



# 环境科学研究

Research of Environmental Sciences

## 我国磷石膏污染特性、利用及环境管理研究

白春华 王金宝 李光辉 刘玉强 徐亚 钱璨 林氏松 龙杰 姚光远

### Research on the Pollution Characteristics, Utilization and Environmental Management of Phosphogypsum in China

BAI Chunhua, WANG Jinbao, LI Guanghui, LIU Yuqiang, XU Ya, QIAN Can, LIN Minsong, LONG Jie, YAO Guangyuan

在线阅读 View online: <https://www.hjkxyj.org.cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.12.10>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 长江经济带“三磷”行业环境管理现状及对策建议

Status and Countermeasures of Environmental Management of the 'Three Phosphorus' Industry in the Yangtze River Economic Belt  
环境科学研究. 2020, 33(5): 1233-1240. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.03.28>

#### 国内外新污染物环境管理政策分析与建议

Analysis and Suggestions of Environmental Management Policies of New Pollutants at Home and Abroad  
环境科学研究. 2022, 35(2): 443-451. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.17>

#### 近10年来我国污染场地再利用的案例分析与环境管理意义

Case Analysis and Environmental Management Significance of Contaminated Site Reuse in China from 2011 to 2021  
环境科学研究. 2022, 35(5): 1110-1119. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2022.02.03>

#### 长江流域上游地区“三磷”污染现状及对策研究

Pollution Status and Control Strategy of 'Three Phosphorus' Pollution in the Upper Reaches of Yangtze River Basin, China  
环境科学研究. 2020, 33(10): 2283-2289. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.05.01>

#### 黄河流域煤矿矿井水综合利用问题分析及管控建议

Status Analysis and Control Suggestions on Comprehensive Utilization of Mine Water in the Yellow River Basin  
环境科学研究. 2024, 37(1): 122-130. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.11.20>

#### 《欧盟水框架指令》下的地表水环境管理体系及其对我国的启示

Surface Water Environment Management System in EU Water Framework Directive and Its Enlightenment to China  
环境科学研究. 2021, 34(5): 1267-1276. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.12.18>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

# 我国磷石膏污染特性、利用及环境管理研究

白春华<sup>1,3</sup>, 王金宝<sup>1,2,3</sup>, 李光辉<sup>1,3</sup>, 刘玉强<sup>2</sup>, 徐亚<sup>2</sup>, 钱璨<sup>2</sup>,  
林民松<sup>2</sup>, 龙杰<sup>2</sup>, 姚光远<sup>2\*</sup>

1. 内蒙古科技大学矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010
2. 中国环境科学研究院, 环境基准标准与风险管控全国重点实验室, 固体废物污染控制技术研究所, 北京 100012
3. 内蒙古自治区矿业工程重点实验室, 内蒙古 包头 014010

**摘要:** 我国磷石膏产生区域高度集中, 主要分布在长江流域, 特别是湖北、云南和贵州三省, 这些地区既是磷矿资源富集区, 也是磷化工产业聚集地。磷石膏的特征污染物为氟化物和总磷, 其利用处置对于长江经济带高质量发展具有至关重要的作用。本文梳理了我国磷石膏产生利用与污染现状, 并着重阐述湖北、云南和贵州三省磷石膏污染特性、利用和管理现状, 提出了针对性建议。总体上, 2015 年以来, 我国磷石膏年产量基本稳定在  $7.5 \times 10^4$  t, 主要利用途径为水泥缓凝剂、石膏建材和矿井充填及修复, 且利用率逐年稳步上升。同时国家及地方层面磷石膏利用政策逐步明确了磷石膏规模化消纳途径。湖北省水运交通便利, 磷石膏主要用于水泥缓凝剂和石膏建材, 在 2022 年利用率分别为 39.6% 和 38.7%; 而云南省和贵州省位于西南部山区, 磷石膏综合利用主要聚焦于矿井充填及修复领域, 在 2022 年其利用率均超过 50%。但行业发展仍面临较多问题, 包括磷石膏相关污染控制技术规范缺乏, 阻碍其多元化利用; 磷石膏综合利用产品竞争力偏弱, 限制其综合利用率提升; 同时, 磷石膏存量长期高位增长与磷石膏库服役年限日益逼近, 限制行业的可持续发展。基于此, 提出以下建议: 健全磷石膏利用处置制度体系, 促进磷石膏多元化利用; 加强磷石膏利用支持政策, 扶持磷石膏综合利用产品; 推动磷石膏无害化处理, 建立磷石膏资源暂存场。

**关键词:** 磷石膏; 污染特性; 综合利用; 环境管理

中图分类号: X705

文章编号: 1001-6929(2025)03-0632-10

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.12.10

## Research on the Pollution Characteristics, Utilization and Environmental Management of Phosphogypsum in China

BAI Chunhua<sup>1,3</sup>, WANG Jinbao<sup>1,2,3</sup>, LI Guanghui<sup>1,3</sup>, LIU Yuqiang<sup>2</sup>, XU Ya<sup>2</sup>, QIAN Can<sup>2</sup>, LIN Minsong<sup>2</sup>,  
LONG Jie<sup>2</sup>, YAO Guangyuan<sup>2\*</sup>

1. College of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China
2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Research Institute of Solid Waste Management, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China
3. Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou 014010, China

**Abstract:** Phosphogypsum production in China is highly concentrated in the Yangtze River Basin, primarily in Hubei, Yunnan, and Guizhou provinces, which are rich in phosphate ore resources and serve as central hubs for the phosphorus chemical industry. The main pollutants in phosphogypsum include fluoride and total phosphorus, making its management and utilization crucial to the high-quality development of the Yangtze River Economic Belt. This paper offers a comprehensive overview of the current status of phosphogypsum production, utilization, and associated pollution in China, with a particular focus on the pollution characteristics, utilization practices, and management status in Yunnan, Guizhou, and Hubei provinces. Based on these analyses, targeted recommendations are proposed. Overall, since 2015, China's annual production of phosphogypsum remains steady at approximately 75 million tons. The primary utilization pathways of phosphogypsum in China include cement retardants, gypsum-based building materials, and mine backfilling and remediation, with the utilization rate steadily increasing each year. Meanwhile, national and local policies have progressively clarified the large-scale

收稿日期: 2024-07-16 修订日期: 2024-12-11

作者简介: 白春华(1978-), 女(蒙古族), 内蒙古赤峰人, 副教授, 博士, 主要从事矿物的分选提纯及非金属矿物材料的研究, [baichunhua1978@163.com](mailto:baichunhua1978@163.com)

\* 责任作者: 姚光远(1990-), 男, 河南长葛人, 副研究员, 博士, 主要从事固体废物的资源化利用、填埋处置及环境风险控制研究, [yaogy@cras.org.cn](mailto:yaogy@cras.org.cn)

基金项目: 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究项目 (No.2022YRUC010303)

Supported by Research Program for Ecological Conservation and High-Quality Development of the Yellow River Basin, China (No.2022YRUC010303)

consumption routes for phosphogypsum. In Hubei Province, where water transportation is convenient, phosphogypsum is predominately utilized as cement set retarders and gypsum-based building materials, with utilization rates of 39.6% and 38.7%, respectively in 2022. In contrast, Yunnan and Guizhou provinces, located in the mountainous southwestern region, focus on the comprehensive utilization of phosphogypsum for mine backfilling and reclamation, with utilization rates exceeding 50% in both provinces in 2022. However, the industry still faces multiple challenges. The lack of technical standards for pollution control hinders the diversification of phosphogypsum utilization. The weak market competitiveness of phosphogypsum products limits further increases in the utilization rates. Furthermore, the long-term high accumulation of phosphogypsum and the nearing end of service life for phosphogypsum warehouse pose significant constraints on the sustainable development of the industry. In response, the following recommendations are proposed: improving the institutional system for phosphogypsum utilization and disposal to promote diversified uses; enhancing supportive policies for phosphogypsum utilization to foster the competitiveness of related products; advancing the harmless disposal of phosphogypsum and establishing temporary storage sites for phosphogypsum resources.

**Keywords:** phosphogypsum; pollution characteristics; comprehensive utilization; environmental management

我国是拥有超过 14 亿人口的农业大国,磷肥是支撑国家农业发展、保障粮食安全的重要基础。磷石膏作为湿法磷酸浸出过程的工业副产物,其主要成分为二水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),通常生产 1 t 磷酸副产 4.5~5.5 t 磷石膏<sup>[1-2]</sup>。目前我国磷石膏堆存量已超过  $7 \times 10^8$  t,每年新增约  $8\,000 \times 10^4$  t,且主要集中在长江流域<sup>[3-4]</sup>。其中,湖北省、云南省和贵州省的磷石膏产量占全国总产量的 70% 以上。磷石膏属于第 II 类一般工业固体废物,产生的渗滤液具有强酸性、总磷和氟化物浓度高以及重金属种类多等特点<sup>[5-8]</sup>。大量堆存的磷石膏不仅占用土地资源,也会造成水体重金属和氟化物污染、水体富营养化、大气污染等环境问题,严重威胁人类健康和生命安全<sup>[9-14]</sup>。例如,“三磷”整治调查中发现,长江沿线 97 个磷石膏库中有 53.61% 存在生态环境问题,环境风险突出<sup>[15-17]</sup>。

2017 年,原环境保护部、国家发展和改革委员会以及财政部联合印发的《长江经济带生态环境保护规划》(环规财〔2017〕88 号)提出要综合控制磷污染源。2019 年,生态环境部印发了《长江“三磷”专项排查整治行动实施方案》,指导湖北、四川、贵州、云南、湖南、重庆、江苏等 7 省(市)开展涉磷企业集中排查整治工作,消除部分涉磷企业造成的突出水环境隐患。2021 年,生态环境部印发了《加强长江经济带尾矿库污染防治实施方案》(环办固体〔2021〕4 号),进一步巩固长江经济带尾矿库污染治理成效,全面提升长江经济带尾矿库污染治理能力。2022 年,生态环境部等 17 部门联合印发的《深入打好长江保护修复攻坚战行动方案》(环水体〔2022〕55 号)提出,推动磷矿、磷化工企业稳定达标排放,加强磷石膏综合利用。

本文通过分析我国磷石膏产生、利用和污染现状,重点聚焦云南省、贵州省和湖北省磷石膏污染特

性、综合利用现状以及相关政策情况的差异化情况,提出我国磷石膏环境管理的对策建议,为我国磷石膏综合利用难题提供参考。

## 1 磷石膏产生现状与污染特性分析

### 1.1 产生现状

2015—2022 年我国磷石膏年产量基本稳定在  $7\,500 \times 10^4$  t,磷石膏的综合利用率逐年上升,由 2015 年的 33% 升至 2022 年的 51%(见图 1)。我国磷矿资源主要集中在长江流域,湖北省、云南省和贵州省又是我国最重要的磷矿资源地和磷化工聚集区<sup>[18-20]</sup>。由图 2 可见,2018—2021 年,湖北省、云南省和贵州省磷石膏的综合利用率分别由 30.67%、24.36% 和 54.56% 升至 44.58%、26.46% 和 105.58%,贵州省磷石膏综合利用率已在 2020 年和 2021 年连续突破 100%。

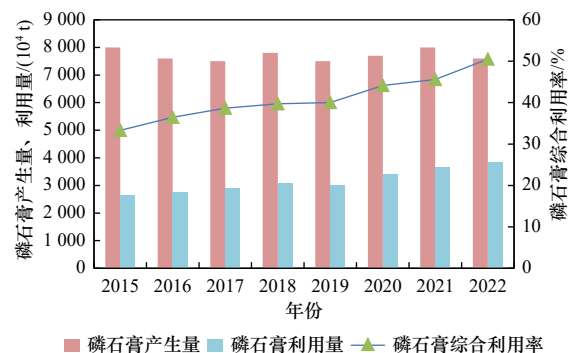


图 1 2015—2022 年我国磷石膏产排量及综合利用率情况

Fig.1 Phosphogypsum production and discharge and comprehensive utilization rate in China during 2015-2022

### 1.2 污染特性及环境风险

磷石膏是湿法磷酸生产过程中磷矿与硫酸反应产生的副产物,其主要成分为二水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,质量分数为 75%~95%),含水率为 20%~25%,pH 在

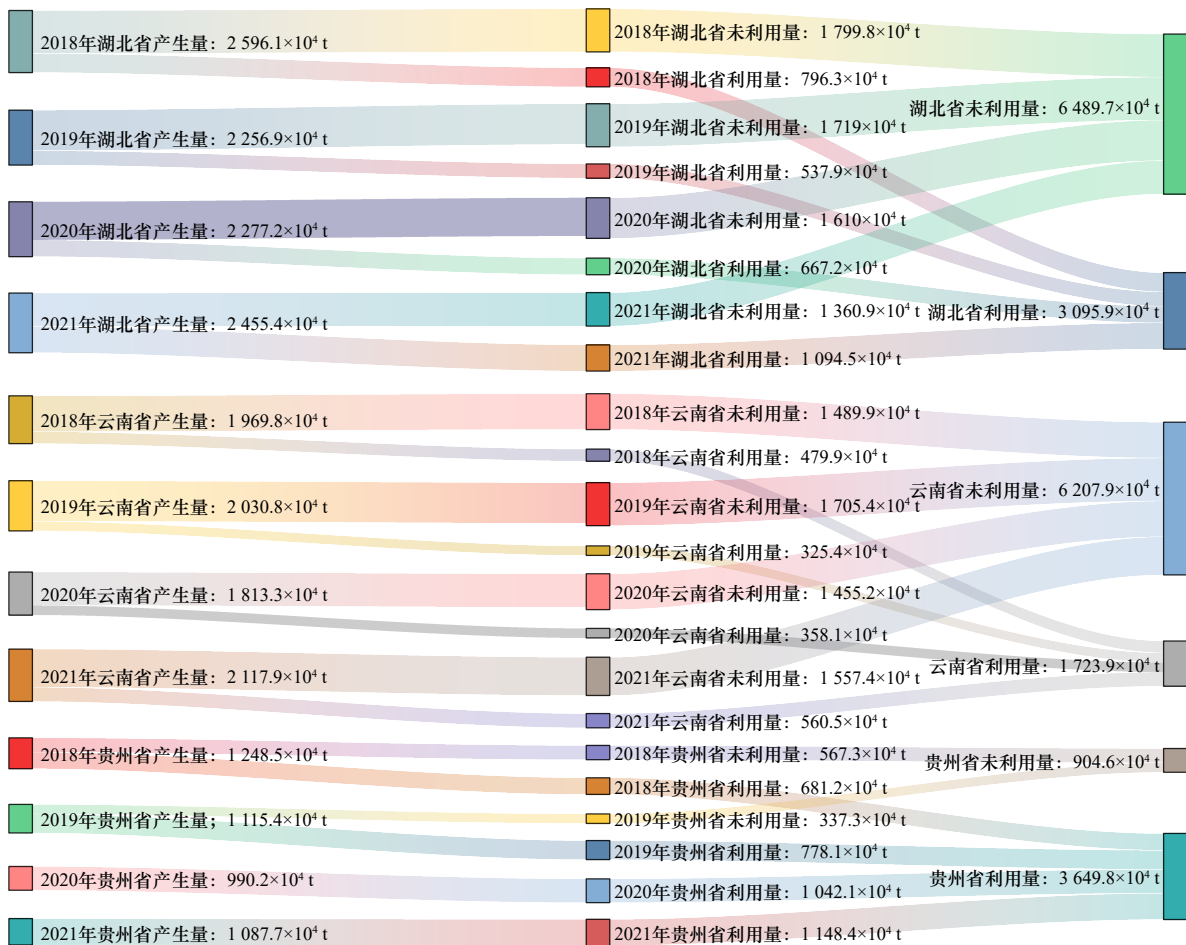


图2 2018—2021年湖北省、云南省及贵州省磷石膏产排量及综合利用情况

Fig.2 Phosphogypsum production and discharge and comprehensive utilization in Hubei, Yunnan and Guizhou provinces during 2018-2021

1.9~5.3 之间,此外还含有少量磷、氟、有机物及重金属等杂质,个别还含有放射性物质<sup>[21-24]</sup>。当磷矿来源发生改变时,磷石膏化学组成存在一定差异。湖北省、云南省和贵州省磷石膏化学组成汇总如表1所示,其中,湖北省和云南省生产的磷石膏中 SiO<sub>2</sub> 含量较高,而贵州省生产的磷石膏中 SiO<sub>2</sub> 含量普遍较低, SiO<sub>2</sub> 含量最高仅有 5.18%;云南省生产的磷石膏中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较低,最低仅有 0.08%;云南省生产的磷石膏中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量极低,其含量最高仅为 0.81%;湖北省生产的磷石膏中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 F 含量普遍较高;云南省生产的磷石膏杂质含量较低。不同地区产生磷石膏中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 F 含量不同与其生产工艺有关,因此磷石膏进行无害化处理时应根据生产工艺区别对待。

磷石膏物理化学组成的区域性差异会直接影响其污染特性。对湖北省、云南省和贵州省分别选取 2~3 个磷石膏龙头企业的样品进行采样并检测,其磷石膏浸出数据汇总如表2所示。按照 HJ 557—2010《固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法》制备浸出

液的 pH、氟化物和总磷均超过 GB 8978—1996《污水综合排放标准》中规定的最高允许排放浓度限值(第二类污染物最高允许排放浓度按照一级标准执行),尤其是湖北省,由于其磷石膏中的氟和总磷含量较高,浸出液中这些污染物浓度也显著高于其他省份。

由磷石膏化学组成和污染特性分析可知,磷石膏主要特征污染物为氟化物和总磷,此外还含有重金属离子<sup>[37-42]</sup>。污染物的迁移特性对于污染扩散影响显著,磷石膏中氟化物主要以 F<sup>-</sup>、CaF<sub>2</sub>、SiF<sub>6</sub><sup>2-</sup>、NaAlF<sub>6</sub>、CaSiF<sub>6</sub> 形式存在,其中以 F<sup>-</sup>、SiF<sub>6</sub><sup>2-</sup> 和 NaAlF<sub>6</sub> 形式存在的氟化物易于在地下水和土壤中迁移。此外,磷石膏中的氟化物可直接在土壤中累积和淋溶迁移进入地下水,淋溶越强,迁移作用越明显,人体通过饮水或食物摄入过量的氟会导致氟中毒。总磷主要以可溶性 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>、HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>,难溶性 Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>,共晶磷 CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O、CaHPO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O,以及磷酸络合物形式存在,其中可溶性 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>、

表1 湖北省、云南省、贵州省磷石膏化学组成

Table 1 Chemical composition of phosphogypsum in Hubei, Yunnan and Guizhou provinces

样品来源	含量/%							
	CaO	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	
湖北省 <sup>[25-29]</sup>	样品1	29.36	38.02	15.60	0.93	0.38	0.47	0.76
	样品2	37.69	47.80	9.21	1.08	0.58	1.62	0.41
	样品3	36.52	40.83	2.13	5.25	1.05	5.02	0.52
	样品4	31.56	35.04	7.25	1.88	0.48	1.23	0.72
	样品5	45.30	40.82	9.51	1.01	0.90	0.80	0.70
	平均值	36.09	40.50	8.74	2.03	0.68	1.83	0.62
云南省 <sup>[30-32]</sup>	样品1	25.80	35.17	11.74	0.35	0.15	0.08	0.16
	样品2	35.10	48.71	13.13	1.13	0.18	0.81	0.33
	样品3	29.36	39.36	9.45	1.71	0.08	0.13	0.26
	样品4	25.80	35.17	12.92	0.95	0.15	0.08	0.19
	平均值	29.02	39.61	11.81	1.04	0.14	0.28	0.24
贵州省 <sup>[33-36]</sup>	样品1	28.98	41.36	3.08	2.45	3.15	0.45	0.36
	样品2	29.23	39.75	4.26	0.83	1.43	2.95	0.44
	样品3	33.20	30.88	4.28	0.82	0.70	0	0.39
	样品4	34.52	47.30	3.21	1.10	0.31	1.09	0.20
	样品5	29.60	30.21	5.18	0.08	0.20	0.13	0.29
	平均值	31.11	37.90	4.00	1.06	1.16	0.92	0.34

表2 湖北省、云南省、贵州省磷肥企业磷石膏浸出毒性结果

Table 2 Phosphorus fertilizer enterprises phosphogypsum leaching toxicity results in Hubei, Yunnan and Guizhou provinces

样品来源	浸出毒性/(mg/L)													
	pH	铜	铅	锌	铬	镉	铍	镍	砷	汞	六价铬	氨氮	总磷	氟化物
湖北省A		0.040	0.050	0.150		—		—	0.019	—	—	19.40	209.0	570.0
湖北省B	2.71	0.160	0.150	0.330	0.030	—	—	0.030	0.054	—	—	4.53	283.0	779.0
云南省A		0.027	0.259	0.467	0.006	0.008	0.066	0.082	—	0.003	0.006	11.51	213.5	85.8
云南省B		0.029	0.278	0.486	0.006	0.008	0.066	0.078	—	0.004	0.006	11.52	212.7	85.6
云南省C		0.027	0.259	0.467	0.006	0.008	0.066	0.082	—	0.003	0.006	11.51	213.5	86.0
贵州省A	2.74	0.140	—	0.020	0.020	—	—	0.030	0.140	0.080	0.016	1.13	145.0	85.2
贵州省B	2.57	1.020	—	0.010	—	—	—	—	0.290	0.240	—	0.67	35.6	48.9
贵州省C	3.26	0.010	0.003	0.008	0.003	—	—	—	0.006	—	0.007	5.24	152.0	113.0
GB 8978—1996 一级标准	6~9	0.5	1.0	2.0	1.5	0.1	0.005	1.0	0.5	0.05	0.5	15	0.5	10

HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>易于在地下水和土壤中迁移,因总磷为营养元素会在迁移转化过程中被植物吸收,但是在封闭或半封闭的湖泊、河湾地区,磷元素含量的飙升会让水体富营养化,导致水藻类植物快速生长、水体含氧量急剧下降,鱼类贝类等水族动物因缺氧死亡<sup>[43-44]</sup>。此外,湖北省、云南省和贵州省三省由于地质条件和气候差异,污染物的迁移路径和扩散速度也有所不同。例如,贵州省和云南省由于喀斯特地貌和山地发育,污染物易通过岩溶通道或通过地表径流方式快速迁移至周围水体中。因此,磷石膏在堆存过程中应采取有效的防渗措施防止渗漏事件

的发生,利用过程中应对其中的污染物进行固化稳定化处理,降低其中污染物的释放,确保环境风险可控。

## 2 磷石膏综合利用现状及政策分析

### 2.1 磷石膏综合利用现状分析

2015—2022年我国磷石膏主要综合利用情况(见图3)显示,我国磷石膏综合利用主要途径为水泥缓凝剂、石膏建材以及矿井充填及修复领域,其综合利用量分别为1180×10<sup>4</sup>、955×10<sup>4</sup>和900×10<sup>4</sup>t,其占比分别为30.6%、24.8%和23.4%(以2022年为例)<sup>[45-47]</sup>。目前水泥缓凝剂和石膏建材对磷石膏综合

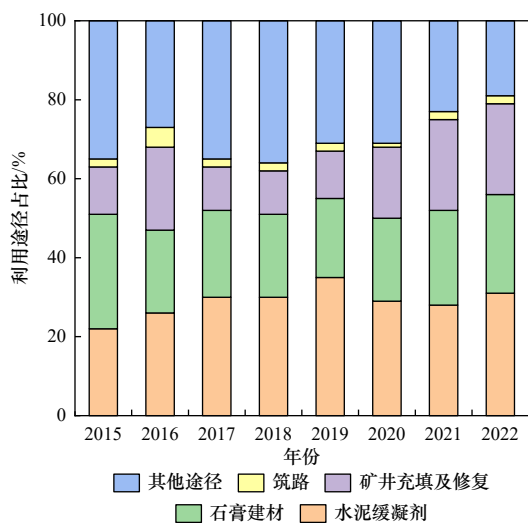


图3 2015—2022年我国磷石膏主要综合利用情况

Fig.3 Main comprehensive utilization of phosphogypsum in China during 2015-2022

利用率占比超过50%，但是与天然石膏、脱硫石膏的区域性竞争中处于明显劣势，通常需要进行财政补贴。此外，随着房地产行业增速放缓，水泥缓凝剂的利用量将大幅下降，石膏建材缺乏高附加值产品，导致同质化竞争严重，石膏建材的利用量增长缓慢<sup>[48]</sup>。我国磷石膏矿井充填及修复占比逐年增加，但是因缺乏相关环境风险评估规范，导致地方政府审批受限。随着国家相关标准规范的完善，磷石膏短中期内综合利用

的增长潜力巨大。磷石膏筑路材料的路用耐久性有待检验，目前国内主要在城市次干路、市政道路、二级及以下公路中进行试点示范，随着技术瓶颈的突破，其中长期内综合利用的增长潜力巨大。此外，2023年，习近平总书记在中央财经委员会第二次会议指出，应充分挖掘盐碱地综合利用潜力。磷石膏中富含钙、铁、锌、硅、磷等植物生长所需的元素，但要先对磷石膏进行无害化处理，消除其对人体健康以及环境构成的威胁。磷石膏因其偏酸特性可以用来制备改善盐碱地的土壤改良剂，对于盐碱地治理意义重大<sup>[49-50]</sup>。

2022年湖北省、云南省和贵州省磷石膏主要综合利用情况(见图4)显示，湖北省磷石膏综合利用主要途径为水泥缓凝剂和石膏建材，其占比分别为39.6%和38.7%；云南省磷石膏综合利用主要途径为矿井充填及修复和水泥缓凝剂，其占比分别为53.3%和21.3%；贵州省磷石膏综合利用主要途径为矿井充填及修复、水泥缓凝剂和石膏建材，其占比分别为50.4%、17.1%和15.3%。受地理位置和经济技术发展水平等多方面因素影响，导致各省磷石膏的综合利用途径差异化显著。湖北省位于长江流域，水运交通便利，水泥缓凝剂和石膏建材可辐射长江流域沿线；云南省和贵州省位于西南部山区，交通运输不便，限制了其在水泥缓凝剂和石膏建材领域的应用，主要聚焦矿井充填及修复领域。

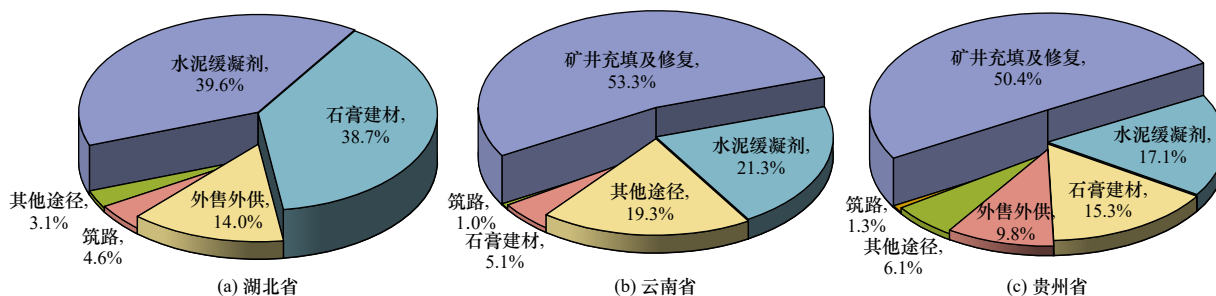


图4 2022年湖北省、云南省、贵州省磷石膏利用途径占比情况

Fig.4 Phosphogypsum utilization pathway share in Hubei, Yunnan and Guizhou provinces in 2022

## 2.2 磷石膏综合利用政策分析

### 2.2.1 国家层面磷石膏综合利用政策

近年来，国家高度重视磷石膏的综合利用，特别是在“无废城市”建设和工业资源综合利用政策中明确了磷石膏的资源化利用方向，着重推动其在矿井充填、筑路和生态修复领域的应用。自2018年以来，国家出台了一系列政策(见表3)，逐步推动磷石膏规模化消纳，并强化了环保标准的执行，确保在符合环境质量要求的前提下进行资源化利用。例如，2018年，

国务院办公厅印发的《“无废城市”建设试点工作方案》(国办发[2018]128号)提出“以用定产”政策，通过固废产消平衡，探索了磷石膏的多元化利用途径。此外，工业和信息化部以及生态环境部等多部门联合推动的政策加大了对磷石膏在道路材料、矿井充填等领域的应用支持，鼓励地方政府积极探索相关创新模式。总体来看，国家层面的政策导向明确，通过强化技术创新和监管，为磷石膏的高效利用提供了重要支持。

表3 国家层面颁布的磷石膏相关政策

Table 3 Policies related to phosphogypsum promulgated at the national level

颁布时间	颁布机构	政策名称	政策要点
2018年	国务院办公厅	《“无废城市”建设试点工作方案》(国办发[2018]128号)	以磷石膏为重点,实施“以用定产”政策,推进固废产消平衡
2021年	生态环境部等十八部门	《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》(环固体[2021]114号)	推广大宗固废(如磷石膏)在筑路、生态修复、土壤治理等领域的规模化利用
2022年	工业和信息化部等八部门	《加快推动工业资源综合利用实施方案》(工信部联节[2022]9号)	强调提升磷石膏的资源化品质,鼓励其在地下采空区充填和道路材料方面的应用
2023年	工业和信息化部等八部门	《推进磷资源高效高值利用实施方案》(工信部联原[2023]259号)	加快磷石膏在路基材料、生态修复和市政工程中的应用
2024年	国务院办公厅	《加快构建废弃物循环利用体系》(国办发[2024]7号)	明确磷石膏的规模化利用渠道
	工业和信息化部等七部门	《磷石膏综合利用行动方案》(工信部联节[2024]58号)	进一步畅通磷石膏消纳途径

### 2.2.2 地方层面磷石膏综合利用政策

在地方层面,湖北省、云南省和贵州省的磷石膏综合利用实践各具特色,三省也分别颁布了一系列磷石膏相关政策(见表4)。2018年,贵州省人民政府印发了《贵州省人民政府关于加快磷石膏资源综合利用的意见》(黔府发[2018]10号),率先提出磷石膏“以渣定产”政策,将企业磷石膏消纳情况与磷酸、磷肥等产排量挂钩,倒逼企业进行技术革新,减少磷石膏堆积;2019—2020年宜昌市先后出台了《关于促进磷石膏综合利用的意见》《宜昌市磷石膏综合利用三年行动计划(2018—2020年)》《关于加强磷石膏建材推广应用工作的通知》等一系列指导文件,并设立了专门的激励机制;荆门市推行一奖一约束机制,在奖励

的同时还出台了“以用定产”的“硬约束”。湖北省交通便利,以水泥缓凝剂和建材制品为主要利用方向,政府通过激励机制积极推动磷石膏建材的推广应用;2023年,云南省印发《全面推进磷石膏综合利用工作方案》,着眼高效高值化利用,组织实施磷石膏废弃矿坑生态修复利用、磷建筑石膏建材推广、磷石膏路基材料应用等“三个工程”,不断提升磷石膏综合利用能力。贵州省和云南省由于地理条件限制,更倾向于在矿井充填和生态修复领域进行磷石膏利用。尽管各地政策取得了一定成效,但在实际执行过程中,技术创新不足、市场推广困难等问题仍然存在。地方政府的激励措施和监管制度的落实也有待进一步加强。未来,随着国家政策的深入推进和地方创新

表4 湖北省、云南省和贵州省颁布的磷石膏相关政策

Table 4 Policies related to phosphogypsum promulgated in Hubei, Yunnan and Guizhou provinces

时间	省份	政策名称	政策要点
2018年	湖北省	《关于促进磷石膏综合利用的意见》	设立专门的激励机制;荆门市推行一奖一约束机制,在奖励的同时还出台了“以用定产”的“硬约束”
	云南省	《云南省固体废物污染治理攻坚战实施方案》	对工业固体废物综合利用提出原则性要求
	贵州省	《贵州省人民政府关于加快磷石膏资源综合利用的意见》 《磷石膏建材推广应用工作方案》	提出磷石膏“以渣定产”政策,将企业磷石膏消纳情况与磷酸、磷肥等产排量挂钩,倒逼企业进行技术革新,减少磷石膏堆积 加速推进磷石膏建材建设工程推广应用工作
2021年	湖北省	《关于加强磷石膏综合治理促进磷化工产业高质量发展的意见》	提出“控制增量、消化存量、逐步平衡”的治理原则,力争2025年底前实现磷石膏无害化处理
	贵州省	《磷石膏资源综合利用资金管理暂行办法》	通过设立专项资金,支持磷石膏消纳利用
2022年	湖北省	《湖北省磷石膏污染防治条例》	明确各级政府的污染防治职责,强化磷石膏治理的属地管理和部门监管责任
	湖北省	《省级磷石膏综合治理专项资金管理细则》	加大对磷石膏治理的财政支持力度
2023年	云南省	《全面推进磷石膏综合利用工作方案》	提出实施磷石膏废弃矿坑生态修复、建筑材料推广和路基材料应用等“三大工程”,提升磷石膏的综合利用水平
		《磷建筑石膏建材推广应用工作方案》	推动磷石膏在市政及道路工程中的应用
2024年	贵州省	《关于全面加强磷石膏综合利用推动磷化工产业绿色发展的意见》	目标是到2026年实现磷石膏无害化处理率100%,推动磷化工产业绿色转型

模式的完善,磷石膏的资源化利用将有望实现更大突破。

### 3 主要问题及对策建议

#### 3.1 主要问题

##### 3.1.1 磷石膏相关污染控制技术规范缺乏,阻碍磷石膏多元化利用

一是目前磷石膏贮存过程的污染控制执行《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599—2020)的相关规定,但是由于磷石膏产生量巨大且高应力作用下具有低渗透系数等独特的力学特性,其贮存过程的污染控制要求需制定专用的污染控制技术规范。二是磷石膏建材中污染物含量要求不明确,导致市场上制品质量参差不齐,一方面造成使用过程的质量问题,另一方面也加大了磷石膏制品的环境风险,影响民众对磷石膏建材的接受程度,甚至抵触使用磷石膏制品。同时,没有标准约束下的不同质磷石膏制品之间的正面价格竞争,也加剧了磷石膏制品附加值低的问题。三是磷石膏充填、回填等土地整理、石漠化治理过程的环境风险评估步骤缺乏,目前多通过设置防渗系统方式控制风险。各地在相关项目审批方面缺乏依据,制约了综合利用。

##### 3.1.2 磷石膏综合利用产品竞争力偏弱,限制其综合利用率提升

磷石膏产地高度集中于湖北省、云南省和贵州省等中西部磷矿资源富集区,而石膏制品需求主要分布于沿海经济发达地区,运输成本和低附加值之间的矛盾成为制约磷石膏大规模利用的主要问题。尤其对于云南省和贵州省,其周边辐射市场容量小且渐趋饱和,难以容纳大批量的磷石膏综合利用产品。而对于市场容量较大的经济发达地区,因运输距离远,运输成本和销售成本较高,导致产品竞争力不足,如磷石膏水泥缓凝剂和石膏建材在与天然石膏、脱硫石膏水泥缓凝剂和石膏建材的区域性竞争中处于明显劣势。

##### 3.1.3 磷石膏长期高位增长与磷石膏库服役年限日益逼近,限制行业的可持续发展

2022年我国磷石膏综合利用率为50.5%,不能综合利用的磷石膏仍将以堆存方式进行处理。《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》(环办环评〔2019〕65号)明确,长江干流3 km范围内、主要支流岸线1 km范围内禁止新建、扩建尾矿库和磷石膏库。但据不完全统计,目前磷石膏库的堆存周期平均为4.7年,使用周期在3年以内的有20家。鉴于2022年我国磷石膏综合利用率为

50.5%,不能综合利用磷石膏的贮存成为难题。

#### 3.2 对策建议

##### 3.2.1 健全磷石膏利用处置制度体系,促进磷石膏多元化利用

建议研究制定磷石膏贮存和综合利用污染控制技术规范,促进磷石膏多元化利用。积极推动湖北省、云南省和贵州省等省域“无废城市”建设,聚焦磷石膏污染全链条治理难题,强化技术创新与模式创新,突破共性关键技术,构建磷石膏污染防治系统解决方案。支持Ⅱ型无水石膏、 $\alpha$ 高强石膏、高分子材料等高值化利用技术研发。建立健全由国家标准、地方规定、行业技术引领的磷石膏利用处置制度体系,推动磷石膏综合利用行业可持续发展。

##### 3.2.2 加强磷石膏利用支持政策,扶持磷石膏综合利用产品

对于偏远地区已建设投产的磷石膏综合利用项目,推动出台综合利用产品运输优惠补贴政策,为磷石膏建材产品跨省域、跨地区市场培育创造条件。推动相关部门出台政策限制天然石膏开采,推广使用工业石膏,在部分领域实现规模化替代。强化磷石膏综合利用产品通过绿色建材产品认证,落实政府绿色采购政策,大力推进磷石膏综合利用产品在市政建设、道路交通、建筑工程和乡村振兴等领域的推广应用。

##### 3.2.3 推动磷石膏无害化处理,建立磷石膏资源暂存场

磷石膏中的磷和氟元素是新能源电池和无水氟化氢等高值化产品的重要原料,应充分认识磷石膏是“放错地方的资源”,在磷石膏规模化、高值化综合利用技术尚未完全突破前,支持鼓励磷石膏产生企业对磷石膏进行无害化处理,严格按照相关法律法规、标准规程进行安全规范贮存,并进行严格监管,缓解行业和企业压力,保证磷肥的生产和供应,保障我国粮食安全。

### 4 结束语

磷肥作为我国农业发展的支柱产业,其副产的磷石膏主要分布在长江流域,其中的氟化物和总磷等污染物如不妥善利用处置,将会对长江经济带高质量发展产生重要影响。目前我国磷石膏的利用仍以传统的石膏建材和水泥缓凝剂为主,亟需探索规模化消纳路径。国家高度重视磷石膏的利用工作,并逐步明确了规模化消纳途径,但仍面临较多问题,包括磷石膏相关污染控制技术规范缺乏,阻碍磷石膏多元化利用;磷石膏综合利用产品竞争力偏弱,限制其综合利用率提升;同时,磷石膏贮存量长期高位增长与磷石膏库

服役年限日益逼近,限制行业的可持续发展。基于磷石膏产生、利用和处置情况及污染特性,建议健全磷石膏利用处置制度体系,促进磷石膏多元化利用;加强磷石膏利用支持政策,扶持磷石膏综合利用产品;推动磷石膏无害化处理,建立磷石膏资源暂存场。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 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刍议 [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.
- [ 2 ] DING W J,CHEN Q J,SUN H J,et al.Modified mineral carbonation of phosphogypsum for CO<sub>2</sub> sequestration[J].Journal of CO<sub>2</sub> Utilization,2019,34:507-515.
- [ 3 ] 李纯,薛鹏丽,张文静,等.我国磷石膏处置现状及绿色发展对策 [J].化工环保,2021,41(1):102-106.  
LI C,XUE P L,ZHANG W J,et al.Disposal status of phosphogypsum in China and countermeasures for green development[J].Environmental Protection of Chemical Industry, 2021,41(1):102-106.
- [ 4 ] 杨荣金,张钰莹,张乐,等.长江流域“三磷”综合整治“十四五”策略 [J].生态经济,2021,37(3):187-191.  
YANG R J,ZHANG Y Y,ZHANG L,et al.The strategy of comprehensive regulation of phosphate rock,phosphorus chemicals and phosphogypsum in the Yangtze River Basin during the ‘14th Five-Year Plan’ period[J].Ecological Economy,2021, 37(3):187-191.
- [ 5 ] 刘珊,吴丰辉,瞿广飞,等.磷石膏堆存过程中重金属的迁移转化及其生态效应 [J].生态毒理学报,2022,17(4):302-314.  
LIU S,WU F H,QU G F,et al.Migration and transformation of heavy metals in phosphogypsum storage process and their ecological effect[J].Asian Journal of Ecotoxicology,2022,17(4): 302-314.
- [ 6 ] CHERNYSH Y,YAKHNENKO O,CHUBUR V,et al. Phosphogypsum recycling:a review of environmental issues, current trends,and prospects[J].Applied Sciences,2021,11(4): 1575.
- [ 7 ] WANG M,LUO H Q,CHEN Y,et al.Leaching characteristics of calcium and strontium from phosphogypsum under acid rain[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2018, 100(2):310-315.
- [ 8 ] 朱雪涛,杜兵,阿曼角,等.半水磷石膏地下充填材料的磷和氟浸出特性及地球化学模拟 [J].中国环境科学,2022,42(2):680-687.  
ZHU X T,DU B,A M J,et al.Leaching properties of phosphorus and fluorine in hemihydrate phosphogypsum as underground filling materials and geochemical simulation[J].China Environmental Science,2022,42(2):680-687.
- [ 9 ] 徐亚,王京京,李淑,等.黄河流域固废治理现状、问题与对策建议 [J].环境科学研究,2023,36(2):373-380.  
XU Y,WANG J J,LI S,et al.Present situation,problems and countermeasures of solid waste management in the Yellow River Basin[J].Research of Environmental Sciences,2023,36(2):373- 380.
- [ 10 ] KORANY K A,MASOUD A M,RUSHDY O E,et al.Phosphate, phosphoric acid and phosphogypsum natural radioactivity and radiological hazards parameters[J].Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,2021,329(1):391-399.
- [ 11 ] ZHANG J X,CUI K,CHANG J,et al.Phosphogypsum-based building materials:resource utilization,development,and limitation [J].Journal of Building Engineering,2024,91:109734.
- [ 12 ] ATTALLAH M F,METWALLY S S,MOUSSA S I,et al. Environmental impact assessment of phosphate fertilizers and phosphogypsum waste:elemental and radiological effects[J]. Microchemical Journal,2019,146:789-797.
- [ 13 ] SAADAOU E,GHAZEL N,BEN ROMDHANE C,et al. Phosphogypsum:potential uses and problems:a review[J]. International Journal of Environmental Studies,2017,74(4):558- 567.
- [ 14 ] WĘDRYCHOWICZ M,BYDALEK A W,SKRZEKUT T,et al. Analysis of the mechanical strength,structure and possibilities of using waste phosphogypsum in aluminum powder composites[J]. SN Applied Sciences,2019,1(9):992.
- [ 15 ] 吴琼慧,刘志学,陈业阳,等.长江经济带“三磷”行业环境管理现状 及对策建议 [J].环境科学研究,2020,33(5):1233-1240.  
WU Q H,LIU Z X,CHEN Y Y,et al.Status and countermeasures of environmental management of the ‘three phosphorus’ industry in the Yangtze River Economic Belt[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(5):1233-1240.
- [ 16 ] 赵玉婷,李亚飞,董林艳,等.长江经济带典型流域重化产业环境 风险及对策 [J].环境科学研究,2020,33(5):1247-1253.  
ZHAO Y T,LI Y F,DONG L Y,et al.Environmental risks and countermeasures of heavy chemical industry in the Yangtze River Economic Belt[J].Research of Environmental Sciences,2020, 33(5):1247-1253.
- [ 17 ] 秦延文,马迎群,王丽婧,等.长江流域总磷污染:分布特征·来源解 析·控制对策 [J].环境科学研究,2018,31(1):9-14.  
QIN Y W,MA Y Q,WANG L J,et al.Pollution of the total phosphorus in the Yangtze River Basin:distribution characteristics, source and control strategy[J].Research of Environmental Sciences,2018,31(1):9-14.
- [ 18 ] 马丽萍.云南磷石膏资源化综合利用现状及发展思考 [J].云南 化工,2019,46(11):48-56.  
MA L P.Comprehensive utilization of phosphogypsum in Yunnan- present situation and analysis[J].Yunnan Chemical Technology, 2019,46(11):48-56.
- [ 19 ] 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.

- [20] 时瑶,秦延文,马迎群,等.长江流域上游地区“三磷”污染现状及对策研究[J].环境科学研究,2020,33(10):2283-2289.  
SHI Y,QIN Y W,MA Y Q,et al.Pollution status and control strategy of 'three phosphorus' pollution in the upper reaches of Yangtze River Basin,China[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(10):2283-2289.
- [21] WANG Y,WAN T M,ZHONG Y J,et al.Environmental sustainability of renewable phosphogypsum by CaS[J].Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2020,139(6):3457-3471.
- [22] MA B G,LU W D,SU Y,et al.Synthesis of  $\alpha$ -hemihydrate gypsum from cleaner phosphogypsum[J].Journal of Cleaner Production,2018,195:396-405.
- [23] 郭小雨,樊传刚,裴立宅,等.磷石膏免烧砖的性能及其重金属离子固定研究[J].新型建筑材料,2020,47(10):127-131.  
GUO X Y,FAN C G,PEI L Z,et al.Studying on performance and fixation of heavy metal ions of the phosphogypsum baking-free bricks[J].New Building Materials,2020,47(10):127-131.
- [24] 张梦舟,徐曾和,梁冰.三峡库区香溪河流域磷矿废石磷素释放特性研究[J].中国环境科学,2016,36(3):840-848.  
ZHANG M Z,XU Z H,LIANG B.Phosphorus release from phosphate waste rocks deposited in Xiangxi River watershed of Three Gorges Reservoir[J].China Environmental Science,2016,36(3):840-848.
- [25] 郑玉龙,嵇帅,陆春华,等.基于固废磷石膏 胶凝材料的工艺与机制[J].复合材料学报,2024,41(3):1436-1446.  
ZHENG Y L,JI S,LU C H,et al.Preparation technology and mechanism of cementitious material based on solid waste phosphogypsum[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2024,41(3):1436-1446.
- [26] 胡兆明,郭国清,张华丽,等.关于典型磷石膏成分特点及淋滤影响的研究[J].化肥设计,2022,60(4):16-20.  
HU Z M,GUO G Q,ZHANG H L,et al.A study on the characteristics of typical phosphogypsum components and the effects of leaching[J].Chemical Fertilizer Design,2022,60(4):16-20.
- [27] 金彪,李晓鸣,汪潇,等.磷石膏的基本特性及其制备蒸养砖的研究[J].新型建筑材料,2023,50(4):112-115.  
JIN B,LI X M,WANG X,et al.Basic characteristics of phosphogypsum and the preparation of autoclaved brick[J].New Building Materials,2023,50(4):112-115.
- [28] 刘超,范垂钢,刘润国,等.磷石膏浮选-常压盐溶液转晶制备  $\alpha$ -半水石膏[J].无机盐工业,2023,55(11):107-114.  
LIU C,FAN C G,LIU R G,et al.Preparation of  $\alpha$ -hemihydrate gypsum from phosphogypsum by flotation and atmospheric transcrystallization in solution[J].Inorganic Chemicals Industry,2023,55(11):107-114.
- [29] 刘冬梅,王玮琦,彭艳周,等.磷石膏-磷渣基复合胶凝材料强度和水化特性研究[J].金属矿山,2022(9):230-237.  
LIU D M,WANG W Q,PENG Y Z,et al.Study on the strength and hydration characteristics of phosphogypsum-phosphorus slag composite cementitious material[J].Metal Mine,2022(9):230-237.
- [30] 肖智慧,李中军,吕伟,等.磷石膏路基稳定材料的节能减排效益分析[J].混凝土与水泥制品,2023(7):99-102.  
XIAO Z H,LI Z J,LYU W,et al.Benefits analysis of energy saving and emission reduction of phosphogypsum roadbed stabilizing material[J].China Concrete and Cement Products,2023(7):99-102.
- [31] 李江丽,郭永杰,李海兵,等.磷石膏除杂增白研究进展[J].磷肥与复肥,2022,37(9):30-33.  
LI J L,GUO Y J,LI H B,et al.Research progress on impurity removal and whitening of phosphogypsum[J].Phosphate & Compound Fertilizer,2022,37(9):30-33.
- [32] 郭爽,邢冬娟,郭校,等.磷石膏基建筑石膏的制备及改性研究[J].无机盐工业,2023,55(12):102-110.  
GUO S,XING D X,GUO X,et al.Study on preparation and modification of phosphogypsum-based architectural gypsum[J].Inorganic Chemicals Industry,2023,55(12):102-110.
- [33] 郭永杰,李江丽,范培强,等.云南某磷石膏分级浮选脱硅新工艺试验研究[J].非金属矿,2022,45(4):53-56.  
GUO Y J,LI J L,FAN P Q,et al.Experimental study on a new process of classification flotation desilication of phosphogypsum in Yunnan[J].Non-Metallic Mines,2022,45(4):53-56.
- [34] 周远忠,王宏杰,陈鸿,等.甲基硅酸钾改性磷石膏对水泥基湿拌砂浆力学性能的影响[J].新型建筑材料,2022,49(10):123-127.  
ZHOU Y Z,WANG H J,CHEN H,et al.Effects of phosphogypsum modified with potassium methyl silicate on mechanical properties of cement-based wet-mixed mortar[J].New Building Materials,2022,49(10):123-127.
- [35] 邱伟,孔德文,崔庚寅,等.偏高岭土-磷石膏基复合胶凝材料性能试验研究[J].硅酸盐通报,2023,42(9):3267-3276.  
QIU W,KONG D W,CUI G Y,et al.Experimental study on performance of metakaolin-phosphogypsum-based composite gelling materials[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2023,42(9):3267-3276.
- [36] 周明凯,张晓乔,陈潇,等.水泥磷石膏稳定碎石路面基层材料性能研究[J].公路,2016,61(4):186-190.  
ZHOU M K,ZHANG X Q,CHEN X,et al.Research on properties of phosphogypsum cement stabilized gravel road base materials[J].Highway,2016,61(4):186-190.
- [37] ZHAO M X,ZHOU X M,LI J F,et al.Efficient removal of phosphate and fluoride from phosphogypsum leachate by lanthanum-modified zeolite:synchronous adsorption behavior and mechanism[J].Journal of Environmental Chemical Engineering,2024,12(5):113294.
- [38] XUE X L,KE Y X,KANG Q,et al.Cost-effective treatment of hemihydrate phosphogypsum and phosphorous slag as cemented paste backfill material for underground mine[J].Advances in Materials Science and Engineering,2019,2019:9087538.
- [39] WU F H.The treatment of phosphogypsum leachate is more urgent than phosphogypsum[J].Environmental Research,2024,262:119849.
- [40] MILLÁN-BECERRO R,PÉREZ-LÓPEZ R,CÁNOVAS C R,et al.Phosphogypsum weathering and implications for pollutant

- discharge into an estuary[J].*Journal of Hydrology*,2023,617:128943.
- [41] KE H,ZHENG S N,ZHANG P Z,et al.Leaching behavior and release mechanism of pollutants from different depths in a phosphogypsum stockpile[J].*Waste Management*,2024,189:230-242.
- [42] WANG H M,DING Y J,REN Y B,et al.Comparison of phosphogypsum-steel slag-based cement and Portland cement for stabilization of heavy metals in oil-based drillings cuttings[J].*Science of the Total Environment*,2024,946:174082.
- [43] SHARMA K D,JAIN S.Municipal solid waste generation, composition,and management:the global scenario[J].*Social Responsibility Journal*,2020,16(6):917-948.
- [44] 胡彪,吴赤球,吕伟,等.改性磷石膏矿渣水泥在混凝土和路基材料中的应用研究[J].*混凝土与水泥制品*,2022(4):94-99.  
HU B,WU C Q,LYU W,et al.Study on the application of modified phosphogypsum slag cement in concrete and roadbed materials[J].*China Concrete and Cement Products*,2022(4):94-99.
- [45] 李铭,梁欢,随婕斐,等.我国磷石膏资源化利用进展及前景展望[J].*磷肥与复肥*,2020,35(7):30-36.  
LI M,LIANG H,SUI J F,et al.Progress and prospect of comprehensive utilization of phosphogypsum in China[J].*Phosphate & Compound Fertilizer*,2020,35(7):30-36.
- [46] 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.
- [47] ROSALES J,PÉREZ S M,CABRERA M,et al.Treated phosphogypsum as an alternative set regulator and mineral addition in cement production[J].*Journal of Cleaner Production*,2020,244:118752.
- [48] 刘光成.磷石膏建材化利用的市场瓶颈及对策研究[J].*建材发展导向*,2019,17(24):100-104.  
LIU G C.Market bottleneck and countermeasure research on phosphogypsum building material utilization[J].*Development Guide to Building Materials*,2019,17(24):100-104.
- [49] SAMET M,KARRAY F,MHIRI N,et al.Effect of phosphogypsum addition in the composting process on the physico-chemical proprieties and the microbial diversity of the resulting compost tea [J].*Environmental Science and Pollution Research International*,2019,26(21):21404-21415.
- [50] CRUSCIOL C A C,ARTIGIANI A C C A,ARF O,et al.Soil fertility,plant nutrition,and grain yield of upland rice affected by surface application of lime,silicate,and phosphogypsum in a tropical no-till system[J].*CATENA*,2016,137:87-99.

(责任编辑:周巧富)