

石泽雨,陈秋月,赵文翰,等.磷石膏领域研究展望 [J]. 中国环境科学, 2026,46(5):2594-2609.

Shi Z Y, Chen Q Y, Zhao W H, et al. Research perspectives in the field of phosphogypsum [J]. China Environmental Science, 2026,46(5):2594-2609.

磷石膏领域研究展望

石泽雨^{1,2},陈秋月¹,赵文翰^{1,3},王统⁴,朱燕⁵,程伟⁶,武文杰⁷,刘明柱²,刘玉强¹,朱浩东⁸,龙杰^{1,9*} (1.中国环境科学研究院,生态环境部危险废物鉴别与风险控制重点实验室,北京 100012; 2.中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083; 3.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083; 4.云南省生态环境科学研究院,云南昆明 650034; 5.湖北省生态环境科学研究院,湖北武汉 430072; 6.贵州大学,贵州贵阳 550025; 7.昆明理工大学国土资源工程学院,云南昆明 650500; 8.云南磷化集团海口磷业有限公司,云南昆明 650113; 9.粤港澳生态环境科学中心,广东广州 510000)

摘要: 磷石膏产量与堆存规模持续增长,其环境风险日益突出.基于 CiteSpace 对近 25 年中国知网(CNKI)与 Web of Science(WOS)文献研究热点及 Derwent Innovation 专利的可视化分析显示,2000~2025 年间发文量持续上升,中国在文献与专利数量及中心性上居首,显示出较强的科研与技术影响力.CNKI 研究侧重于材料性能优化、副产物利用与数值模拟,而 WOS 更关注环境风险评估与稀有元素回收.在专利布局方面,国内研究聚焦于建材、化工、农业及环境治理,而国外则侧重于稀散金属提取.未来研究将围绕低成本原位无害化、规模化消纳过程风险评估、环境污染系统化治理、稀贵金属高效提取和碳足迹与低碳技术集成展开,并强化国际合作及人工智能、多源参数融合的风险预测与预警模型构建.

关键词: 磷石膏库; 环境风险监测防控; 环境污染系统化治理; 研究热点; 专利布局

中图分类号: X705.X75 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2026)05-2594-16

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20251218.005

Research perspectives in the field of phosphogypsum. SHI Ze-yu^{1,2}, CHEN Qiu-yue¹, ZHAO Wen-han^{1,3}, WANG Tong⁴, ZHU Yan⁵, CHENG Wei⁶, WU Wen-jie⁷, LIU Ming-zhu², LIU Yu-qiang¹, ZHU Hao-dong⁸, LONG Jie^{1,9*} (1.Key Laboratory of Hazardous Waste Identification and Risk Control, Ministry of Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3.School of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 4.Yunnan Academy of Environmental Science, Kunming 650034, China; 5.Hubei Academy of Environmental Science, Wuhan 430072, China; 6.Guizhou University, Guiyang 550025, China; 7.Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 8.Yunnan Phosphate Group Haikou Phosphate Co., Ltd., Kunming 650113, China; 9.Guangdong-Hong Kong-Macao Center for Ecological Environment Science, Guangzhou 510000, China). *China Environmental Science*, 2026,46(5): 2594-2609

Abstract: With the continuous expansion of phosphogypsum production and stockpiling, its associated environmental risks were increasingly recognized as prominent. Based on a CiteSpace analysis of research hotspots in literature from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science (WOS) over the past 25 years, along with a visualization of Derwent Innovation patents, the number of related publications was shown to have grown steadily from 2000 to 2025. China was ranked first in terms of publication volume, patent output, and research centrality, which reflected its strong scientific and technological influence. Studies based on CNKI were tended to be focused on material performance optimization, by-product utilization, and numerical simulation, while greater emphasis was placed on environmental risk assessment and the recovery of rare elements in WOS literature. In terms of patent distribution, domestic research was primarily centered on building materials, the chemical industry, agriculture, and environmental management, whereas foreign research was more concentrated on the extraction of dispersed metals. Future research directions were expected to prioritize low-cost in situ harmless treatment, risk assessment of large-scale disposal processes, systematic management of environmental pollution, efficient extraction of rare and precious metals, and the integration of carbon footprint analysis with low-carbon technologies. Additionally, a growing emphasis was placed on strengthening international cooperation and developing risk prediction and early warning models through the application of artificial intelligence and multi-source data integration.

Key words: phosphogypsum storage; environmental risk monitoring and prevention; systematic management of environmental pollution; research hotspots; patent layout

收稿日期: 2025-10-13

基金项目: 生态环境科技创新先导专项:生态环境领域科技中长期战略研究(固体废物资源化与污染控制)(2024-XDZX-01-0204);国家重点研发计划项目(2023YFC3708902);云南省科技厅计划项目(202504BW050003)

* 责任作者, 副研究员, Long.jie@cares.org.cn

磷石膏是磷矿开采和生产磷肥、磷酸及其他磷化工产品过程中产生的副产物^[1],每生产 1t 磷酸,约产生 4~5t 磷石膏^[2]。磷石膏通常呈灰白色或灰黑色,主要化学成分是硫酸钙(含量超过 70%),呈酸性(pH 值一般小于 5),且溶解性差,极难溶于水^[3]。受到成磷时代和堆存时间的影响,磷石膏中还富含磷、硅、铝、铁、氟等元素,并伴生有重金属等多种有价组分,体现了环境资源二元属性^[4]。

目前为止,全球范围内磷石膏的存量已突破 60t,并以每年 2~3 亿 t 的速度持续增加^[5]。作为磷矿开采与磷化工产业的主要国家,中国在该领域的副产品排放量位居全球首位,其磷石膏存量超 8 亿 t,年增长率超 8000 万 t^[6]。各国在磷石膏利用领域存在显著差异,发达国家的相关研究与应用相对较早。日本和德国在磷石膏回收利用方面分别实现了 100% 和 95% 的高效处理^[8]。然而,多数国家尚未实现有效的资源化利用,普遍采取堆积或海洋排放的处理方式^[9]。长江流域是中国磷石膏的主要产区,集中分布于湖北、云南、贵州、四川、安徽和重庆等地区^[10]。尽管当前我国在磷石膏资源化利用方面取得显著进展,其综合利用率已突破 60%^[11],主要利用方式涵盖生态修复工程、土壤改良技术、建筑材料开发及副产品利用等多个领域^[12-13],但仍有大量磷石膏未经处理便堆积于贮存设施中,对长江流域的生态治理与高质量发展构成严重制约。从全球视角来看,磷石膏引发的环境挑战依然严峻,对生态保护工作构成巨大压力^[14]。另外,在降水作用下,防渗措施不完善的磷石膏堆场极易导致含磷、氟等污染物渗入农业用地、地下水源和河湖水系等区域,进而对水环境系统、土壤结构和农作物发育产生不利影响,甚至危及人体健康^[15]。这些因素严重制约了全球磷化工行业和生态环境保护的可持续发展。

鉴于磷石膏不当处置带来的环境风险与安全隐患,亟需加强其资源化利用的科学研究,以提升相关产品的市场价值。这一举措不仅有助于缓解当前的环境压力,更能为全球磷化工产业的可持续发展提供保障。为应对这一挑战,国际学术界在磷石膏利用领域的研究力度持续加大,各国政府也相继出台了一系列配套政策、法规及标准体系。磷石膏的安全利用和规模化消纳正成为全球性挑战和研究重点。

目前,全球范围内尚未对该领域的文献和专利

技术热点进行系统梳理,导致未来磷石膏研究的重点方向尚不明确。加之中国正处于下一个五年计划的关键时期,磷石膏研究领域的发展显得尤为紧迫。因此,本文基于 CiteSpace 软件的文献计量与知识图谱功能,对近 25 年中国知网(CNKI)和 Web of Science(WOS)数据库中磷石膏领域文献进行可视化分析,并结合 Derwent Innovation(DII)专利技术领域构成,识别并量化该领域的研究热点与技术演进路径,以期为未来磷石膏领域研究及其前沿技术发展提供新视野。

1 数据来源

本研究利用 CNKI 和 WOS 数据库作为文献检索工具,检索时间范围设定为 2000~2025 年。在 CNKI 数据库中,以“磷石膏”为主题进行检索,并选择 SCI、EI、北大核心、CSSCI 和 CSCD 期刊,共筛选出 1811 篇相关文献,文本以“refworks”格式保存,作为中文文献分析样本。在 WOS 核心数据库,以“Phosphogypsum”为主题检索,经过去重处理后得到 4846 篇文献,以“全记录与引用的参考文献”格式下载,保存为纯文本,作为外文文献分析的数据样本。

此外,结合 DII 数据库(包含德温特世界专利索引[®](DWPI)和德温特专利引文索引[®](DPCI)),以“Phosphogypsum”为关键词进行检索,时间范围设定为 2000~2025 年。根据 DWPI 同族合并规则,获得 8728 条相关数据,其中中国专利数据为 7938 条。

2 研究方法

采用文献计量学与知识图谱可视化分析相结合的方法,梳理文献脉络,挖掘研究路径与热点,直观呈现领域现状^[16]。利用 CiteSpace 对相关文献进行可视化分析,这是一种用 Java 编程语言编写的可视化软件,基于“共现聚类”原理,旨在绘制文献知识图谱,如关键词、作者、国家、期刊、机构等信息模块^[17-18]。利用 DII 数据库将专利可视化处理,将文献样本导入 CiteSpace (6.2.R3),时间范围为 2000~2025 年,以 1 年为时间切片单位。节点类型依次选择国家和关键词,采用切片网络剪切方式进行数据分析。并在分析过程中引入中心性(BC)和突现强度两个指标,用于识别网络中起桥梁作用、连接不同知识簇的核心节点,反映该主题在整个研究领域中的基础性

与枢纽地位;后者则用于探测特定关键词在某一段时间段内出现频次的显著增长,从而识别研究热点的演变轨迹与新兴前沿。

3 结果与讨论

3.1 文献量和专利量分析

3.1.1 CNKI 和 WOS 数据库文献量分析 2000~2025 年共有 81 个国家对磷石膏展开了研究,2000~2025 年间发文量前十国家如表 1 和图 1 所示.中国的文献发表数量最多,达 2451 篇,其中心性(BC)为 0.83.美国位列第二(406 篇,BC=0.62),其次是西班牙(276 篇,BC=0.08)和巴西(270 篇,BC=0.02).相比之下,大多数其他国家的发表数量有限,对磷石膏领域的整体研究影响较小.值得注意的是,尽管巴西、印度和波兰等国的论文数量较多,但其中心性较低,表明这些国家在全球合作网络中的结构影响力较弱.中国的中心性最高(0.83),说明中国等高中心性国家在该研究领域占据主导地位。

对专利所属地域进行分析,如图 1,其中中国的专利数量远超其他国家,达 7938 件,占全球磷石膏专利总量的 90.95%.根据专利数量排序,依次为中国(7938 件)、俄罗斯(319 件)、印度(45 件)、哈萨克斯坦(41 件)、韩国(41 件)、美国(34 件)、白俄罗斯(21 件)、巴西(18 件)、南非(16 件)和波兰(15 件).磷石膏领域专利数量地区间差异主要受产量、磷矿资源分布和管理政策影响.全球磷矿资源集中在中国、摩

哥、美国和俄罗斯等国^[9].磷石膏生产促进了科技创新,例如巴西将其用于建筑材料;西班牙通过 γ 射线评估磷石膏堆中放射性核素活度浓度;印度则通过评估块茎结缔组织测试磷石膏浓度对生物健康的威胁^[20-23].近年来,中国政府不断加强磷石膏综合利用的技术创新与政策支持,并发布《磷石膏综合利用行动计划》等政策文件,提出到 2025 年磷石膏综合利用率达到 60% 以上,并推动建设一批综合利用示范基地.这些政策专利成果迅速增加,使中国成为磷石膏相关专利创新的主要来源国.由此可见,中国在磷石膏专利数量上的领先地位,不仅得益于产量规模和资源禀赋,更与国家政策引导和技术创新体系的完善密切相关。

表 1 WOS 数据库中磷石膏领域研究前十国家发文量
Table 1 Top 10 publishing countries in the field of phosphogypsum based on publication count in the WOS database

序号	国家	数量	首次发表年份	中心性
1	中国	2451	2002	0.83
2	美国	406	2000	0.62
3	西班牙	276	2000	0.08
4	巴西	270	2000	0.02
5	摩洛哥	166	2001	0.01
6	突尼斯	166	2005	0.03
7	法国	165	2000	0.05
8	印度	162	2000	0.01
9	波兰	135	2002	0.03
10	俄罗斯	125	2004	0.02

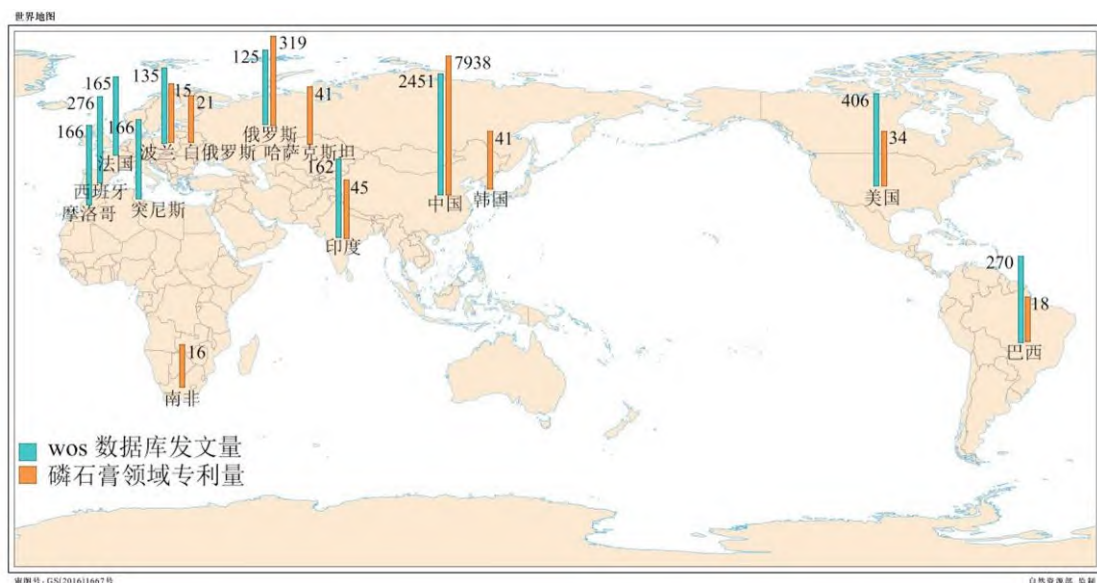


图 1 全球磷石膏领域专利量与发文量

Fig.1 Global Patent Count and Publication Volume in the Field of Phosphogypsum

3.2 热点分析

3.2.1 文献数据库热点分析 (1)WOS 数据库热点分析“phosphogypsum(磷石膏)”“gypsum(石膏)”“fly ash(粉煤灰)”作为高频关键词(出现频次>350),表明大宗工业固废的协同利用一直是该领域的长期核心议题.尤其是粉煤灰与磷石膏在胶凝体系中的复配研究,不仅能改善水化特性(hydration)、提高力学性能(strength、mechanical property、compressive strength),还能降低生产成本和环境压力.例如,已有研究利用磷石膏熟料为原料制备磷石膏基复合胶凝材料,并系统评估其测试抗压强度等关键性能^[27].

从材料性能相关关键词来看,“cement(水泥)”“hydration(水化特性)”“lime(石灰)”“building materials(建材)”“concrete(混凝土)”等材料类关键词,与“strength(强度)”“performance(性能)”“mechanical properties(机械性能)”等性能指标类关键词高度共现,反映出该领域研究正向高性能建材开发转型.2017 年以来,“performance(性能)”“mechanical property(机械性能)”等关键词频频次显著增长,如将退役风机叶片中玻璃纤维掺入磷石膏中增强其机械性能^[28-29],进一步突显材料功能化提升的研究趋势.

在资源回收与环境管控方面,“heavy metals(重金属)”“rare earth elements(稀土元素)”“recovery(回收)”“adsorption(吸附)”等关键词集中出现,表明磷石膏的资源化利用与污染治理并重.“heavy metals(重金属)”“adsorption(吸附)”等关键词进一步体现其在固废处置过程中的环境风险控制与修复需求.此外,“soil(土壤)”“natural radioactivity(天然放射性)”“impact(影响)”等关键词拓展了磷石膏在土壤改良、放射性评价与环境影响评估方面的研究^[30],补充了从“源头到环境端”的全链条安全管理框架.

从时间演变来看,2000 年前后研究关键词以“phosphogypsum(磷石膏)”“soil(土壤)”“natural radioactivity(天然放射性)”为主,聚焦于环境风险认知;2003~2012 年间,“cement(水泥)”“hydration(水合)”“lime(石灰)”等关键词频现,标志着磷石膏研究进入材料化利用的快速发展期;2015 年以来,“rare earth elements(稀土元素)”“performance(性能)”“mechanical property(机械性能)”等新兴关键词涌现,标志着研究重心向稀有金属回收与高性能材料制备双向拓展^[31],且研究热点围绕“磷石膏—多种固废

协同利用—材料性能优化—资源回收—环境安全”构建了较为完整的知识体系.

表 2 WOS 数据库中磷石膏领域研究文献的高频关键词
Table 2 High-frequency Keywords in Phosphogypsum Literature from the WOS Database

序号	关键词	出现次数	首次出现年份	中心性
1	phosphogypsum(磷石膏)	945	2000	0.36
2	gypsum(石膏)	356	2003	0.18
3	fly ash(粉煤灰)	356	2002	0.13
4	waste(废料)	258	2014	0.08
5	cement(水泥)	228	2003	0.05
6	heavy metals(重金属)	222	2004	0.08
7	strength(强度)	206	2017	0.05
8	hydration(水合)	196	2003	0.07
9	soil(土壤)	169	2000	0.11
10	behavior(性能)	162	2001	0.04
11	rare earth elements(稀土元素)	158	2015	0.03
12	mechanical property(机械性能)	158	2017	0.02
13	compressive strength(抗压强度)	157	2003	0.08
14	lime(石灰)	151	2003	0.07
15	performance(性能)	148	2017	0.03
16	recovery(回收)	138	2007	0.06
17	water(水)	129	2001	0.06
18	building materials(建筑材料)	121	2005	0.07
19	impact(影响)	120	2010	0.05
20	concrete(混凝土)	115	2012	0.01
21	natural radioactivity(天然放射性)	113	2000	0.03
22	portland cement(硅酸盐水泥)	111	2002	0.03
23	mechanical properties(力学性能)	101	2012	0
24	acid(酸)	96	2009	0.02
25	adsorption(吸附)	95	2001	0.03

(2)CNKI 数据库热点分析 如表 3 所示,CNKI 以磷石膏(811 次)为绝对核心,其中心性高达 1.38,凸显了其枢纽地位.

在材料微观与改性方面,微观结构、凝结时间、改性和软化系数等关键词频繁出现.微观结构研究聚焦于化学过程的水化机理、晶体结构性质以及磷石膏衍生物的理化性质,例如磷石膏中的微量杂质对微观形貌的显著影响;磷石膏基过硫酸盐水泥砂浆在硫酸盐侵蚀环境下的性能表现;改性磷石膏对污水污泥脱水性能的改善;以及通过扫描电镜探究磷石膏改性注浆材料的微观机理^[32-35].

粉煤灰、水泥、胶凝材料和复合材料等关键词揭示了磷石膏与其他工业固废(如粉煤灰、赤泥)协同利用的趋势.例如复合掺入赤泥和磷石膏以提高钢渣在水泥基材料中的利用率;通过聚乙烯醇纤维

与玄武岩纤维混杂增强磷建筑石膏基复合材料^[36-37]。这些研究体现了“多固废协同—性能优化—综合利用”的技术路径。

在化学利用与副产物开发方面,湿法磷酸、碳酸钙、硫酸铵和硫酸钾等关键词的出现,显示国内研究重视磷化工副产物的综合利用与化学加工,通过副产盐、钙化产物等途径实现磷石膏资源化。尽管杂质和重金属等关键词出现频次不高,但与 2019 年以来的研究增长同步,说明环境安全与有害元素控制正成为新兴关注点,如湖南省采用磷石膏修复工业场地铊和砷污染^[38]。

从时间演化来看,2000 年前后国内研究以磷石膏、强度等宏观性能为主,2007~2012 年逐步引入凝结时间、胶凝材料、改性、复合材料等关键词,标志研究重心向材料性能调控与协同固废利用拓展。2019 年以后,微观结构、重金属等新兴关键词出现,显示研究进一步关注微观机制与环境安全。

表 3 CNKI 数据库磷石膏领域文献的高频关键词
Table 3 High-frequency Keywords in Phosphogypsum Literature from the CNKI Database

序号	关键词	出现次数	首次出现年份
1	磷石膏	811	2000
2	力学性能	73	2007
3	抗压强度	57	2010
4	强度	47	2000
5	微观结构	33	2019
6	赤泥	32	2010
7	石膏	29	2004
8	粉煤灰	25	2001
9	水泥	22	2006
10	综合利用	22	2001
11	性能	22	2011
12	胶凝材料	21	2012
13	凝结时间	20	2007
14	改性	20	2002
15	湿法磷酸	18	2008
16	碳酸钙	15	2004
17	硫酸铵	15	2001
18	杂质	15	2011
19	磷矿	14	2008
20	重金属	13	2019
21	硫酸钙	11	2005
22	软化系数	11	2016
23	复合材料	10	2012
24	硫酸钾	9	2001
25	转晶剂	9	2014

3.2.2 专利数据库热点分析 (1)DII 国际热点分析

基于 DII 专利数据库的聚类分析结果,本研究绘制了国际磷石膏技术专利家族的热点分布图(图 4),专题主题划分为“PHOSPHOGYPSUM BUILDING BLOCK(磷石膏砌块)”“PARTITION BOARD(隔墙板)”“SULFIDE(硫化物)”“RARE EARTH METAL(稀土元素)”“INLET PIPE(进气管)”“BOX BODY(箱体)”“SALINE(盐渍土)”等多个板块。

在有价金属回收方面,专利聚类显示出全球对磷石膏中稀土金属的关注。例如,通过“SULFIDE(硫化物)”“RARE EARTH METAL(稀土金属)”,实现固废中有价金属(特别是稀土元素)的富集与提取。部分工艺还结合化学试剂调控与矿物相优化,旨在提升金属回收率并降低环境负荷。如通过淋溶法提取稀土元素以缓解全球稀土短缺问题,以及结晶、沉淀、溶剂萃取等工艺在稀土回收中的应用;另有研究以钨为模型稀土元素,探索稀土磷石膏类似物的合成路径^[39-41]。

在能源回收方面,专利聚类体现了在磷石膏处理及副产物资源化过程节能装备与工艺创新。以“INLET PIPE(进气管)”“BOX BODY(箱体)”为代表的技术板块,涵盖了密闭式换热、水淬工艺与蒸汽回收等系统优化措施,显著提升了能源效率,降低了系统排放与运行能耗。

在材料化利用方面,专利聚类反映了磷石膏在建筑与功能材料领域的持续研发趋势。例如“PHOSPHOGYPSUM BUILDING BLOCK(磷石膏砌块)”“PARTITION BOARD(隔墙板)”等板块,集中体现了对材料力学性能增强、掺量提升、耐久性改善及有害杂质控制等方面的技术探索。在部分细分方向中,通过矿物调控进一步实现了高强度、高稳定性的新型建材的开发^[42-43]。这些技术路线体现了从单一废弃物利用向复合化、高性能材料开发演进的趋势。

国际磷石膏专利布局呈现出以有价金属回收—能源回收—材料化利用”为主线的技术体系,与 WOS 文献中的研究热点高度契合。WOS 中 rare earth elements(稀土元素)recovery(回收)等关键词,与专利布局中 SULFIDE(硫化物)EARTH METAL(碱土金属)等涉及金属回收的技术板块相呼应;“cement(水泥)building materials(建筑材料)strength(强度)”等关键词,对应专利中“PHOSPHOGYPSUM BUILDING BLOCK(磷石膏砌块)”“PARTITION BOARD(隔墙

板)”等材料化利用热点;而“water(水)”“hydration(水合)”“performance(性能)”等关键词,则与能效提升及工艺装备优化类专利(如“INLET PIPE(进水管)”板

块)相关联.这种文献与专利数据的耦合,揭示了磷石膏研究已从单一的废弃物处置向多学科交叉的循环技术体系演进.

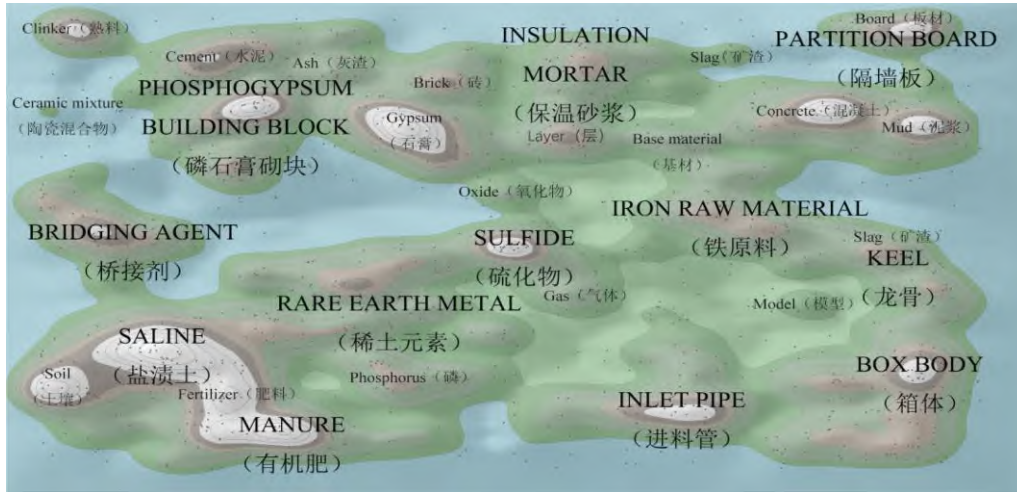


图 4 DII 数据库中全球磷石膏专利技术聚类分析

Fig.4 Cluster Analysis of Global Patents in Phosphogypsum Technology from the DII Database

(2) DII 国内热点分析 国内磷石膏相关专利的关键词聚类结果显示(图 5),其技术创新主要集中在建材、原料及工艺优化、农业以及环境治理等四个方向.

在建材利用方向,聚类关键词主要包括“Strength of the Concrete(混凝土强度)”“Plaster Board(石膏板)”“Beam(梁)”“Mortar(水泥砂浆)”等.相关专利普遍关注在建材上的应用,利用其作为水泥、混凝土及石膏板等材料的原料,以实现大宗消纳

和性能提升^[44-46].

在化工与原料方向,关键词聚类为“Extraction Tank(萃取槽)”“Reverse Flotation(反浮选)”“Phosphoric Acid(磷酸)”“Iron Raw Material(铁原料)”“Sulfide(硫化物)”等板块.研究主要围绕磷石膏中有价元素的提取与利用,例如通过利用反浮选工艺获得高纯度磷酸、提取铁原料,以及提取磷酸钙制备人造骨骼^[47-49].



图 5 DII 数据库中国磷石膏专利技术聚类分析

Fig.5 Cluster Analysis of Chinese Phosphogypsum Patents from the DII Database

在农业利用方向,聚类关键词包括“Manure(肥料)”“Planting(种植)”“Saline Soil(盐渍土)”。研究多集中于将磷石膏作为土壤改良剂或肥料添加剂应用于农业生产,改善盐碱土壤理化性质^[50]。

在环境治理与副产物利用方向,聚类关键词主要有“Compatibilizer(相容剂)”“Liquid Outlet(液体排出口)”“Waste(废弃物)”。相关专利技术侧重于磷石膏废弃物的原位无害化与资源化处置,例如通过相容剂抑制有害成分迁移、改进废液排放工艺,或实现废弃物的减量化与稳定化处理^[51]。

总体而言,国内磷石膏专利呈现“建筑材料—化工与原料—农业利用—环境治理”的发展路径,并逐步形成“规模消纳—高值利用—环境安全”相结合的综合发展格局。这一趋势为推动固废资源化利用与绿色低碳发展提供了重要支撑。

3.2.3 文献数据库和专利数据库的技术对比分析
通过对 WOS 数据库与 CNKI 数据库中磷石膏相关研究的对比分析,可以发现二者在系统性、关键词聚焦、技术路径及时间演化上呈现显著差异。WOS 数据库构建了“磷石膏—固废协同—材料优化—资源回收—环境安全”的系统知识链,体现了较强的跨学科交叉优势;而 CNKI 数据库则集中于材料改性、性能优化和副产物开发的研究,体系性与交叉性稍弱。

关键词上,WOS 数据库长期聚焦“phosphogypsum(磷石膏)”“gypsum(石膏)”“fly ash(粉煤灰)”,强调大宗废物协同利用与环境风险控制,并延伸至稀有金属回收方向;CNKI 则以“磷石膏”为核心,关注凝结时间、改性、复合材料及湿法副产物利用,突出材料微观调控与产业化转化。

技术路径方面,WOS 强调全生命周期,兼顾性能优化、稀有金属回收与环境安全;CNKI 更注重实践导向,聚焦副产物资源利用,但在稀土回收与风险控制等前沿方向不足。时间演化上,WOS 较早进入高性能材料与稀有元素回收方向,CNKI 则在 2019 年后才逐渐转向微观结构与环境问题,存在滞后性。

总体而言,国际研究更突出系统化与前沿性,国内研究更偏应用与产业实践。未来应借鉴国际思路,加强微观机制、稀土回收与环境安全探索,推动磷石膏利用向“高值化—功能化—安全化”转型。

基于 DII 专利数据库对比分析,国际专利热点已形成“有价金属回收—能源回收—材料化利用”的协

同创新体系,涵盖硫化物处理、稀有/稀散金属回收、能源装备优化,以及磷石膏砌块和隔墙板等材料化利用技术。研究通过多学科交叉融合,推动磷石膏高效循环利用,其技术路径正从单一利用向多元化、系统化和高值化方向演进。

相比之下,国内专利主要集中在建材、化工原料、农业和环境治理四个领域,形成了“规模消纳—高值利用—环境安全”的发展格局:在建材领域注重水泥、混凝土及板材应用;化工领域聚焦副产物高值化开发;农业领域服务于肥料生产与盐碱地改良;环境治理领域则强调有害元素控制与减量化处理。

总体而言,国际技术布局趋向“高值化—多元化—绿色低碳”发展,而国内更重视“规模化—产业化—环境安全”。未来我国应在保持建材与农业领域优势的同时,加强稀散金属回收、能源效率提升与装备创新研发,实现与国际趋势接轨,推动磷石膏利用可持续发展。

3.3 前沿态势

3.3.1 WOS 数据库磷石膏领域研究趋势
在 CiteSpace 软件中,利用“Burstness”功能对 WOS 数据库进行了热点词的分析,筛选出 25 个突现值较高的关键词(表 4)。从表中可知,该研究领域的热点可分为以下 4 个阶段:①第一阶段(2000~2012 年),该阶段内突现强度集中在 2004~2018 年,突出强度最高的是“natural radioactivity(天然放射性)”,并持续到 2017 年,表明在该时间段内学者们对其的关注度最高,其次为“amendments(改良)”“ra 226(镭-226)”“soils(土体)”“lime(石灰)”;②第二阶段(2012~2018 年),该阶段突出强度最高的热点词是“radioactivity(放射性)”,其次为“heavy metals(重金属)”“soil(土壤)”“natural radionuclides(天然放射性核素)”“gypsum(石膏)”“calcium sulfate(硫酸钙)”;③第三阶段(2018~2022 年),该阶段内突现强度最高的是“organic matter(有机物)”,其次为“environmental impact(环境影响)”“calcium carbonate(碳酸钙)”“management(管理)”“sorption(吸附)”“steel slag(钢渣)”“organic matter(有机物)”“extraction(提取)”“superphosphate(过磷酸钙)”;④第四阶段(2022~2025 年),在该阶段内热点词依次为“calcium sulfate hemihydrate(半水碳酸钙)”“temperature(温度)”“impurity(杂质)”“mechanical(机制)”“mechanical strength(力学强

度)”“reaction mechanism(反应机理)”。

磷石膏领域的研究热点呈现出明显的阶段性演化

基于 CiteSpace 的关键词聚类时间线图(见图 6),

特征,共形成七个主要聚类主题(#1-#7)。

表 4 WOS 数据库中磷石膏领域研究文献的热点词及突现年份
Table 4 Hotspots and Burst Keywords in Phosphogypsum Literature from the WOS Database

关键词	首次出现年份	突现强度	开始	结束	2000~2025 年
natural radioactivity (天然放射性)	2000	22.82	2004	2017	-----
amendments (改良)	2005	7.05	2005	2011	-----
ra 226 (镭-226)	2006	12.4	2006	2012	-----
soils (土体)	2006	8.39	2006	2011	-----
lime (石灰)	2003	12.18	2009	2012	-----
radioactivity (放射性)	2001	14.52	2012	2018	-----
heavy metals (重金属)	2004	7.43	2012	2015	-----
soil (土壤)	2000	9.67	2013	2017	-----
natural radionuclides (天然放射性核素)	2005	6.92	2014	2015	-----
gypsum (石膏)	2003	6.62	2014	2016	-----
calcium sulfate (硫酸钙)	2013	6.71	2015	2018	-----
environmental impact (环境影响)	2018	8.31	2018	2021	-----
calcium carbonate (碳酸钙)	2015	6.07	2018	2019	-----
management (管理)	2019	8.14	2019	2022	-----
sorption (吸附)	2020	6.51	2020	2021	-----
steel slag (钢渣)	2020	6.32	2020	2021	-----
organic matter (有机物)	2009	8.86	2021	2022	-----
extraction (提取)	2006	6.54	2021	2022	-----
superphosphate (过磷酸钙)	2021	6.18	2021	2022	-----
calcium sulfate hemihydrate (半水硫酸钙)	2021	6.92	2022	2025	-----
temperature (温度)	2019	6.33	2022	2023	-----
impurity (杂质)	2019	5.06	2022	2025	-----
mechanism (机制)	2020	5.59	2023	2025	-----
mechanical strength (力学强度)	2023	5.54	2023	2025	-----
reaction mechanism (反应机理)	2016	5.35	2023	2025	-----

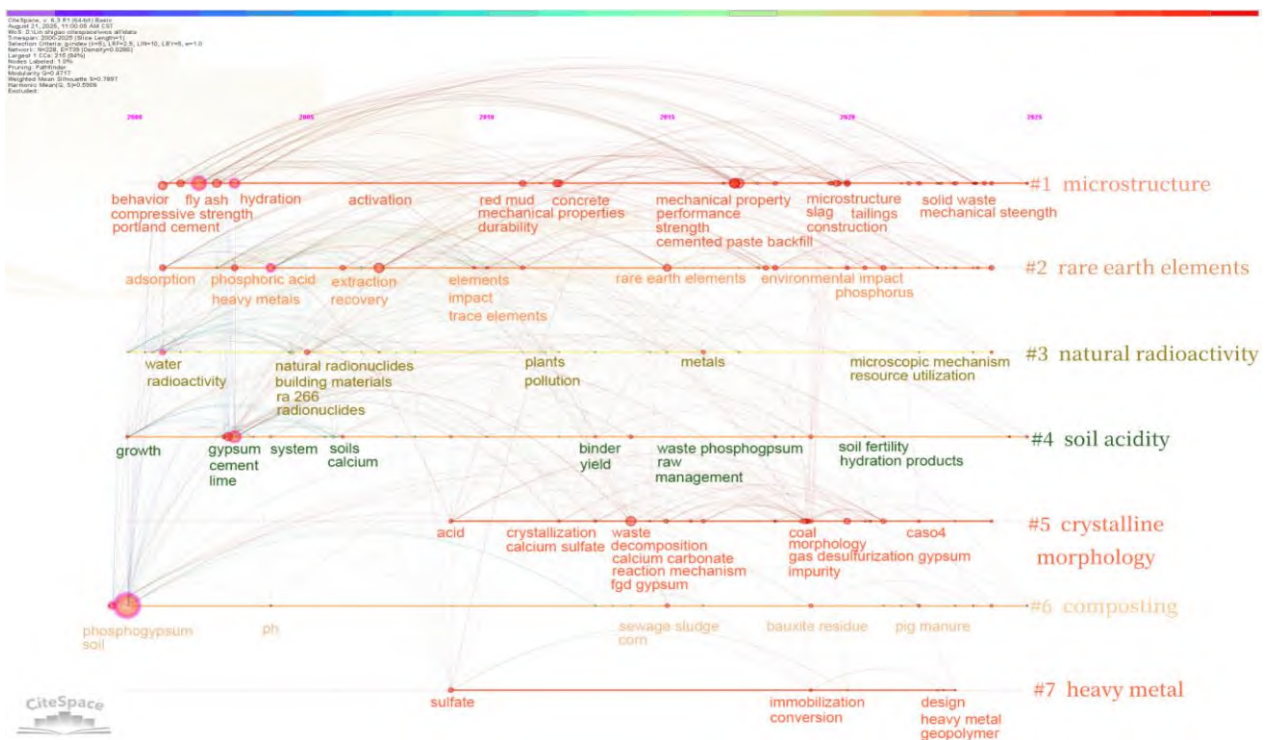


图 6 WOS 数据库中磷石膏领域研究文献关键词时间线

Fig.6 Timeline of Keywords in Phosphogypsum Literature from the WOS Database

#3“Natural radioactivity(天然放射性与风险评估)”是最早出现的研究主题,集中在 2000 年前后.其核心关键词包括“radioactivity(放射性)”“radon(氡)”“gamma-ray spectrometer(伽马射线光谱仪)”“building materials(建材)”,主要关注建材利用、天然放射性及环境风险评估,体现了研究初期对环境安全的基础认知,如在 2000 年,巴西开始对磷石膏中天然放射系核素的活度浓度进行测定,近期英格兰大学预测了磷矿石产量达到下限将威胁粮食安全,反之将加剧放射性废物处置的“磷困境”^[52-53].

2003~2012 年,#4“Soil acidity(土壤酸度)”与#6“Composting(堆肥)”聚类逐渐活跃.关键词包括“soil fertility(土壤肥力)”“lime(石灰)”“fertilizer(肥料)”“soil(土壤)”,这一阶段的研究拓展了磷石膏的农业利用方向.

2010 年以后,#5“Crystal morphology(晶体形貌)”和#1“Microstructure(显微结构)”成为新的研究热点.“alpha-hemihydrate gypsum(α -半水石膏)”“crystal growth(晶体生长)”“calcium sulfate(硫酸钙)”等关键词突出 α 型半水石膏的结晶调控与材料性能优化^[54];后者以“compressive strength(抗压强度)”“mechanical properties(力学性能)”“microstructure(显微结构)”等为核心,强调磷石膏在胶凝材料体系中的力学性能与显微结构研究,这一时期标志着研究重点逐渐由宏观性能转向微观机制与材料功能化^[55-56].

2015 年以后,#2“Rare earth elements(稀土元素)”与#7“Heavy metal(重金属污染治理)”聚类兴起,成为近年来的前沿方向.如萨洛创新了从磷石膏中回收稀土元素的方法,研究关注提取工艺、浸出条件优化、稀土元素的分布状态和形态分析^[57].回收稀土不仅有经济价值,还可以减少资源浪费.但目前该工艺仍具有成分高和过程繁杂的缺点,前景仍面临巨大挑战.相关关键词包括“rare earth elements(稀土元素)”“leaching kinetics(浸出动力学)”“adsorption(吸附)”“graphene oxide(氧化石墨烯)”,反映出国际研究正高度关注磷石膏及相关固废中分散金属与资源回收与重金属环境治理问题.

总体来看,磷石膏研究经历了由早期的环境风险认知(2000 年前后),逐步过渡到农业与建材应用拓展(2003~2012 年),再到微观机制与高性能材料开

发(2010 年后),并最终演化为分散金属回收与环境治理前沿(2015 年至今)的阶段性发展格局.这一时间演进路径充分说明,磷石膏研究热点已由单一废弃物利用逐步向多学科融合和绿色高值化利用转变.

3.3.2 CNKI 数据库磷石膏领域研究趋势 结合 CNKI 数据库关键词实现分析分为 3 个阶段:①第一阶段(2000~2013 年),前五年关键词只有“硫酸钾”,突现强度达到 20.13,之后研究逐渐深入,关键词为“循环经济”“工业废渣”“高硫煤”“墙体材料”“粉煤灰”“硫酸钙”,主要方向为循环利用磷石膏,生产建筑材料与大宗固废协同利用等,体现了对磷石膏利用的初步探索.②第二阶段(2014~2020 年),关键词为“磷矿”“外加剂”“盐碱地”“改性”,研究集中在对磷石膏的资源化利用,通过物理、化学或生物方法改变磷石膏的结构、成分或性能,使其满足特定场景(如建材利用、盐碱地改良)的需求.③第三阶段(2020~2025 年),关键词为“力学性能”“数值模拟”“赤泥”“微观结构”“工业固废”“转晶剂”“路用性能”“浮选”“红黏土”“重金属”“吸附”,研究方向为材料性能与结构调控、多固废协同资源化利用和环境治理与污染控制三大类如中国磷石膏库环境风险监控技术在“十五五”期间,重点推进磷石膏库环境风险“监测—模拟—预警”一体化能力建设,将磷石膏作为胶凝材料、掺合料在水泥、混凝土中的应用^[58-59],并开始关注磷石膏中有害杂质(如氟、重金属)对材料性能和环境影响的作用机制,但根据突现强度显示仍以材料性能研究为主.

由图 7 可知,#1“磷石膏”是最早出现的研究主题,自 2000 年延续至今.该聚类以“磷石膏”“强度”“资源化”等为核心,研究重点集中在磷石膏的综合利用与强度特性.

在 2005~2012 年间,#2“抗压强度”与#3“硫酸铵”成为新的研究热点.前者以“抗压强度”“胶凝材料”“凝结时间”“软化系数”等为核心,主要研究磷石膏基建材的强度发展规律、水化机理与耐久性;后者则围绕“硫酸铵”“石膏肥料”“分解”等关键词展开,强调副产物的化工转化与资源综合利用,这一阶段表明国内研究路径逐渐从单一建材性能研究拓展到副产物高值化利用.

2010~2015 年,#4“杂质”与#5“力学性能”聚类逐

渐活跃,研究主题集中在“杂质控制”“复合材料”“赤泥固化”“粉煤灰”等,说明研究不仅关注建材性能,还开始深入探讨杂质对材料性能和环境安全的影响。同时,“力学性能”主题进一步强化了对复合胶凝体系的研究,强调多固废协同与工程适应性提升。

2015年以后,#6“微观结构”成为新的研究前沿,相关关键词包括“孔结构”“导热系数”“显微机理”“重金属固定化”等,研究重点转向磷石膏材料的微观结构解析与环境行为评价,标志着研究方法逐步由宏观性能测定转向微观机理与耐久性机制分析。

表5 CNKI数据库中磷石膏领域研究文献的热点词及突现年份
Table 5 Hotspots and Burst Keywords in Phosphogypsum Literature from the CNKI Database

关键词	首次出现年份	突现强度	开始	结束	2000~2025年
硫酸钾	2000	20.13	2000	2005	=====
循环经济	2005	20.32	2005	2012	=====
工业废渣	2001	9.29	2008	2010	=====
高硫煤	2009	6.86	2009	2010	=====
墙体材料	2006	7.45	2010	2012	=====
粉煤灰	2001	5.24	2012	2013	=====
硫酸钙	2010	5.1	2012	2013	=====
磷矿	2007	8.31	2014	2018	=====
外加剂	2010	6.16	2015	2016	=====
盐碱地	2010	10.52	2016	2019	=====
改性	2003	7.17	2017	2020	=====
力学性能	2011	31.17	2020	2025	=====
数值模拟	2016	6.46	2020	2025	=====
赤泥	2011	16.29	2021	2025	=====
微观结构	2019	13.19	2021	2025	=====
工业固废	2021	7.96	2021	2025	=====
转晶剂	2016	7.28	2021	2022	=====
路用性能	2022	11.29	2022	2025	=====
浮选	2022	8.1	2022	2025	=====
红黏土	2022	7.81	2022	2025	=====
重金属	2019	7.38	2022	2025	=====
吸附	2015	6.98	2022	2023	=====

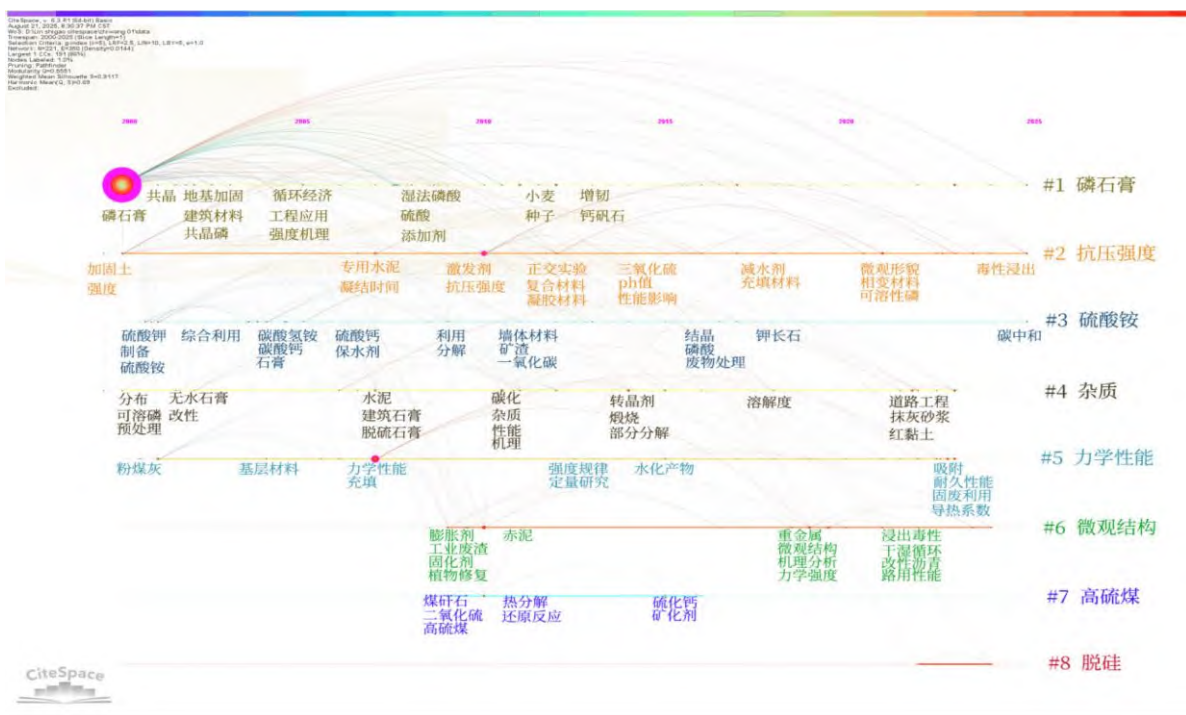


图7 CNKI数据库中磷石膏领域研究文献关键词时间线
Fig.7 Timeline of Keywords in Phosphogypsum Literature from the CNKI Database

同时, #7“高硫煤”与#8“脱硅”聚类在 2018 年以后逐渐兴起, 显示出磷石膏研究与能源利用、环境治理的深度耦合, 前者关注磷石膏与高硫煤等固废的协同处理及还原分解动力学, 强调在污染控制与能源回收中的应用潜力; 后者聚焦“脱硅”“杂质控制”“溶出毒性”等关键词, 突出了对杂质分离与环境风险控制的关注, 这一阶段体现出研究正向绿色低碳、污染治理与高效利用方向加速拓展。

总体而言, 国内磷石膏研究经历了 2000 年前后的资源化与强度研究(#1)→ 2005~2012 年的建材性能优化与副产物化工利用(#2、#3)→ 2010~2015 年的杂质控制与复合材料深化研究(#3、#5)→ 2015 年以来的微观结构机制解析与环境治理拓展(#6、#7、#8)的阶段演进过程, 这一趋势表明国内研究已由宏观性能与初步消纳, 逐步迈向微观机理解析、高值化开发与环境友好型利用的综合发展阶段。

值得注意的是, 我国磷石膏增量巨大且存量庞大. 以贵州省为例^[60], 磷石膏的利用途径及比例如表 6 所示. 矿山充填仍是磷石膏消纳的主要方式, 其次是作为建材产品进行消纳. 然而, 由于当前房地产领域萎缩, 市场难以通过“建材和化工原料”途径实现大规模消纳, 规模化消纳已是目前面临的首要问题. 2025 年 7 月 1 日, 中国首部国家层面磷石膏利用污染控制技术规范—《磷石膏利用和无害化贮存污染控制技术规范(环境 415-2025)》^[1-2]正式实施^[61]. 该规范明确规定, 符合条件的充填、回填和土壤化材料可作为利用途径, 这对规模化消纳具有积极意义. 然而, 相关场景中的环境风险评估, 尚未形成体系. 因此, 未来亟需建立磷石膏充填、回填和土壤化材料过程环境风险评估体系, 这将成为重点研究领域之一.

表 6 贵州省磷石膏各利用途径利用量及其占比

Table 6 Utilization Amount and Proportion of Phosphogypsum in Guizhou Province by Different Pathways

利用途径	利用量(万 t)	利用量占比(%)
综合利用	1125.49	
矿山充填	588.6	52.3
建材产品	284.69	25.29
水泥缓凝剂	175.03	15.55
制硫酸联产水泥	25.44	2.26
肥料调理剂	51.74	4.6

综上所述, 未来 3~9 年国内磷石膏利用领域的研

究趋势将主要集中于: 建材利用方向(如混凝土、石膏板等), 工艺优化方向(浮选、impurity), 重金属防控技术, 稀贵金属资源回收利用方向, 充填、回填和土壤化材料利用过程风险评估体系建立. 另外, 数值模拟等涉及人工智能手段融入也将成为领域重点研究方向.

3.3.3 DII 磷石膏领域研究趋势 近五年(2020~2025 年), 磷石膏利用技术由多元化探索向热点聚焦转型. 利用对数刻度制作柱形图(图 8), “CERAMIC(陶瓷)”“CEMENT(水泥)”“CONCRETE(混凝土)”“MATERIAL(材料)”“PARTICLE(颗粒)”“OXIDE(氧化物)”“COMPOSITE(复合材料)”等建材与材料改性类技术持续攀升, 在 2024 年达到峰值, 显示其已进入快速增长阶段. 在顶尖技术组合中, 建材类技术与“FERTILIZER(肥料)”“SOIL(土壤)”“CROP(作物)”“NITRIFICATION INHIBITOR(硝化抑制剂)”“NUTRIENT(养分)”“AGRICULTURAL(农业)”“GROWING(种植)”等农业利用技术, 以及“CARBON(碳)”“HYDROGEN(氢)”“PARTICLE(粒子)”“GRAPHENE(石墨烯)”“NANOTUBE(纳米管)”“DIOXIDE(二氧化硅)”“SILICON(硅)”等先进材料技术, 凸显出材料工程、农业应用和功能材料开发三大方向的综合支撑作用.

矩形树图分析揭示了当前磷石膏技术研发力量的集中态势. 高占比技术板块集中于建材利用和功能氧化物领域, 这些领域不仅在趋势图中保持高位增长, 其专利积累数量也在整体份额中占据主导地位, 显示出较高的技术成熟度和市场接受度. 中等占比板块涵盖石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料, 以及农业应用和土壤改良等相关技术. 尽管这些方向当前市场渗透率不及传统建材类应用, 但竞争主体相对分散, 技术路径呈现多元化发展, 具有较大的增长潜力. 低占比板块则多分布于环境修复、农业细分应用和交叉学科领域. 这些领域的专利数量相对有限, 技术门槛较低, 可作为进行差异化技术布局的切入点, 以维持技术体系的多样性.

根据专利兴趣百分比的分析视角, 较高的比例通常意味着该技术领域发展相对成熟且竞争可能趋于饱和, 而较低的比例则往往与技术路径的多样性和更高的创新潜力相关联. 因此, 在制定研发投资与战略布局时, 应综合权衡技术的成熟度与未来的创新空间.

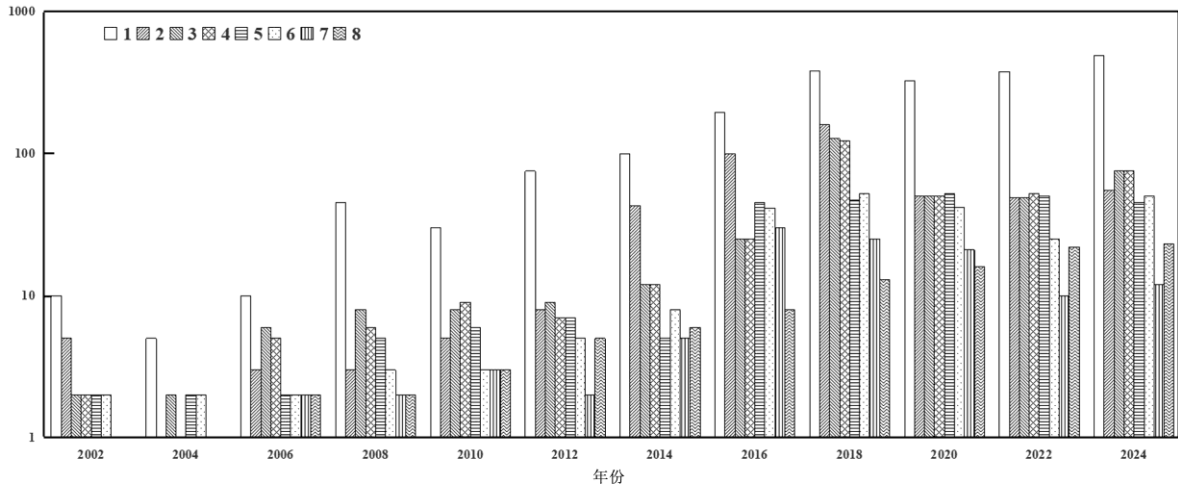


图8 DII数据库中磷石膏技术趋势

Fig.8 Technological trends in phosphogypsum based on the DII database

- 1.CERAMIC(陶瓷), CEMENT(水泥), CONCRETE(混凝土), MATERIAL(材料), PARTICLE(颗粒), OXIDE(氧化物), COMPOSITE(复合材料);
- 2.FERTILIZER(肥料), SOIL(土壤), CROP(农作物), NITRIFICATION INHIBITOR(硝化抑制剂), NUTRIENT(养分), AGRICULTURAL(农业), GROWING(生长);
- 3.CARBON(碳), HYDROGEN(氢), PARTICLE(颗粒), GRAPHENE(石墨烯), NANOTUBE(纳米管), DIOXIDE(二氧化物), SILICON(硅);
- 4.OXIDE(氧化物), PARTICLE(颗粒), MAGNESIUM(镁), ALUMINA(氧化铝), CALCIUM(钙), CERIU(铈), MALUMINUM(铝);
- 5.ORGANIC(有机的), LIGHT EMITTING(发光), COMPOUND(化合物), LAYER(层), ELECTROLUMINESCENT(电致发光), MATERIAL(材料), PARTICLE(颗粒);
- 6.PLANT(植物), CULTIVATION(栽培), GROWING(生长), IRRIGATION(灌溉), CROP(农作物), GROWTH(生长), GREENHOUSE(温室);
- 7.WATER(水), WASTEWATER(废水), FILTER(过滤器), SLUDGE(污泥), MEMBRANE(膜), TANK(罐), WASTE(废物);
- 8.RESIN(树脂), POLYMER(聚合物), RUBBER(橡胶), FILLER(填料), COMPOUND(化合物), FILM(薄膜), AGENT(剂)



图9 DII磷石膏领域当前开发技术

Fig.9 Currently Developing Technologies in Phosphogypsum Based on the DII Database

通过对磷石膏技术趋势图与矩形树图的双重分析,可知磷石膏利用技术正处于“成熟期稳固—成长期加速—探索期潜伏”的三层结构格局.短期(1~3年)应继续巩固成熟建材类技术的产业优势,通过配方优化、成本控制和产业链协同实现大规模商业化;中期(3~5年)应重点投入功能氧化物及高性能材料

等成长期技术,加快从实验室研究向工程化和市场化转化;长期(5年以上)则需前瞻性布局纳米碳复合材料等探索期技术,争取在下一代高性能建材、智能功能材料及绿色环保应用中占据先机.同时,对低占比技术保持持续关注与适度投入,不仅有助于防范市场单一化风险,也为未来的技术迭代和跨领域融

合提供了储备。

4 结语

近 25 年来,全球磷石膏领域文献发文量呈平稳增长态势,中国在文献总量、专利数量及 WOS 中心性方面均居全球首位,美国、西班牙、巴西分别以 406 篇、276 篇、270 篇的 WOS 发文量位列前列。CNKI 与 WOS 数据库的研究热点存在明显差异:CNKI 更聚焦材料性能优化、副产物综合利用与数值模拟,WOS 则侧重环境风险评估与稀有元素高值回收。基于 DII 专利分析显示,国内外磷石膏研究均呈现“金属回收—能源回收—材料化利用”协同发展格局,国际研究偏向稀有金属分离与绿色低碳建材开发,国内已形成覆盖建材、化工、农业与环境治理的完整技术链。整体上,磷石膏相关专利正从单一处置向“规模消纳—高值利用—环境安全”协同的循环体系转变。

未来 3~9 年,磷石膏领域研究将围绕五大方向发展:一是创新低能耗、低成本预处理技术,构建全链条标准体系;二是拓展矿井回填、路基材料、土壤改良等规模化消纳路径,完善全生命周期环境风险评估;三是发展稀散金属高效提取技术,开发石膏基高端建材产品,推动高值化利用;四是开展全生命周期碳足迹核算,推广低温煅烧、固碳矿化等低碳技术;五是加强国际技术合作与多学科交叉融合,通过人工智能、数值模拟等手段实现风险智能预警与工艺优化,提升磷石膏资源化利用与环境安全管控水平。

参考文献:

- [1] Ruiz C C, Macias F, Perez-lopez R, et al. Valorization of wastes from the fertilizer industry: Current status and future trends [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,174:678-690.
- [2] Akfas F, Elghali A, Aboulaich A, et al. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? [J]. *Science of the Total Environment*, 2024,908:168196.
- [3] Wu F H, Chen B J, Qu G F, et al. Harmless treatment technology of phosphogypsum: Directional stabilization of toxic and harmful substances [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,311:114827.
- [4] Wei Z M, Zhen B, Gu K, et al. Study of untreated phosphogypsum as a fine aggregate for magnesium oxysulfate cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2023,365(8):130040.
- [5] Murali G, Azab M. Recent research in utilization of phosphogypsum as building materials: Review [J]. *Journal of Materials Research and*

Technology, 2023,25:960-987.

- [6] 王静云,李丽,张然,等.磷石膏资源化利用研究进展 [J]. *磷肥与复肥*, 2024,39(1):32-35.
Wang J Y, Li L, Zhang R, et al. Research progress on the resource utilization of phosphogypsum [J]. *Phosphate Fertilizer and Compound Fertilizer*, 2024,39(1):32-35.
- [7] 苗成成.磷石膏相组成调控及复合燃煤炉渣胶凝材料制备与性能研究 [D]. 重庆:重庆交通大学, 2025.
Miao C C. Study on the phase composition regulation of phosphogypsum and the preparation and performance of composite coal Slag cementitious Materials [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2025.
- [8] 蒋建亚,张苏花,付旭东,等.磷化工废渣磷石膏的特性及其资源化利用 [J]. *山西建筑*, 2021,47(9):1-4.
Jiang J Y, Zhang S H, Fu X D, et al. Characteristics of phosphate chemical waste residue and phosphogypsum and its resource utilization [J]. *Shanxi Architecture*, 2021,47(9):1-4.
- [9] 纪罗军,赵红林.从循环经济角度看工业副产石膏的资源化利用 [J]. *硫酸工业*, 2021,(9):1-8.
Ji L J, Zhao H L. Resource utilization of industrial by-product gypsum from the perspective of circular economy [J]. *Sulfuric Acid Industry*, 2021,(9):1-8.
- [10] 胡敏.我国磷化工产业发展现状及趋势 [J]. *生态产业科学与磷氟工程*, 2025,40(1):1-7.
Hu M. Development status and trend of phosphorus chemical industry in our country [J]. *Ecological Industry Science and Phosphofluorine Engineering*, 2025,40(1):1-7.
- [11] 姜国庆,刘帅杰,段利中,等.磷石膏无害化处理及其在生态修复中的应用进展 [J]. *云南化工*, 2025,52(4):17-20,30.
Jiang G Q, Liu S J, Duan L Z, et al. Progress in harmless treatment of phosphogypsum and its applications in ecological restoration [J]. *Yunnan Chemical Industry*, 2025,52(4):17-20,30.
- [12] 张厚记,宗伟.工业固废磷石膏在公路路面大修工程的应用研究 [J]. *公路工程*, 2023,48(1):98-101.
Zhang H J, Zong W. Research on the application of industrial solid waste phosphogypsum in highway pavement overhaul projects [J]. *Highway Engineering*, 2023,48(1):98-101.
- [13] 李前均. α -石膏基自流平材料的制备与性能研究 [D]. 贵阳:贵阳大学, 2017.
Li Q J. Preparation and performance of α -gypsum-based self-leveling materials [D]. Guiyang: Guiyang University, 2017.
- [14] 董泽,翟延波,任志威,等.磷石膏建材资源化利用研究进展 [J]. *无机盐工业*, 2021,54(4):5-9.
Dong Z, ZHAI Y B, REN Z W, et al. Research progress on the resource utilization of phosphogypsum building materials [J]. *Inorganic Salt Industry*, 2021,54(4):5-9.
- [15] 袁鹏,谭建红,官洪霞,等.磷石膏中有害杂质对环境影响的监测与评价 [J]. *广东化工*, 2013,40(22):124-125.
Yuan P, Tan J H, Guan H X, et al. Monitoring and evaluation of the environmental impact of harmful impurities in phosphogypsum [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2013,40(22):124-125.
- [16] 陈悦,陈超美,刘则渊,等.CiteSpace 知识图谱的方法论功能 [J]. *科学学研究*, 2015,33(2):242-253.

- Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains [J]. *Studies in Science of Science*, 2015,33(2):242–253.
- [17] Li B, Li H K. The state of metaverse research: a bibliometric visual analysis based on CiteSpace [J]. *Journal of Big Data*, 2004,11(1).
- [18] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *The Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006,57(3): 359–377.
- [19] Tayibi H, Choura M, Lopez F A A, et al. Environmental impact and management of phosphogypsum [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009,90(8):2377–2386.
- [20] 唐向阳,何新建.磷石膏资源化研究现状及展望 [J]. *无机盐工业*, 2025,57(6):18–26.
- Tang X Y, He X J. Research status and prospect of phosphogypsum resource utilization [J]. *Inorganic Salt Industry*, 2025,57(6):18–26.
- [21] Campos M P, Costa L J P, Nisti M B, et al. Phosphogypsum recycling in the building materials industry: assessment of the radon exhalation rate [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017,172:232–236.
- [22] Guerrero J L, Gutierrez-alvarez I. Evaluation of the radioactive pollution in the salt-marshes under a phosphogypsum stack system [J]. *Environmental Pollution*, 2020,258:113729.
- [23] Nayak S, Mishra C S K, Guru B C, et al. Histological anomalies and alterations in enzyme activities of the earthworm *Glyphidrilus tuberosus* exposed to high concentrations of phosphogypsum [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018,190(9).
- [24] Chen Q S, Zhang Q L, Qi C C, et al. Recycling phosphogypsum and construction demolition waste for cemented paste backfill and its environmental impact [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,186: 418–429.
- [25] Cardenas-escudero C, Morales-florez V. Procedure to use phosphogypsum industrial waste for mineral CO₂ sequestration [J]. *Journal Of Hazardous Materials*, 2011,196:431–435.
- [26] Zhang W, Zhang F Z. CO₂ capture and process reinforcement by hydrolysate of phosphogypsum decomposition products [J]. *Journal Of CO₂ Utilization*, 2020,36:253–262.
- [27] 张立,胡修权,张晋,等.工业固废耦合磷石膏制备胶凝材料试验 [J]. *非金属矿*, 2022,45(2):33–37.
- Zhang L, Hu X Q, Zhang J, et al. Experiment on the preparation of cementitious materials by industrial solid waste coupled phosphogypsum [J]. *Nonmetallic Minerals*, 2022,45(2):33–37.
- [28] 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*, 2022,4:1–4.
- Cui R Z, Bai H D, Gao Y F, et al. Current status and '14th five-year plan' development trends of comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. *Inorganic Salt Industry*, 2022,4:1–4.
- [29] 许晨曦.掺入废旧玻璃纤维的环保型建筑石膏复合材料的制备与性能研究 [D]. 安徽:安徽建筑大学, 2025.
- Xu C X. Preparation and performance of environmentally friendly building gypsum composites mixed with waste glass fiber [D]. Anhui: Anhui Jianzhu University, 2025.
- [30] 何敏杰,张婷,瞿广飞,等.磷石膏渣场中有害杂质的赋存形态分布规律及浸出特性 [J]. *中国环境监测*, 2024,40(6):133–142.
- He M J, Zhang T, Qu G F, et al. Occurrence morphology and leaching characteristics of harmful impurities in phosphogypsum slag field [J]. *China Environmental Monitoring*, 2024,40(6):133–142.
- [31] Lambert A, Anawati J, Walawalkar M, et al. Innovative application of microwave treatment for recovering of rare earth elements from phosphogypsum [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(12).
- [32] Gijbels K, Nguyen H, Kinnunen P, et al. Feasibility of incorporating phosphogypsum in ettringite-based binder from ladle slag [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,237:117793.
- [33] Pinto S R, Luz C A. Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020,136: 106172.
- [34] 刘淑婕,胡明月,罗本福,等.磷石膏掺杂改性水泥对酸性矿山废水中铅的去除 [J]. *中国环境科学*, 2025,45(6):3118–3127.
- Liu Shujie, Hu Mingyue, Luo Benfu, et al. Removal of lead from acidic mine wastewater using phosphogypsum-doped modified cement [J]. *China Environmental Science*, 2025,45(6):3118–3127.
- [35] 叶坤,张群利.磷石膏改性注浆材料性能及微观机理研究 [J]. *矿冶工程*, 2025,45(3):52–56.
- Ye K, Zhang Q L. Research on the properties and microscopic mechanism of phosphogypsum modified grouting materials [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(3):52–56.
- [36] 张健,容北国,胡成,等.赤泥和磷石膏复掺对钢渣-水泥基复合胶砂的影响研究 [J]. *混凝土*, 2025(5):147–149,156.
- Zhang J, Rong B G, Hu C, et al. Effect of red mud and phosphogypsum compounding on steel slag-cement-based composite cement [J]. *Concrete*, 2025,(5):147–149,156.
- [37] 张粉春,陶忠,沈成行,等.混杂纤维对磷石膏基复合材料性能的影响 [J]. *材料导报*, 2025.
- Zhang F C, Tao Z, Shen C X, et al. Effect of mixed fibers on the properties of phosphogypsum matrix composites [J]. *Materials Review*, 2025.
- [38] 阎丽,范翹,陈冬素.工业场地铊、砷污染土壤修复技术研究 [J]. *中国锰业*, 2024,42(3):108–112.
- Yan L, Fan Q, Chen D S. Research on the remediation technology of thallium and arsenic contaminated industrial site soil [J]. *China Manganese Industry*, 2024,42(3):108–112.
- [39] Emsbo P, Mclaughlin P, Breit, et al. Rare elements in sedimentary phosphate deposits: Solution to the global REE crisis? [J]. *Gondwana Reserch*, 2015,27(2):776–785.
- [40] Wu S, Wang L, Zhao L, et al. Recovery of rare earth elements from phosphate rock by hydrometallurgical processes—a critical review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018,335:774–800.
- [41] Shivaramaiah R, Lee W, Navrotsky A, et al. Location and stability of europium in calcium sulfate and its relevance to rare earth recovery from phosphogypsum waste [J]. *American Mineralogist*, 2016,101(8): 1854–1861.
- [42] 黄迪,宗世荣.磷石膏资源化利用技术研究及应用进展 [J]. *磷肥与复肥*, 2023,38(5):17–22.
- Huang D, Zong S R. Research and application progress of phosphogypsum resource utilization technology [J]. *Phosphate*

- Fertilizer and Compound Fertilizer. 2023,38(5):17-22.
- [43] 唐志华,呼和涛力,郭华芳,等.宁夏工业固废处置与资源化利用战略研究 [J]. 中国煤炭, 2021,47(6):40-52.
- Tang Z H, Huhe T L, Guo H F, et al. Research on the strategic research on industrial solid waste disposal and resource utilization in ningxia [J]. China Coal, 2021,47(6):40-52.
- [44] 余 苏,李建锡,马丽萍,等.磷石膏分解特性对磷石膏制硫酸联产水泥新工艺的影响研究 [J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2010,35(4): 80-84.
- Yu S, Li J X, Ma L P, et al. Study on the effect of phosphogypsum decomposition characteristics on the new process of producing cement and sulfuric acid co-production from phosphogypsum [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Engineering Edition), 2010,35(4):80-84.
- [45] 胡小梅,郑俊林,刘茂欣,等.磷石膏基混凝土材料耐久性能演化规律与机制研究 [J]. 混凝土, 2025(7):126-133,139.
- Hu X M, Zheng J L, Liu M X, et al. Study on the evolution law and mechanism of durability performance of phosphogypsum-based concrete materials [J]. Concrete, 2025,(7):126-133,139.
- [46] 刘林程,左海滨,许志强.工业石膏的资源化利用途径与展望 [J]. 无机盐工业, 2021,53(10):1-9.
- Liu L C, Zuo H B, Xu Z Q. Pathways and prospects for the resource utilization of industrial gypsum [J]. Inorganic Salt Industry. 2021,53 (10):1-9.
- [47] 张 昱,管青军,周富佳,等.磷石膏中磷的存在形态及转化释放特征研究 [J]. 非金属矿, 2024,48(1):6-9,13.
- Zhang Y, Guan Q J, Zhou F J, et al. Study on the existence morphology and transformation and release characteristics of phosphorus in phosphogypsum [J]. Nonmetallic Minerals, 2024,48(1): 6-9,13.
- [48] 史皓东,曾彦琦,任浏祎,等.磷石膏共反浮选脱色提质工艺及机理研究 [J]. 非金属矿, 2024,47(2):97-102.
- Shi H D, Zeng Y Q, Ren L W. Research on the decolorization and quality improvement process and mechanism of phosphogypsum co-reverse flotation [J]. Non-metallic Minerals, 2024,47(2):97-102.
- [49] 夏 韬,吴丰辉.利用磷石膏制备双相磷酸钙作为人造骨的应用前景 [J]. 有色金属, 2025,(4):1-7.
- Xia T, Wu F H. Application prospect of biphasic calcium phosphate as artificial bone using phosphogypsum [J]. Nonferrous metals, 2025(4): 1-7.
- [50] 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. Research progress on harmless modification of phosphogypsum and its application in farmland soil improvement [J]. Soil, 2023,55(4):699-707.
- [51] Chen E Z, Chen X T, Tu C Z, et al. Application of phosphogypsum as solid waste in poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite [J]. Polymer Engineering And Science, 2025,65(5):2222-2235.
- [52] Li B, Shu J C. An innovative method for simultaneous stabilization/solidification of PO_4^{3-} and F^- from phosphogypsum using phosphorus ore flotation tailings [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,(235): 308-316.
- [53] Liu S H, Fang P P. Application of lime neutralised phosphogypsum in supersulfated cement [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,272.
- [54] Masmoudi-soussi A, Hammas-nasrii I, Horchani-naifer K, et al. Rare earths recovery by fractional precipitation from a sulfuric leach liquor obtained after phosphogypsum processing [J]. Hydrometallurgy, 2020, 191:105253.
- [55] Mazzilli B, Palmiro V, Saueia C, et al. Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2000,49(1):113-122.
- [56] Wiley N, Timbs P. Radioactivity in future phosphogypsum: New predictions based on estimates of 'Peak P' and rock phosphate resources [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2022,244: 106828.
- [57] 褚寿晶,张 妍,张秋红,等. α 型高强度石膏疏水改性及复合材料的应用 [J]. 复合材料学报, 2025.
- Zhu S J, Zhang Y, Zhang Q H, et al. Application of hydrophobic modification of α -Type high strength gypsum and its composites [J]. Journal of Composite Materials, 2025.
- [58] 高丹丹,孟睿君,秦春丽,等.过硫磷石膏固废混凝土的力学性能和碳化性能研究 [J]. 无机化工, 2025,56(8):1-9.
- Gao D D, Meng R J, Qin C L, et al. Research on mechanical properties and carbonization properties of perthiogyypsum solid waste concrete [J]. Inorganic Chemical Industry, 2025,56(8):1-9.
- [59] 刘丽娟,马晓娟,杨 凡,等.磷石膏在超硫酸盐水泥中的应用研究 [J]. 水泥, 2025,(7):6-9.
- Liu L J, Ma X J, Yang F, et al. Research on the application of phosphogypsum in supersulfate cement [J]. Cement, 2025,(7):6-9.
- [60] 杜 赟,邹 璐,朱 红.贵州省磷石膏综合利用现状 [J]. 生态产业科学与磷氟工业, 2025,40(6):94-101.
- Du Y, Zou L, Zhu H. Current status of comprehensive utilization of phosphogypsum in Guizhou province [J]. Ecological Industry Science and Phosphate & Fluorine Industry, 2025,40(6):94-101.
- [61] HJ 1415—2025 固体废物污染控制类生态环境标准 [S].
- HJ 1415—2025 Standards for the control of solid waste pollution in ecological environment [S].

致谢：感谢中南大学刘宁教授和毛永杰老师在文章修改过程中提出的关键意见和建议。

作者简介：石泽雨(2000-),男,河北保定人,硕士,主要从事地质工程研究. Shizeyu0919@163.com.