

磷石膏改性材料生态回填利用现状及展望

李清毅^{1,2,3}, 刘恒博^{1,2}, 龙泉^{1,2}, 郭卫广^{1,2}, 佟洪金^{1,2}

(1. 四川省生态环境科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 四川省环境保护固体废物处理处置工程技术中心, 四川 成都 610041; 3. 四川省环保科技工程有限责任公司, 四川 成都 610041)

[摘要] 磷石膏利用率逐年增长, 但主要生产建材, 建筑市场降温对其产生巨大影响。针对磷石膏后续去向问题, 全面总结磷石膏改性材料生态回填标准制定、改性技术、应用案例, 并针对现有问题提出科学建议。总体上看, 我国共计8个地方制定了固体废物或磷石膏生态回填标准, 现有改性技术主要集中于稳定化、固化, 13个应用案例基本参照固体废物填埋场建设。目前, 生态回填面临选址困难、无针对性的环境风险评估方法、跟踪研究不足等挑战, 制约大规模应用。基于此, 提出如下建议: 拓展生态回填场景, 破除选址限制; 制定针对性环境风险评估标准; 总结经验、开展多样化小试研究, 实现环境风险可控和成本降低的双赢。

[关键词] 磷石膏; 改性工艺; 生态回填; 应用案例; 资源化利用

[中图分类号] TQ177.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 11-0093-07

Current status and prospects of ecological backfilling utilization of phosphogypsum modified materials

LI Qingyi^{1,2,3}, LIU Hengbo^{1,2}, LONG Quan^{1,2}, GUO Weiguang^{1,2}, TONG Hongjin^{1,2}

(1. Sichuan Institute of Ecological and Environmental Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Sichuan Environmental Protection Engineering Centre of Solid Waste Treatment & Disposal, Chengdu 610041, China;

3. Sichuan Province Environmental Protection Technology & Engineering Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The utilization rate of phosphogypsum has been increasing year by year, but it is mainly used for producing building materials, and the cooling of the construction market has had a significant impact on it. Regarding the future direction of phosphogypsum, the formulation of ecological backfill standards for modified phosphogypsum, modification technology and application cases are comprehensively summarized, and scientific suggestions for existing issues are provided. Overall, a total of 8 regions in China have formulated ecological backfill standards for solid waste or phosphogypsum. The existing modification technology mainly focuses on stabilization and solidification, and 13 application cases are basically based on the construction of solid waste landfills. Currently, ecological backfill faces challenges such as site selection difficulties, lack of targeted environmental risk assessment methods, and insufficient tracking research, which restrict large-scale application of phosphogypsum. Based on this, the following suggestions are proposed: Expand the scenarios of ecological backfill and break through site selection restrictions; Formulate targeted environmental risk assessment standards; Summarize experience, carry out diversified small-scale experimental research, and achieve a win-win situation of controllable environmental risks and cost reduction.

Key words: phosphogypsum; modification process; ecological backfilling; application cases; resource utilization

磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的工业废渣, 为硫酸分解磷矿萃取磷酸时的副产物, 通常生产磷酸1 t副产磷石膏4~5 t^[1-2], 主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (n 一般为0、0.5和2), 呈酸性 (pH为1.5~5.5)^[3], 微溶于水, 主要污染物为氟化物、总磷、有机物及重金属等, 个别还含有放射性物质^[4]。

为推动磷肥行业高质量发展, 2017年7月, 四川省德阳市人民政府办公室印发《关于加快推进磷石膏综合利用工作的实施意见》, 率先在全国提出

[收稿日期] 2025-06-13; **[修回日期]** 2025-07-09

[作者简介] 李清毅(1993-), 男, 四川渠县人, 硕士, 工程师, 研究方向: 固体废物污染防治与综合利用。

[基金项目] 四川省科技厅基本科研业务费项目(2025JDKY0019)

“产销平衡”，随后全国各地陆续制定磷石膏“产销平衡、以消定产”政策，磷石膏产生强度逐渐下降，基本稳定在7 500万 t/a，综合利用率不断提高，由33.0%（2015年）提高至55.6%（2023年）^[5-7]。但是，全国磷石膏堆存量仍超9亿 t^[8]，主要集中于长江流域^[9]。磷石膏大量堆存容易造成周边环境污染，磷元素进入地表水容易造成水体富营养化，氟化物进入土壤会降低农作物产量且高氟摄入会导致人体牙齿、骨质病变^[10]。2025年2月，国家发展和改革委员会组织召开磷石膏综合治理工作电视电话会议，提出加快磷石膏安全处置、综合利用最新要求，持续推动磷石膏大规模综合利用迫在眉睫。

2023年，我国磷石膏综合利用仍以水泥缓凝剂、石膏建材为主（占63.8%），生态回填（占14.4%）、矿井充填（占11.6%）为重要补充，筑路材料、分解制硫酸等协同发展^[10]。但受建筑市场低迷影响，建材利用后劲不足；矿井充填磷石膏掺比小于70%方可满足泵送要求，需加入碎石、矿渣等材料，成本较高^[11]；筑路材料路用耐久性有待检验，目前仅进行试点示范^[8]；分解制硫酸能耗高、产品质量波动大、气体浓度不高，利用技术及装备还需不断创新^[12]；作为具有大规模应用前景的新兴利用方式，改性磷石膏回填利用亟须大力发展。

本文通过分析我国磷石膏回填改性技术、标准、应用案例，重点聚焦湖北、四川、贵州、云南4省经验做法，提出未来发展的对策建议，为全国磷石膏综合治理提供参考。

1 磷石膏改性技术进展

1.1 磷石膏改性技术

磷石膏改性后能降低其有害元素的含量，或钝化有害元素的活性^[13]，改性后可制备生态修复材料^[14]用于矿坑回填。目前，磷石膏改性技术主要有以下几种。

1.1.1 物理改性技术

物理改性技术包括水洗、筛分、球磨等^[15]。水洗是利用磷石膏中杂质溶解度不同，通过洗涤、过滤、脱水等工艺去除可溶性磷、氟等杂质，其优点是操作简单、杂质去除效果明显，缺点是用水量大，一次投资大^[16]；筛分法则是利用杂质在不同粒径磷石膏颗粒中的分布差异来对杂质进行分离，该法受限于原料杂质分布，只有当杂质分布严重不均时分离效率才明显^[17]；球磨是将磷石膏颗粒形貌改变为柱状、板状、颗粒状从而去除杂质，但不

能完全去除，一般结合水洗等方法使用^[18]。

1.1.2 化学改性技术

化学改性技术包括浮选法、石灰中和法等^[13]。浮选法是以适当配比将磷石膏与水、浮选药剂放入浮选设备，经过搅拌和静置，有机物浮于水面被刮除，该法在建筑行业中应用广泛，但对细粒级杂质的去除效果相对较差，成本较高、工艺复杂^[19]；石灰中和法是通过掺加石灰与磷石膏发生化学反应，促使磷石膏中可溶磷、残留酸、氟等杂质生成难溶性沉淀，该法效果明显，投资少、耗能小^[20]。

1.1.3 热处理改性技术

热处理改性技术包括高温煅烧法、闪烧法等，其虽然除杂效果较好，但能耗高^[15]。高温煅烧法是采用高温使磷石膏中的有害杂质分解或转变成惰性物质，该法常在磷石膏制备建筑石膏粉时采用，但燃料消耗大、成本高、产生大气污染物^[21]；闪烧法是利用 P_2O_5 高温下分解为气体或转化为惰性焦磷酸钙，从而去除无机磷等杂质^[22]。

1.2 改性技术研究进展

现有改性技术中水洗、石灰中和、煅烧、球磨等应用较广，具有除杂、增白和提高性能等效果，但成本高、易产生二次污染，故大量学者新提出通过外加改性剂除杂^[23]。常用改性剂主要成分为无机盐、有机酸和氨基酸等^[24]，主要类型为激发剂（碱性、非碱性）、转晶剂、功能性外加剂（减水剂、缓凝剂、保水剂）等^[25]。

李剑秋等^[26]采用添加碱性激发剂的方法改性磷石膏，形成石膏充填体，3 d无侧限抗压强度大于0.5 MPa。陈谦等^[27]对比了水洗、石灰石中和、水洗+石灰石中和等方法对磷石膏改性效果，发现石灰石中和法对氟元素去除最为彻底，但成本较高；单次水洗法经济效益最高；水洗+石灰石中和法兼顾经济和环境效益，适应性强。姬成岗等^[28]采用活化剂（苛性钠或其他碱性物质）、钝化剂（生石灰、氯化钙、含镁磷酸盐混合物）和重金属螯合剂组成的改性药剂改性磷石膏，研究了不同配比及时间的改性效果，发现掺加改性药剂1.9%、陈化磷石膏0.8%、改性时间45 d时效果较佳。苏卫宏^[29]研究了水泥固化磷石膏效果，发现固结后绝大多数有害元素被固化在内部，重金属不易析出。黄绪泉等^[30]研究了硅灰和水泥固化磷石膏性能，发现当水泥、硅灰、消石灰的质量比为5:3:2，并加入质量分数1.5%的硅酸钠时，改性磷石膏的力学性能和耐水性能显著提高，28 d

无侧限抗压强度达9.77 MPa，水稳系数0.81，浸出液中氟化物和可溶磷浓度满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级限值要求。

2 生态回填利用现状

2.1 标准制定现状

2.1.1 标准信息统计

根据《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599—2020)，磷石膏生态回填前应开展环境本底调查，并按照《建设用地土壤污染风

险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)等标准进行环境风险评估，确保环境风险可以接受。全国部分地区对应制定了地方标准或团体标准(见表1)，细化了改性一般工业固体废物/磷石膏生态回填操作要求。2025年5月31日，生态环境部制定发布《磷石膏利用和无害化贮存污染控制技术规范》(HJ 1415—2025)，规定生态回填时磷石膏要改性，满足第I类一般工业固体废物要求并按固体废物属性设防渗层，回填作业宜3年内完成。

表1 全国磷石膏生态回填标准

Table 1 Mine ecological backfilling standards of phosphogypsum in China

序号	标准名称	标准编号	实施日期	归口地区/单位
1	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	生态环境部
2	磷石膏利用和无害化贮存污染控制技术规范	HJ 1415—2025	2025-07-01	生态环境部
3	一般工业固体废物用于矿山采坑回填和生态恢复技术规范	DB15/T 2763—2022	2022-09-15	内蒙古自治区
4	废弃露天采坑一般工业固废处置与生态修复技术规范	DB34/T 4541—2023	2023-08-31	安徽省
5	无害化磷石膏综合利用露天矿山生态修复全过程环境监管规范	DB4208/T 82—2024	2024-12-07	湖北省荆门市
6	磷石膏无害化处理技术规范	DB5117/T 75—2023	2023-07-31	四川省达州市
7	磷石膏基植生材料生态修复应用技术规范	DB5117/T 76—2023	2023-07-31	四川省达州市
8	磷石膏生态修复工程污染控制技术规范	T/GZXH 002—2024	2024-06-28	贵州省化学工业协会
9	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	云南省
10	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	云南省昆明市
11	改性磷石膏综合利用 矿山生态修复 过程环境监管规范	DB5301/T 99—2023	2023-12-01	云南省昆明市
12	改性磷石膏综合利用 矿山生态修复 跟踪评估规范	DB5301/T 100—2023	2023-12-01	云南省昆明市
13	一般工业固体废物矿坑回填修复治理技术规范	DB6108/T 100—2024	2025-01-30	陕西省榆林市

2.1.2 归口地区分析

磷石膏生态回填标准制定数量及层级占比分别见图1、图2。由图1、图2可知，11个非国家标准分布于全国5个地区，其中西南地区的一般工业固体废物或磷石膏生态回填标准数量最多，占比63.64%；11个标准中，多为市级地方标准，占比63.64%。

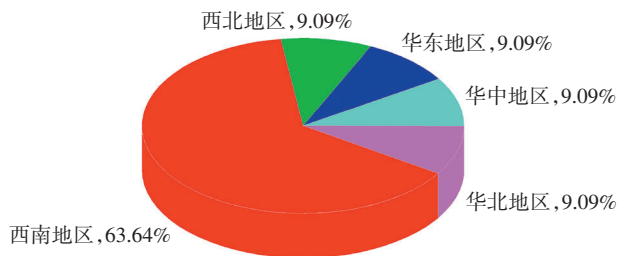


图1 磷石膏生态回填标准制定数量分布

Fig. 1 Distribution of standardized quantity for phosphogypsum ecological backfilling

2.1.3 标准差异分析

改性效果方面，湖北、四川、贵州、云南标准均要求改性磷石膏或固体废物浸出水平要满足第I类一般工业固体废物；选址方面，安徽地标根据

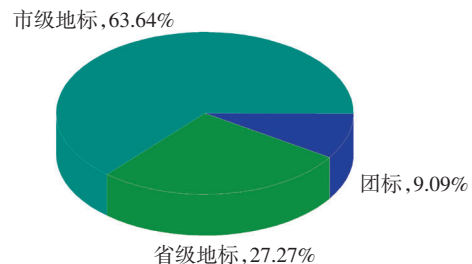


图2 磷石膏生态回填标准层级占比分布

Fig. 2 Distribution of standard levels for phosphogypsum ecological backfill

《长江保护法》，从严提出不得在长江干流3 km和重要支流1 km内开展一般工业固体废物处置与生态修复，其余标准基本参照GB 18599—2020规定选址要求；底部防渗方面，湖北、云南地标要求根据环评结论采取相符合的措施，其他标准要求基本与GB 18599—2020相同；环境风险评估方法方面，四川、贵州、云南、陕西标准引用GB 18599—2020要求，按照HJ 25.3—2019等标准评估，其余标准均增加要求需按照环境影响评价方法预测对周边环境影响；改性磷石膏检测方面，湖北、云南地标根据生态回填规模制定了采样数量和

检测频次。

2.2 生态回填应用实践

2.2.1 项目统计分析

湖北、四川、贵州、云南等地改性磷石膏生态回填项目实施案例见表2。

由表2可知，生态回填规模云南最大，四川较小，云南生态回填量约4 500万 t/a，贵州约920万 t/a；

磷石膏改性工艺基本采用外加改性剂固化/稳定化，仅湖北的矮子沟废弃矿坑生态修复项目采用水洗+固化；改性磷石膏基本为粉状或胶凝材料，四川达州项目将一部分磷石膏改性制成刚性材料开展试点试验；生态回填矿坑的底部基本设置了防渗系统，生态回填工程参照《一般工业固体废物贮存和填埋场污染控制标准》(GB 18599—2020)固体废物填

表2 磷石膏生态回填应用案例

Table 2 Application cases of phosphogypsum ecological backfilling

序号	项目名称	地点	年份	规模/ (万t·a ⁻¹)	磷石膏改性工艺/ 目标材料	工程措施	投资强度/ (元·t ⁻¹)	参考文献
1	枫岭建材石料厂露天采坑磷石膏回填与生态修复工程	安徽合肥	2025	182	制成磷石膏基生态修复材料	坑底2+2 mm HDPE膜防渗、边坡2 mm HDPE膜防渗,渗滤液收集处理、坑外雨污分流,顶部0.5 mm隔水层+植草复绿,生态修复面积16.6万m ²		[31]
2	矮子沟废弃矿坑生态修复项目	湖北荆门	2023	200	水洗+中和	矿坑及边坡防渗、回填体渗滤液收集处理,无害化磷石膏回填后,表面绿化,生态修复面积7.72万m ²	37.5	[32]
	除泉山生态修复试点工程	湖北荆门	2024	200	水洗+中和+固化	底部防渗、渗滤液收集	70.0	[33]
3	四川省达州市某采石场矿坑磷石膏回填项目	四川达州	2023	80	高流变钙基药剂改性制粉状材料、胶凝硬化改性制刚性材料	刚性、柔性分区回填(底部防渗),刚性区面积约2 972.95 m ² ,采用“花坛式”回填结构;柔性区面积约24 962.80 m ² ,采用分层填筑碾压方式进行回填,堆体平均厚度约15.50 m	115.0	[34-35]
4	福泉公鸡山露天坑生态修复项目	贵州黔南	2019	150	中和(碱激发剂+胶凝)	渗滤液收集处理、雨污分流,生态修复面积2.35万m ²		[36]
5	龙井湾绿化工程项目	贵州贵阳	2020	140	制成新型磷石膏边坡防护及绿化基质材料	改性磷石膏替代砂石、黏土对边坡治理,底部及顶部均防渗,表面覆土复绿	47.0	[37]
6	磨坊露天矿采空区生态修复项目	贵州黔南	2023	126	中和(石灰、水泥或建筑石膏)	矿坑防渗、渗滤液收集处理、坑外雨污分流,顶部植草复绿,生态修复面积5.63万m ²	40.0	[38]
7	长坡山露天砂石矿无害化磷石膏固化充填及覆土生态修复项目	贵州黔南	2024	320	中和(石灰、固化剂)	矿坑及内边坡防渗、渗滤液收集处理、雨污分流,顶部防渗+植被复绿,生态修复面积10.1万m ²	25.0	[39]
8	陆坪大酿石料厂无害化磷石膏生态修复项目	贵州黔南	2025	187	中和	矿坑采用2 mm HDPE膜防渗,顶部覆土后采用乔灌植物复绿,生态修复面积约4.5万m ²	21.8	[40]
9	云龙磷矿矿区生态修复项目	云南昆明	2021	1 225	制成磷石膏基生态修复材料	矿坑及边坡防渗、渗滤液收集处理、坑外雨污分流,顶部防渗+植被复绿,生态修复面积102.7万m ²	30.2	[41-42]
10	双哨磷矿厂磷矿生态修复项目	云南昆明	2023	1 308	制成磷石膏基生态修复材料	采用分层填筑碾压方式进行回填,矿坑及边坡防渗、渗滤液收集处理、雨污分流,顶部防渗+植被复绿,生态修复面积48.1万m ²	30.7	[43]
11	桃树村委会磷矿矿山生态修复项目	云南昆明	2023	1 863	制成磷石膏基生态修复材料	矿坑及边坡防渗、渗滤液收集处理、雨污分流,顶部防渗+植被复绿,生态修复面积82.5万m ²	39.6	[44]
12	化香箐采石场废弃矿坑生态修复项目	云南昆明	2024	75	中和(电石渣、生石灰)	矿坑及边坡0.75 m黏土+1.5 mm土工膜防渗,渗滤液收集处理、坑外雨污分流,顶部1.5 mm HDPE膜防渗+复绿,生态修复面积4.7万m ²	83.8	[45-46]
13	小龙潭镇矿坑生态修复项目	云南红河	2024	30		矿坑及边坡0.75 m黏土+1.5 mm土工膜防渗、渗滤液收集处理、坑外雨污分流,顶部1.0 mm土工膜和300 g/m ² 土工布防渗+植被复绿,生态修复面积1.5万m ²	51.5	[47]

注:序号4、6、8、9、10、11的项目回填规模按1.5 t/m³折算;序号13改性后满足DB53/T 1269—2024。

埋场建设、封场,执行标准较为严格;投资强度22~115元/t,四川达州项目超过100元/t,湖北荆门陈皮山、云南昆明化香箐、云南红河小龙潭3个项目50~100元/t,其余项目均小于50元/t,湖北、云南项目投资强度逐年增大,贵州项目逐年减小。

2.2.2 实施成效

四川省达州项目近日通过竣工验收,其采用地貌重塑、土壤重构及植被重建等措施解决了长石盘采石场存在的地质安全隐患、土地资源损毁及地貌景观破坏等问题,验证了优化的磷石膏无害化生产工艺可靠性与稳定性,推进了改性磷石膏生态回填在四川等地的应用。

3 存在的问题和面临的挑战

3.1 露天矿坑选址困难

磷石膏生态回填要经济可行,矿坑选址需距磷石膏库较近。我国磷石膏库主要集中于长江经济带,部分地区从严执行《长江保护法》《关于做好“三磷”建设项目环境影响评价与排污许可管理工作的通知》《关于磷石膏无害化后用于矿坑生态修复项目有关事宜的复函》有关要求,明确规定选址不得位于长江干流3 km、重要支流岸线1 km,行业专家从风险防控角度考虑亦建议选址尽量避开该区域。未退出矿权的矿坑,其所有人要求补偿大额费用,生态回填成本陡增;部分历史遗留矿坑位于生态保护红线或永久基本农田集中区域,不宜实施磷石膏生态回填。以上限制了露天矿坑选择,制约了改性磷石膏生态回填的大规模发展。

3.2 评估方法不完全适用

生态回填作为潜力较大的磷石膏利用方式,无针对性的专用环境风险评估标准,仅参考HJ 25.3—2019、环境影响评价导则等,且HJ 25.3—2019重点关注人体健康风险,不能完全满足GB 18599—2020中重点评估生态回填活动对地下水、地表水及周边土壤环境污染风险的要求,环境影响预测不能完全代替风险评估,方法的不完全适用阻碍生态回填活动长期、良性发展。

3.3 跟踪研究力度不足

目前,湖北、四川、贵州、云南等地已试点实施改性磷石膏矿坑生态回填项目,但少有学者针对生态回填后对周边地表水、地下水、土壤等环境影响进行跟踪研究,并分析生态回填矿坑选址、改性工艺、环境风险评估方法、建设标准等不足或过于严苛之处,自GB 18599—2020允许生态回填以来,各项目实施内容大同小异,基本均按照固体废

物贮存和填埋场要求建设了防渗系统、渗滤液收集处理、雨污分流等污染防治措施,施工等方面创新探索未取得实质突破,改性磷石膏生态回填执行保守、成本居高不下等问题仍一直存在。

4 结论及展望

(1) 拓展改性磷石膏生态回填情形。在环境和安全风险可控的前提下,打破改性磷石膏仅可生态回填于露天开采的地表挖掘区、取土场以及天然坑洼区的限制,拓展应用场景,允许根据生态修复需要,作为修复材料使用;以保护周边人体健康和土壤、地下水、地表水、生态环境等为目的,根据生态回填情形制定不同的改性磷石膏生态回填选址要求,保障生态回填项目既能大规模有序推进,又有科学标准指引,促进磷石膏“产销平衡”,引导磷化工行业高质量发展。

(2) 制定体系健全的环境风险评估方法。根据固体废物源强特征、污染物迁移转化路径及条件、周边风险受体,以环境风险可接受为导向,针对磷石膏改性后仍属于固体废物的情形,建立具有科学性、针对性的改性磷石膏生态回填风险评估方法;推动《固体废物资源化产品环境风险评估通用指南》(T/CAEPI 69—2023)上升为行业标准,作为《固体废物再生利用污染防治技术导则》(HJ 1091—2020)、《固体废物鉴别标准 通则》(GB 34330—2017)的重要补充,指导改性磷石膏产品的环境风险定性、定量评价。

(3) 探索风险和成本双接受的平衡。及时总结现有生态回填项目经验和实施后环境影响,适时修订现有地方标准。充分发挥研究探索功能,针对固化、稳定化、水洗等不同改性工艺,碎屑岩(低风化、中风化、强风化)、碳酸盐岩(岩溶弱发育、中等发育、强发育)等不同岩层,不防渗、黏土防渗、HDPE膜防渗等不同条件,开展正交小试试验,寻求生态环境保护和企业平稳发展的平衡,实现改性磷石膏矿坑生态回填环境风险可控、工程建设资金投入强度降低。

[参考文献]

- [1] 甘淳丹,潘韵连,刘恒博,等.磷石膏和土壤中可溶性氟的浸出特性研究[J].无机盐工业,2025,57(9):104-109.
GAN C D, PAN Y L, LIU H B, et al. Study on leaching characteristics of soluble fluoride in phosphogypsum and soil[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2025, 57(9): 104-109.
- [2] 高卫民,冉景,朱巧红.我国磷石膏资源化利用政策解读及研究进展[J].化工矿物与加工,2022,51(7):48-53.

- GAO W M, RAN J, ZHU Q H. Policy interpretation and research progress of resource utilization of phosphogypsum in China [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2022, 51(7): 48-53.
- [3] TAYIBI H, CHOURA M, LÓPEZ F A, et al. Environmental impact and management of phosphogypsum [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2377.
- [4] 徐长忠, 於金浩, 李义连. 磷石膏的预处理和综合利用研究进展 [J]. *安全与环境工程*, 2024, 31(1): 260-270.
- XU C Z, YU J H, LI Y L. Research progress of pretreatment and comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(1): 260-270.
- [5] 白春华, 王金宝, 李光辉, 等. 我国磷石膏污染特性、利用及环境管理研究 [J]. *环境科学研究*, 2025, 38(3): 632-641.
- BAI C H, WANG J B, LI G H, et al. Research on the Pollution Characteristics, Utilization and Environmental Management of Phosphogypsum in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2025, 38(3): 632-641.
- [6] 白海丹. 2019年我国磷石膏利用现状、问题及建议 [J]. *硫酸工业*, 2020(12): 7-10.
- BAI H D. Current situation, problems and suggestions of phosphogypsum utilization of 2019 in China [J]. *Sulphuric Acid Industry*, 2020(12): 7-10.
- [7] 崔荣政, 王臣, 修学峰. 2023年我国磷石膏综合利用情况及产业发展现状分析 [J]. *生态产业科学与磷氟工程*, 2024, 39(11): 1-6.
- CUI R Z, WANG C, XIU X F. Analysis of comprehensive utilization and industrial development status of phosphogypsum in China in 2023 [J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2024, 39(11): 1-6.
- [8] 崔荣政, 白海丹, 高永峰, 等. 磷石膏综合利用现状及“十四五”发展趋势 [J]. *无机盐工业*, 2022, 54(4): 1-4.
- CUI R Z, BAI H D, GAO Y F, et al. Current situation of comprehensive utilization of phosphogypsum and its development trend of 14th Five-Year Plan [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2022, 54(4): 1-4.
- [9] 宋金宝, 梅毅, 夏举佩, 等. 磷、氟杂质对建筑石膏性能的影响研究 [J]. *现代化工*, 2024, 44(10): 137-143.
- SONG J B, MEI Y, XIA J P, et al. Study on influence of phosphorus and impurities on properties of building purpose gypsum [J]. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(10): 137-143.
- [10] 陈冠. 改性磷石膏胶结充填体污染元素固化机制及其耐久性研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2024.
- CHEN G. Study on Solidification Mechanism of Polluting Elements of Modified Phosphogypsum Cemented Backfill and its Durability [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2024.
- [11] 张淑坤, 杨浩杰, 付康, 等. 磷石膏矿山充填材料研发与性能试验研究 [J]. *矿业安全与环保*, 2024, 51(1): 133-139.
- ZHANG S K, YANG H J, FU K, et al. Research on the development and performance test of phosphogypsum filling materials for mines [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2024, 51(1): 133-139.
- [12] 朱兵兵, 张媛媛, 邹兴芳, 等. 磷石膏制硫酸联产水泥技术的前景展望 [J]. *中国水泥*, 2024(2): 68-70.
- [13] 卢维宏, 王要芳, 刘娟, 等. 磷石膏无害化改性及其在农田土壤改良中的应用研究进展 [J]. *土壤*, 2023, 55(4): 699-707.
- LU W H, WANG Y F, LIU J, et al. Phosphogypsum (PG) Harmless Modification and Its Application in Farmland Soil Improvement: A Review [J]. *Soils*, 2023, 55(4): 699-707.
- [14] 祝国亮. 磷石膏的综合利用及其在环境领域的应用研究进展 [J]. *生态产业科学与磷氟工程*, 2024, 39(7): 65-70.
- ZHU G L. Research progress on comprehensive utilization of phosphogypsum and its application in environment field [J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2024, 39(7): 65-70.
- [15] 桑安, 曹俊雅, 张莉昕, 等. 磷石膏固废资源化利用技术及应用前景 [J]. *现代化工*, 2025, 45(1): 34-41.
- SANG A, CAO J Y, ZHANG L X, et al. Phosphogypsum solid waste reutilization technology and application prospects [J]. *Modern Chemical Industry*, 2025, 45(1): 34-41.
- [16] 张华丽, 贾振林, 王潇峰, 等. 磷石膏资源化利用过程中预处理进展 [J]. *磷肥与复肥*, 2023, 38(12): 25-29.
- ZHANG H L, JIA Z L, WANG X F, et al. Pretreatment progress of phosphogypsum in the process of resource utilization [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2023, 38(12): 25-29.
- [17] 李恒, 张晖. 磷石膏增白净化技术研究现状 [J]. *磷肥与复肥*, 2022, 37(6): 31-34.
- LI H, ZHANG H. Research status of phosphogypsum whitening and purification technology [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2022, 37(6): 31-34.
- [18] 吴浩, 韩超南, 汤昱. 我国磷石膏资源化利用研究进展 [J]. *现代化工*, 2023, 43(3): 18-21.
- WU H, HAN C N, TANG Y. Research progress on reutilization of phosphogypsum in China [J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(3): 18-21.
- [19] 曾彦琦, 楼思迪, 任浏祎, 等. 磷石膏浮选净化工艺研究进展 [J]. *有色金属(选矿部分)*, 2025(5): 43-53.
- ZENG Y Q, LOU S D, REN L Y, et al. Review on Flotation Methods in the Resource Utilization of Phosphogypsum [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2025(5): 43-53.
- [20] 蒋达波, 谭建红, 袁鹏, 等. 磷石膏中有害成分的无害化处理方法综述 [J]. *吉林化工学院学报*, 2014, 31(1): 33-36.
- JIANG D B, TAN J H, YUAN P, et al. Overview of Harmless Treatment Methods for Harmful Components in Phosphogypsum [J]. *Journal of Jilin Institute of Chemical Technology*, 2014, 31(1): 33-36.
- [21] 罗永菊, 崔焱焱, 梁梓晗, 等. 基于煅烧磷尾矿的磷石膏无害化处理工艺研究 [J]. *化工矿物与加工*, 2024, 53(7): 10-15.
- LUO Y J, CUI Y Y, LIANG Z H, et al. Research on harmless treatment process of phosphogypsum based on calcined phosphorus tailings [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2024, 53(7): 10-15.
- [22] 吴磊, 赵勇, 杨俊. 磷石膏净化处理方法探讨 [J]. *广州化工*, 2023, 51(8): 6-8.
- WU L, ZHAO Y, YANG J. Discussion on Purification Treatment of Phosphogypsum [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2023, 51(8): 6-8.
- [23] 刘榴燕, 凌静, 杨冬升, 等. 磷石膏资源化利用研究进展及未来趋势的可视化分析 [J]. *现代化工*, 2023, 43(S2): 6-11.
- LIU L Y, LING J, YANG D S, et al. Visualization analysis on research progress and future trend of phosphogypsum utilization [J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(S2): 6-11.
- [24] 温小韵, 童雄, 尚江涛, 等. 磷石膏基胶凝材料的力学性能及应

- 用研究进展[J].硅酸盐通报,2025,44(3):953-969.
- WEN X Y, TONG X, SHANG J T, et al. Progress on Application and Mechanical Properties of Phosphogypsum Cementitious Materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(3):953-969.
- [25] 郭佳龙,李宪军,丁嘉玮,等.工业副产石膏基复合胶凝材料的研究进展[J].新型建筑材料,2025,52(1):22-30.
- GUO J L, LI X J, DING J W, et al. Research progress on industrial by-product gypsum-based composite cementitious materials[J]. New Building Material, 2025, 52(1):22-30.
- [26] 李剑秋,李子军,王佳才,等.半水磷石膏充填材料在某露天采坑充填治理中的应用[J].现代矿业,2021,37(9):250-255.
- LI J Q, LI Z J, WANG J C, et al. Application of Hemihydrate Phosphogypsum Filling Material in Filling Treatment of an Open-pit Mine[J]. Modern Mining, 2021, 37(9):250-255.
- [27] 陈谦,陈利轩.磷石膏的改性及生态修复应用实验研究[J].高原农业,2023,7(6):658-669.
- CHEN Q, CHEN L X. Experimental Study on the Modification and Ecological Restoration Application of Phosphogypsum [J]. Journal of Plateau Agriculture, 2023, 7(6):658-669.
- [28] 姬成岗,谭娟,叶珊,等.基于矿坑(井)生态修复的磷石膏无害化改性研究[J].环境科技,2024,37(6):1-5.
- JI C G, TAN J, YE S, et al. Research on Harmless Modification of Phosphogypsum Based on Ecological Restoration of Mining Pits [J]. Environmental Science and Technology, 2024, 37(6):1-5.
- [29] 苏卫宏.露天坑固化回填对地下水环境影响分析[J].现代矿业,2021,37(6):201-204,210.
- SHU W H. Research on the Environmental Impact of Open Pit Solidification Backfilling on Groundwater[J]. Modern Mining, 2021, 37(6):201-204,210.
- [30] 黄绪泉,蔡家伟,赵小蓉,等.硅酸钠改性磷石膏道路稳定材料性能及固化机理[J].硅酸盐通报,2024,43(12):4471-4479.
- HUANG X Q, CAI J W, ZHAO X R, et al. Performance and Curing Mechanism of Sodium Silicate Modified Phosphogypsum Road Stabilizing Material [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(12):4471-4479.
- [31] 庐江县人民政府.安徽省庐江县枫岭建材石料厂露天采坑磷石膏回填与生态修复工程环境影响评价征求意见稿公示(第二次公示)[EB/OL]. [2025-03-10]. <https://www.lj.gov.cn/public/19081/110945207.html>.
- [32] 湖北日报.200万吨无害化磷石膏将填进废弃矿坑 荆门用工厂垃圾修复“大自然的伤疤”[EB/OL]. [2024-12-27]. https://news.hubeidaily.net/mobile/c_3491529.html.
- [33] 央广网.全国首例石膏修复矿山生态新技术项目落地荆门[EB/OL]. [2024-12-27]. https://tech.cnr.cn/techph/20240913/t20240913_526902008.shtml.
- [34] 韩伟,张传奇,王海燕,等.大宗工业固废用于矿坑回填协同生态修复进展、问题与对策[J].环境保护科学,2025,51(2):20-24.
- HAN W, ZHANG C Q, WANG H Y, et al. Progress, problems and countermeasures of bulk industrial solid waste for ecological restoration of abandoned open pits [J]. Environmental Protection Science, 2025, 51(2):20-24.
- [35] 刘恒博,姚勤英,郭卫广,等.一般工业固体废物回填环境风险评估方法研究:以某矿坑磷石膏回填为例[J].环境工程学报,2025,19(5):1202-1216.
- LIU H B, YAO Q Y, GUO W G, et al. Study on environmental risk assessment method of general industrial solid waste backfilling: a case study of phosphogypsum backfilling in a mine [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025, 19(5):1202-1216.
- [36] 黔南州生态环境局.关于2024年8月7日拟作出的建设项目环境影响评价文件审批意见的公示[EB/OL]. [2024-08-07]. https://www.qiannan.gov.cn/zwgkztym/zsthjj_5669155/zfxxgk_5669162/fdzdgknr_5669165/sthj_5669175/hjxpxjyypf/202409/t20240929_85771082.html.
- [37] 全国建设项目环境信息公示平台.龙井湾磷石膏库边坡防渗系统和堆积坝建设项目竣工环境保护验收报告表[EB/OL]. [2025-02-21]. <https://www.eiacloud.com/gs/detail/2?id=502212YCSJ>.
- [38] 黔南州生态环境局.关于2023年5月6日拟作出的建设项目环境影响评价文件审批意见的公示[EB/OL]. [2023-05-06]. https://www.qiannan.gov.cn/zwgkztym/zsthjj_5669155/zfxxgk_5669162/fdzdgknr_5669165/sthj_5669175/hjxpxjyypf/202305/t20230517_79776808.html.
- [39] 黔南州生态环境局.关于2024年9月24日拟作出的建设项目环境影响评价文件审批意见的公示[EB/OL]. [2024-09-24]. https://www.qiannan.gov.cn/zwgkztym/zsthjj_5669155/zfxxgk_5669162/fdzdgknr_5669165/sthj_5669175/hjxpxjyypf/202410/t20241018_85955116.html.
- [40] 黔南布依族苗族自治州人民政府.福泉桂源环保有限公司福泉市陆坪大酿石料厂无害化磷石膏生态修复项目环境影响报告表受理公示[EB/OL]. [2025-04-23]. https://www.qiannan.gov.cn/zwgk/zdlygk/sthj/sthjaqjg/202504/t20250425_87576245.html.
- [41] 昆明市生态环境局西山分局.关于拟审批《海口工业园区(街道)云龙磷矿区修复治理项目环境影响报告表》的公示[EB/OL]. [2021-12-31]. <http://www.kmxs.gov.cn/c/2021-12-31/5684730.shtml>.
- [42] 昆明市西山区人民政府.生态环境部对西山区云龙磷矿生态治理修复进行现场调研[EB/OL]. [2023-03-15]. <http://www.kmxs.gov.cn/c/2023-03-15/6575991.shtml>.
- [43] 昆明市生态环境局西山分局.拟审批《昆明市西山区海口双哨磷矿厂磷矿生态修复项目环境影响报告表》的公示[EB/OL]. [2023-07-13]. <http://www.kmxs.gov.cn/c/2023-07-13/6666365.shtml>.
- [44] 昆明市生态环境局西山分局.拟审批《昆明市西山区海口镇桃树村委会磷矿矿山生态修复项目环境影响报告表》的公示[EB/OL]. [2023-07-13]. <http://www.kmxs.gov.cn/c/2023-07-13/6666346.shtml>.
- [45] 昆明市生态环境局寻甸分局.拟审批《中化云龙有限公司90万吨粉状改性磷石膏项目环境影响报告表》的公示[EB/OL]. [2023-06-29]. <http://www.kmxd.gov.cn/c/2023-06-29/66661176.shtml>.
- [46] 昆明市生态环境局寻甸分局.拟审批《云南省寻甸县化香箐采石场废弃矿坑生态修复项目环境影响报告表》的公示[EB/OL]. [2024-11-25]. <http://www.kmxd.gov.cn/c/2024-11-25/6935637.shtml>.
- [47] 全国建设项目环境信息公示平台.云南云天化红磷化工有限公司开远市小龙潭镇矿坑生态修复项目竣工环境保护验收监测报告表公示[EB/OL]. [2025-02-21]. <https://www.eiacloud.com/gs/detail/2?id=50221ZgsxK> National environmental information publicity platform for construction projects.