浓度不超过 10mg/L。

通过对上述相关标准规范的研究和分析，目前国内外相关部门发布的标准及相关文件，主要是针对磷石膏利用、磷石膏基植生材料及矿山土地复垦与生态修复相关，本标准是在现有磷石膏综合利用、污染控制以及损毁土地复垦、生态修复等法律法规框架下，依据现行磷石膏处理处置、资源化利用、土地复垦及生态修复等标准要求，结合编制单位的工程实践经验制定的，明确了改性磷石膏用于土地复垦这一应用场景的全流程质量、环保、安全及管理要求。

四、标准主要内容的确定依据及内容的说明

本标准在编制过程中，系统梳理了磷石膏的理化特性、污染属性及产排现状，统筹考虑现行磷石膏资源化利用相关政策要求与无害化处置技术规范，依托标准编制单位在磷石膏改性处理领域的工程实践，初步构建了改性技术体系。为科学合理确定相关技术指标，组织开展了多轮实验室小试和现场中试试验，从材料性能、环境安全、工程适应性等方面进行验证与优化，为技术要求的制定提供了直接支撑。与此同时，围绕土地复垦实际需求与存在问题，调研典型区域潜在应用场景，结合现行土地复垦政策、标准规范以及编制单位在东川、安宁、开远等地开展的改性磷石膏土地复垦示范工程经验，凝练形成了改性磷石膏用于土地复垦的技术要求和适用条件。

（一）实验室小试

1、前期磷石膏改性设计

小试实验于 2022 年 10 月初开始进行磷石膏土壤化工作，首先进行各项指标测定，根据磷石膏基础性质利用多种辅料进行改性并进行微调，最后优化出三种最优改性设计方法如表 4-1 所示。

表 4-1 不同磷石膏改性配方设置

处理	配方
P1	石灰改性
P2	生物炭改性
P3	复合改性

2、磷石膏基土地复垦材料的配制及配方优选

试验选取三种改性方法并设置四个比例 T1、T2、T3、T4 与土壤进行配比，充分混匀，以黑麦草为试验作物，共设置 12 个处理，其中为确保试验的准确性，

每个处理设置三组重复，T1~T4 土壤比例等比减少，进行分析对比各处理的各项指标。于不同时期对黑麦草进行了 3 次株高测量，并于收获期测定最后一次株高以及根长，试验设计具体如下表 4-2 所示。

表 4-2 不同配方配比与土壤改性配方配比设计

配方	比例	磷石膏：客土
P1	T1	5:5
	T2	5.5:4.5
	T3	6:4
	T4	6.5:3.5
P3	T1	5:5
	T2	5.5:4.5
	T3	6:4
	T4	6.5:3.5
P3	T1	5:5
	T2	5.5:4.5
	T3	6:4
	T4	6.5:3.5

3、前期小试初步结论

石灰改性磷石膏土壤 pH 最低，而混合改性磷石膏土壤最高，生物炭改性磷石膏土壤位于二者之间。

磷石膏土壤化利用盆栽试验：在从改性磷石膏土壤对于黑麦草株高长势对比分析发现，生物炭改性磷石膏土壤 > 石灰改性磷石膏土壤 > 混合改性磷石膏土壤。在石灰改性磷石膏土壤中最优比例为 T2、T3 比例，同时在生物炭改性磷石膏土壤最优比例为 T3，在混合改性磷石膏土壤中的最优比例为 T1。磷石膏土壤化前期小试试验报告已通过云南云天化环保科技有限公司组织的专家评审。

(二) 现场中试

项目中试示范点分别是安宁市、宣威市、东川区、开远市。安宁地区是云南省磷矿采选及磷化工主产区域，安宁示范点位于云天化安宁磷矿分公司矿区，便于为人工造地试验提供原料，施工运输半径短，降低了施工成本。宣威市受特殊的地理位置及气候条件影响，存在严重的石漠化生态问题，为人工造地试验的开展提供了广阔空间。东川示范点位于川金诺化工股份有限公司附近的磷石膏及磷尾矿实验地中，便于为人工造地试验提供原料，施工成本低、运输半径短。鉴于安宁及宣威示范点用水不便，喷淋灌溉无法完成，导致作物干旱，开远市示范点选择清塘子小学附近一户农家院旁，用水便利，农户也能每天帮助管理，清理杂草，并且开远示范点地块平整，本身就是耕地，无需重新推平翻土，减少了施工成本。

1、复垦工艺

示范内容包括两种造地工艺，即分层重构工艺和一体化造地工艺（图 4-1）。

（1）A 工艺造地：采用分层重构土壤的造地工艺，参照自然土壤发生层规律，分三层，包括防渗保水层厚度 20cm、过渡土层厚度 20cm、耕作层厚度 20cm，总厚度 60cm。

底层为防渗保水层厚度 20cm，材料为 100%改性磷石膏压实；中间为过渡层厚度 20cm，材料为改性磷石膏与客土红壤（7:3）混合均匀制成（20cm），过渡层铺设于底层的上方；上部为耕作层厚度 20cm，材料为改性磷石膏与客土红壤（5:5）铺设于过渡层之上。

（2）B 工艺造地：一体化造地工艺，即将全部造地材料改性后，按照小试研究得到的比例混合均匀，一次性覆盖在示范区地块上。

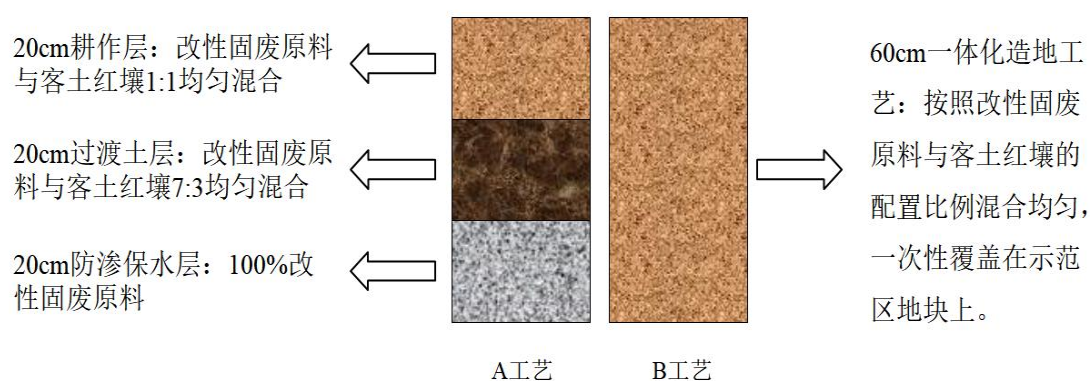


图 4-1 不同造地工艺设计

2、改性磷石膏土地复垦工程示范

（1）安宁示范点

云天化安宁示范点示范面积约 800m²，采用 A 工艺、B 工艺分别混合磷石膏和磷尾矿造土，具体配比如图 4-2 所示，每种造地工艺 162m²，不同工艺间设置 1.5m 间隔带。示范区种植大春作物玉米，监测各土壤在肥力质量、环境、地表水、作物产量、农产品品质等的的数据。

磷石膏：土壤（质量比）					
GA 耕作层 5: 5					
过渡层 7: 3					
底土层 10: 0					
GB 5: 5					
磷矿渣：土壤（质量比）					
ZA 耕作层 5: 5					
过渡层 7: 3					
底土层 10: 0					
ZB 5: 5					
CK 当地客土					
	ZA	ZB	GA	GB	CK

图 4-2 安宁改性磷石膏造地工程示范图

(2) 宣威示范点

云天化宣威示范点示范面积约 600m²，采用 A 工艺、B 工艺分别混合磷石膏造土，其中 B 工艺设置三种磷石膏与土壤的配比处理，分别为 5:5、5.5:4.5、6.5:3.5，每种造地工艺 120m²。根据当地气候，作物种植第一年选择了荞麦，第二年选择了饲料玉米及红豆。

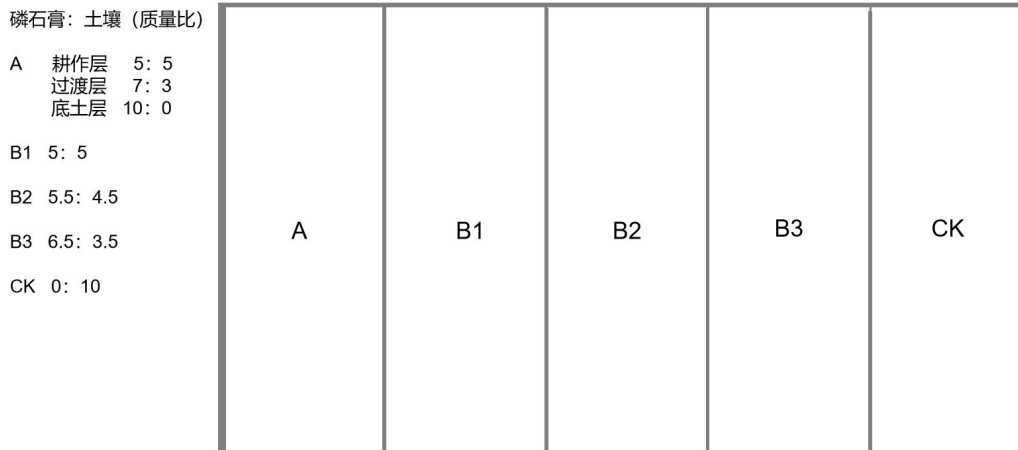


图 4-3 宣威改性磷石膏造地工程示范图

(3) 开远示范点

针对开远中试试验地点客土资源相对丰富的实际，在材料选择方面结合红磷公司的实际需要，增加了异龙湖底泥、磷尾矿、土壤调理剂，在工艺路线上实施一体化的改土造地工艺。开远示范区施工面积为 600m²左右，其中异龙湖底泥、磷尾矿、土壤调理剂及改性磷石膏处理面积分别为 100m²，客土处理面积为 200m²。根据当地气候，作物种植选择了经济效益较高的蚕豆。2023 年 12 月 25 日完成蚕豆种植，第二年种植了花生、豌豆等作物。

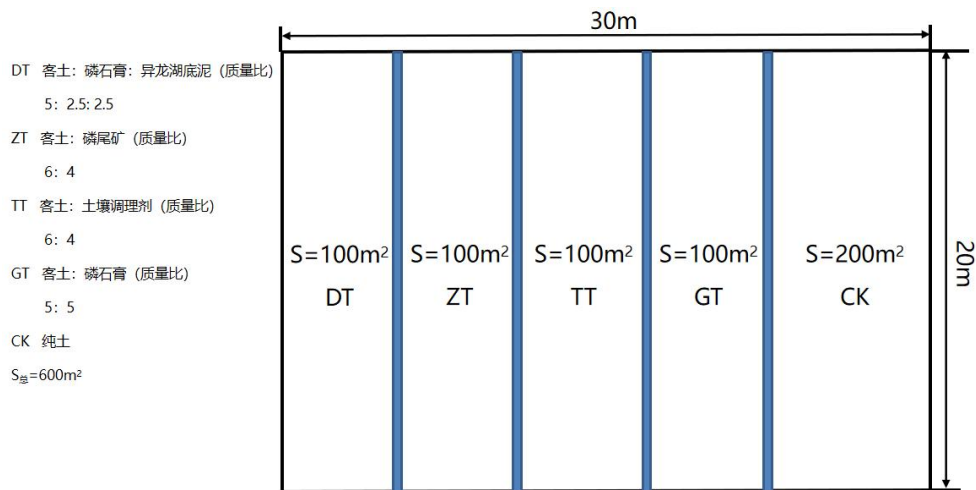


图 4-4 开远改性磷石膏造地工程示范图

(4) 东川示范点

东川示范点旱地示范面积约 800 m²，水田示范点面积约 570 m²，旱地采用 A 工艺、B 工艺混合磷石膏造土。根据当地气候，作物种植选择了玉米、马铃薯及水稻。

表 4-3 改性磷石膏造地工程试验工艺与配比表

处理名称		处理面积 (m ²)		造地工艺及配比 (质量比)
旱地	水田	旱地	水田	
CK	CK	177	105	100%当地客土
GA	-	323	-	分层重构工艺 A
GB	GB	300	462	一体化造地工艺 B, 磷石膏: 客土=5:5

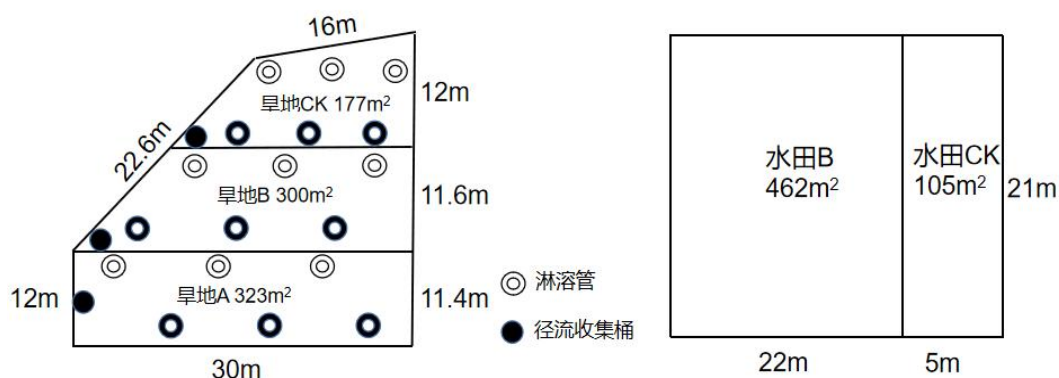


图 4-5 东川改性磷石膏造地工程示意图

3、安宁、宣威、开远示范点结果与分析

(1) 土壤改良效果综合分析

表 4-4 各示范点土壤改良效果综合分析

指标类别	安宁示范点	宣威示范点	开远示范点
理化性质	含水率、pH、EC 显著提高，容重下降	含水率与 EC 提升明显，pH 稳定或略升	含水率与 EC 显著提升，容重显著降低
团聚体结构	—	—	DT 处理团聚体稳定性最优 (DT>TT>ZT>GT>CK)
养分状况	有机质、碱解氮、速效磷显著提升	有机质、速效磷上升明显，磷素淋失需控制	有机质、碱解氮提升显著，速效钾下降
酶活性	脲酶、中性磷酸酶提升	—	蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶显著提升
推荐工艺	GA 分层工艺最优	A1 分层工艺 (磷石膏) 表现最佳	DT 处理 (磷石膏+异龙湖底泥) **综合最优

(2) 作物生长与品质综合分析

表 4-5 各示范点作物生长与品质综合分析

项目	安宁示范点	宣威示范点	开远示范点
作物类型	玉米	荞麦（2023）、玉米（2024）	花生
产量提升	玉米增产 12.71%~27.44%（2023/2024）	荞麦增产 0.71%~130.63%，玉米最高增产 65.22%	花生最高增产 40.88%，DT 处理产量表现最佳
营养品质	蛋白质 ↑ 16.79%~29.74%，Vc 和糖含量均提升	荞麦蛋白质 ↑ 0.69%~10.66%，DT 提升总糖 ↑ 84.06%	DT 处理花生蛋白质 ↑ 6.56%，粗脂肪 ↑ 20.25%，糖 ↑ 8.37%
安全性	玉米籽粒重金属均达标	荞麦 Pb 含量超标（1.5~7.25 倍），其他元素达标	花生籽粒重金属全项目均达标，安全性最高
推荐工艺	GA 处理（分层）综合最优	A1 处理（分层）品质好，	DT 处理产量、品质与安全性三优

(3) 水环境响应综合分析

表 4-6 各示范点水环境响应综合分析

指标项目	安宁示范点	开远示范点
TP 浓度趋势	分层工艺 TP 浓度显著低于 B 工艺，逐年下降	TP 表现为 ZT<DT<GT<TT，呈下降后稳定趋势
TN 浓度趋势	GA 处理 TN 浓度最低，逐次降雨后趋稳	TN 表现为 DT<ZT<GT<TT，DT 处理抑氮效果最佳
氟化物浓度	改性磷石膏 F ⁻ 略高于磷尾矿，分层工艺 A 低于 B 工艺	所有改良处理 F ⁻ 浓度均高于 CK，ZT 处理浓度最低
重金属水质	地表水与下渗水重金属均符合 I~III 类地下/地表水标准	Pb、Cd: DT 最优；As: DT 最优，ZT 需控制
水环境达标性	分层工艺 GA 水环境质量整体优于一体化工艺 B	DT 与 ZT 处理安全性高，ZT 在氟控制上略优于 DT

(4) 综合评价与推广建议

表 4-7 各示范点综合评价与推广建议

项目	最佳示范点/工艺	综合优势	推广建议
土壤改良能力	开远-DT	提升养分、结构稳定性和酶活性，改良效果持续性强	建议用于石漠化和边际地的土壤再造工程
作物产量与品质	安宁-GA/开远-DT	玉米与花生产量均显著提升，品质与安全性兼顾	GA 适用于粮作主产区，DT 适用于高值经济作物区域

项目	最佳示范点/工艺	综合优势	推广建议
水环境安全性	安宁-GA/开远-ZT	氮磷流失控制良好，氟化物浓度受控，重金属低风险	ZT 适用于对水体影响敏感区域

4、东川区工程示范点结果与分析

(1) 土壤理化性质及重金属风险分析

旱地快速修复：HA 工艺两年内使土壤有机质含量提升 81-91%（2023 年 85.96%、2024 年 91.40%），速效钾增加 62-78%，pH 稳定在 6.5-7.2，盐碱地、荒漠化、石漠化改良周期可缩短 50%。

(2) 水环境风险分析

旱地氮磷拦截：HA 工艺下渗水 TP 浓度 $\leq 0.3\text{mg/L}$ （达地表水 V 类标准），TN 流失量较传统耕作减少 25%，地表径流氟化物（ F^- ）浓度稳定在 1.8-2.0mg/L（接近 V 类限值 1.5mg/L）。

水田氟化物控制：水田 B 处理氟化物含量随种植时间递减，后期地表径流 F^- 浓度从 2.5mg/L 降至 1.8mg/L，通过配套“生物炭吸附+生态沟渠”技术可进一步降低 F^- 浓度。

水田 TP 含量在采样后期达地表水 IV 类标准（ $\text{TP}\leq 0.3\text{mg/L}$ ），氮磷流失量较传统稻田降低 40%。

(3) 旱地产量及经济效益分析

作物产量提升：HA 处理连续两年实现旱地作物高产，马铃薯单产较对照（CK）提升 18%（HB 处理最优），玉米增产 15-20%，蛋白质含量提高 23-30%。按马铃薯市场价 2.5 元/kg、玉米 2.8 元/kg 计算，亩均增收 280-350 元。

化肥替代效应：HA 工艺显著提升速效磷（31-75%）、速效钾（62-78%）含量，减少复合肥施用量 20-30%，亩均肥料成本节约 120-150 元。

重金属风险对冲：磷石膏土地复垦土壤使马铃薯可食部 Pb、Cd 含量降低 58-76%，减少因重金属超标导致的农产品滞销损失及人类健康风险。

(4) 水田产量及经济效益分析

水稻高产优势：东川水田 B 处理两年内水稻产量提升 30.83%，千粒重增加 12%，有效穗数提高 15%，按稻谷 3.0 元/kg 计算，亩均收益增加 420 元。

(三) 技术要点凝练与标准制定支撑

为确保本标准的科学性、适用性与可操作性，在标准编制过程中坚持“边试验、边验证、边凝练”的技术路线，系统开展了实验室小试与典型区域现场中试工作，并在此基础上提炼形成了标准所涉及的关键技术参数与适用条件。

1、材料体系优化验证了改性配方的科学性

在实验室小试阶段，通过对石灰、生物炭和复合三种改性方式的对比研究，明确了各配方在调节 pH、改善土壤性质及促进作物生长方面的差异，并筛选出

适用于土地复垦的最佳添加比例范围（磷石膏：客土为 5.5:4.5 至 6:4）。该结果直接支撑了标准中关于改性材料种类及配比设定的相关条款。

2、造地工艺试验支撑了技术路径和适用区域划分

四地中试试验对比验证了分层重构工艺与一体化造地工艺在不同区域的适应性，发现分层工艺更有利于提升土壤养分和水环境安全，适用于粮作主产区及生态敏感区域；一体化工艺施工简便、成本低，适宜边际地和经济作物种植区。这一成果为标准中造地工艺选择和区域适用性界定提供了依据。

3、作物产出与品质提升验证了复垦效果的可行性

各中试示范点作物产量显著提升，品质改善明显，且大多数作物重金属含量符合安全标准，证明改性磷石膏材料可满足农用地安全利用要求。尤其是在安宁、开远和东川等地，复垦地块作物蛋白质等指标含量提升显著，产值提高，支撑了标准中对监测与管理要求的指标设置。

4、水环境监测结果支撑了生态安全控制要求

现场中试对不同处理下的 TP、TN 和 F⁻ 等指标进行了连续监测，结果显示分层工艺和优化处理（如 DT、ZT）可有效控制养分流失和氟化物浓度，地表水和下渗水重金属含量均符合国家水质标准。这些结果为标准中设置水质安全控制指标和环境监测要求提供了直接支持。

5、多区域应用验证增强了标准的适用性与推广性

通过在 4 个典型区域开展的工程示范，验证了改性磷石膏在不同地形地貌、用地类型和原料条件下的适应性，形成了可复制的造地模式与技术路径。这些实践成果为标准的区域推广与适用范围界定提供了现实基础，也增强了标准的普适性和可操作性。

（四）主要内容说明

本标准《改性磷石膏应用于土地复垦技术规范》主要内容分为适用范围、规范性引用文件、术语和定义、总体要求、磷石膏改性技术要求、改性磷石膏用于土地复垦技术要求、监测与管理要求等七大部分。

1、适用范围

基于对磷石膏综合利用、土地复垦相关政策、标准规范要求和现实需求的调研总结，明确了本标准适用范围为将磷石膏改性后用于土地复垦的活动。

2、规范性引用文件

列出了标准编制及实施过程中，所引用或参考的国家、行业标准规范。

3、术语和定义

结合本标准的定位和现有标准规范要求，为更好地理解本标准和利于标准的实施，对本标准 5 个关键的术语和定义进行了解释，所给定义与现行的标准中类似定义相一致。

4、总体要求

本部分规定了改性磷石膏应用于土地复垦的总体要求，强调应符合国土空间规划，遵循科学性、前瞻性与实用性相统一的原则，确保改性工艺安全环保、经济适用，工程设计合理可行。要求全过程严格控制污染物排放，复垦后土壤质量不低于当地背景值或用地标准，农产品种植须符合环境与食品安全相关规定。同时，应建立健全的环境监测与风险防控机制，保障工程实施的长期安全性与稳定性，并符合国家及地方现行法律法规和标准规范。

5、磷石膏改性技术要求

5.1 原辅材料要求

根据土地复垦应用场景的需求确定原料磷石膏附着水、二水硫酸钙含量等非污染指标满足《磷石膏》（GB/T 23456-2018）中三级要求，放射性满足《建筑材料放射性核素限量》（GB 6566-2010）要求。本标准土地复垦的方向为农用地。因此，镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌等污染指标含量要求满足《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）中筛选值要求，氟化物是磷石膏的特征污染指标，在土壤也是广泛存在元素，在农用地土壤质量标准中没有对应的限值，故暂按照总氟化物含量不应高于区域土壤环境背景含量确定限值。

其他辅料例如 pH 调节剂、钝化剂或其他改性剂等对污染指标提出明确要求，均按照磷石膏原料要求执行。

5.2 改性技术要求

列举了现阶段常用的改性处理方式，明确了改性过程二次污染控制要求。

5.3 改性磷石膏质量要求

从控制环境污染的角度提出改性磷石膏质量要求，指标及限值来源为《磷石膏的处理处置规范》（GB/T 32124）和生态环境部组织编制的《磷石膏利用和贮存污染控制技术规范（征求意见稿）》。

5.4 改性磷石膏质量监测

采样频次参照云南省地方标准《改性磷石膏用于矿山废弃地生态修复回填技术规范》（DB53/T 1269-2024）确定，采样及样品制备参照《工业固体废物采样制样技术规范》（HJ/T 20-1998），检测方法参照《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）或最新的国标、行标要求。

6、改性磷石膏用于土地复垦技术要求

6.1 应用场景

明确了土地复垦适用的范围，明确造地后土地利用类型为农用地。

6.2 土地复垦工艺流程

明确了改性磷石膏用于土地复垦工作内容包括底土层施工、表土层施工、地力提升、复垦基质材料质量监测、区域环境质量监测等。

6.3 底土层技术要求

规定了底土层施工的技术要求，强调应以土地整形为主，在具备地质安全、水土保持和污染控制条件的前提下开展作业。底土层宜优先利用区域内土石料，不足部分可使用符合规范要求的改性磷石膏复垦材料。施工应统筹考虑后续农用地功能需求，与灌排设施、交通、防护及生态工程相协调，提升土地质量，保障水、肥、气、热协调性。作业完成后，地表应具备良好平整度、坡度及稳定性，满足后续表土层施工要求。

6.4 表土层技术要求

明确了表土层与心土层的构建要求，并对表土层、心土层厚度、原料构成及要求、施工要求等进行了明确，表土层要求参照《土地复垦质量控制标准》(TD/T 1036-2013)执行，主要对地形、土壤质量和生产力指标提出要求。

6.5 地力提升技术要求

针对土地复垦后表土层营养指标不满足要求的土地，开展地力提升，提出了地力提升的目标、措施等。

6.6 复垦基质材料质量监测

明确了复垦基质材料的质量监测要求。在复垦过程中，应定期开展采样监测，监测点位参照 HJ/T 166 设置，指标包括 pH、重金属、总氟化物及其浸出液中的氟化物。监测频率根据结果稳定性动态调整，材料来源或质量发生变化时应提高频次。所有监测结果应符合 GB 15618 和 HJ 557 等相关标准要求。

7、监测与管理要求

7.1 环境监测

明确了土壤和地下水环境监测的要求，包括监测点位布设、监测指标选取、监测频率确定以及指标标准等内容，确定依据参考《地下水环境监测技术规范》(HJ 164-2020) 及《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)。

7.2 复垦区土壤及农作物监测

规定了利用改性磷石膏复垦土地种植食用农作物的土壤与农产品协同监测要求。复垦前应开展土壤环境质量监测，农作物监测按生长周期进行，监测指标涵盖重金属及总氟化物，监测布点参照 HJ/T 166 执行，结果应符合 GB 15618、GB 2762 等相关标准。

7.3 复垦区长效性监测

明确了长效性监测的时间及要求。

7.4 数据管理与报告

明确磷石膏改性、土地复垦过程以及监测等数据管理、公开及资料保存要求等。

7.5 环境管理要求

明确了全流程施工过程环境保护、职业健康以及环境应急等要求。

五、贯彻标准的要求和措施建议

（一）深化标准制定的战略目标

本规范旨在应对我国磷石膏资源化利用与土地复垦的两大关键挑战：

1、固废资源化利用：磷石膏堆存超过 8 亿吨，年新增量 8000 万吨，综合利用率不足 70%。本标准通过规范改性工艺和严格质量控制，降低磷石膏中氟化物、重金属的迁移风险，减少对环境的潜在危害。

2、土地复垦与资源再生：标准提供低成本客土替代方案（心土层改性磷石膏掺比 $\geq 80\%$ ），确保复垦土壤质量符合 GB 15618 标准要求，作物中的重金属符合 GB 2762 和 NY 861，实现“以废治损”的生态闭环，促进土地生态环境恢复与提升。

（二）工程实践落地的推进策略

1、技术普及与示范推广

技术普及：通过云南省环境学会组织技术培训和实训班，确保相关技术的全面普及。

成果展示：编制《改性磷石膏土地复垦示范工程图鉴》，展示项目的关键成效。

政企合作：将标准纳入“循环经济重点项目库”，在磷石膏集中产区建立示范基地，推动地方政府与企业的合作。

2、起草单位标准执行与数据反馈

优先执行：鼓励所有起草单位在本标准发布实施后，优先参照本规范开展新建复垦项目，发挥示范引领作用，并加强项目数据反馈与质量控制，推动标准在行业内的推广应用。

质量控制：每批次改性磷石膏需按标准严格采样和检测，确保浸出液中特征污染物浓度符合规定标准要求。

施工要求：心土层压实厚度 $\geq 20\text{cm}$ ，表土层改性磷石膏比例 $\geq 50\%$ ，地力不足时启动培肥措施。

长期监测与数据反馈：定期分析监测数据并评估项目稳定性，长期稳定合格项目可停止监测。

3、标准升级与区域协同

团体标准转地方标准：试行评估期（2025-2027 年），通过区域示范验证农产品安全性与地下水稳定性等关键指标，收集数据并评估适用性，为团体标准升级为地方标准提供依据。

跨区域技术推广：联合磷石膏大省，制定区域性技术导则，推动规模化应用。

（三）长效保障机制建议

1、政策激励与监管

经济激励：建议政府对执行本标准的企业提供磷石膏处置补贴，优先支持复垦项目。

监管倒逼：将改性磷石膏浸出液中特征污染物指标纳入环保监测平台，确保标准执行。

2、技术支撑与保障体系

成立“改性磷石膏土地复垦咨询团队”，指导改性磷石膏用于土地复垦工程的实施。

3、标准动态修订与更新

根据实施积累的数据和经验，定期对标准进行修订。

六、标准实施的环境效益和经济技术分析

（一）环境效益分析

本标准的实施将显著提升磷石膏这一工业固废的资源化利用水平，从根本上缓解其堆存带来的环境压力。磷石膏作为磷肥产业的主要副产物，长期以来因含有重金属、氟化物等污染物，大量堆存易导致土壤重金属污染、地下水水质恶化及粉尘扬尘等环境问题。标准通过规范磷石膏改性技术，将其从高风险固废转化为安全可用的复垦材料。以云南为例，全省年排放磷石膏约 2400 万吨，传统堆存方式不仅占用土地，还存在重金属（如砷、镉）和氟化物渗漏风险。通过改性处理，磷石膏中的污染物活性显著降低，通过标准中规定的改性技术要求（如无害化处理、污染防控指标），可有效降低磷石膏中的污染物活性，使其在土地复垦过程中实现“以废代土”。据示范工程实践数据，改性磷石膏用于土地复垦后，项目区土壤 pH、重金属等指标均优于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》（GB 15618）要求，周边水体特征污染物浓度未显著上升，从源头削减固废堆存占地的同时，实现了土地生态功能的修复与提升。此外，土地复垦过程后有利于植被恢复、水土保持，将进一步促进区域生态系统的良性循环，预计可减少项目区水土流失，提高植被覆盖率，形成工业固废消纳与土地复垦的双重环境效益。

（二）经济技术分析

标准与国家“双碳”目标和磷石膏综合治理政策高度契合。2025 年国家要求磷石膏综合利用率达 57%，云南、贵州等地目标更高（如云南要求 75%），而本标准通过规模化土地复垦，为实现目标提供技术路径。云南 2023~2024 年累计投入 6763 万元支持磷石膏综合利用项目，其中生态修复是重点方向。

标准在技术可行性方面，充分吸纳了东川、安宁、开远等地示范工程的成功经验，形成了“改性工艺-复垦施工-监测管理”的全流程技术体系。针对磷石膏易板结、保水性差等特性，标准规定的物理改性（颗粒级配调整）、化学改性（稳定剂添加）等技术手段，经工程验证可使改良后土体的抗压强度提升 20%~30%，

含水率调节至适宜农作物生长的 15%~25%区间，技术参数具有明确的工程指导性。经济成本方面，相较于传统客土回填复垦工艺，利用改性磷石膏作为复垦材料可降低 40%~80%的土方采购成本，同时减少磷石膏处理费用约 30~80 元/吨(以云南地区为例)。标准中“安全环保、经济适用”的总体原则，通过规范改性剂用量、施工工艺参数等关键指标，避免了过度处理导致的成本增加，经测算项目综合造价较同类工程降低 15%~20%。此外，复垦后土地质量提升带来的农业产能增益（预计粮食作物单产提高 10%~15%）及土地增值效益，将形成长期的经济收益链条，实现工业固废资源化利用与土地资源高效开发的良性互动。技术路线上，标准兼容现有复垦设备与施工团队作业习惯，关键改性技术可通过 2~3d 的短期培训快速掌握，具备在磷石膏主产区大规模推广的经济技术基础。