

◆健康保育与环境修复◆

磷石膏在土壤改良及生态修复领域的研究进展

鲁申奥¹, 师雄², 梁莎¹, 段华波¹, 袁书珊¹, 杨家宽¹

- (1. 华中科技大学 环境科学与工程学院 长江流域多介质污染协同控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;
2. 中国长江三峡集团有限公司 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 湖北 武汉 430014)

[摘要] 磷石膏中含有磷、氟等污染物, 长期堆存会产生严重环境污染问题, 提高磷石膏综合利用率迫在眉睫。磷石膏传统利用途径例如制备建材、化工材料等消纳量低、成本高。将磷石膏用于土壤改良和生态修复不仅可以有效解决磷石膏堆存问题, 还可以充分利用磷石膏中的磷及其他元素, 有望实现大规模利用, 但需要去除或固定氟元素。总结磷石膏在土壤改良、生态修复等方面的研究进展, 提出磷石膏作为充填材料和土壤基质是其未来有望大规模消纳的方向。

[关键词] 磷石膏; 综合利用; 土壤改良; 生态修复

[中图分类号] X781 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2026) 02-0095-07

Research progress of phosphogypsum in soil improvement and ecological restoration

LU Shenao¹, SHI Xiong², LIANG Sha¹, DUAN Huabo¹, YUAN Shushan¹, YANG Jiakuan¹

- (1. Hubei Key Laboratory of Multi-media Pollution Cooperative Control in Yangtze Basin, School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. National Engineering Research Center for Ecological Environment of Yangtze River Economic Zone, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China)

Abstract: Phosphogypsum contains pollutants such as phosphorus and fluorine, long-term stockpiling can cause serious environmental pollution problems. Therefore, it is extremely urgent to increase the comprehensive utilization rate of phosphogypsum. Traditional utilization channels of phosphogypsum, such as the preparation of building materials and chemical materials, have low consumption volumes and high costs. The application of phosphogypsum in soil improvement and ecological restoration can not only effectively solve the problem of phosphogypsum stockpiling but also fully utilize phosphorus and other elements in phosphogypsum, showing promise for large-scale utilization. However, fluorine elements need to be removed or fixed. The research progress of phosphogypsum in soil improvement and ecological restoration is summarized, and it is point that using phosphogypsum as a filling material and soil-forming substrate is a promising direction for its large-scale consumption in the future.

Key words: phosphogypsum; comprehensive utilization; soil improvement; ecological restoration

0 引言

磷石膏 (Phosphogypsum, 简称PG) 是湿法磷酸工艺的副产物, 每生产磷酸1 t会产生磷石膏约5 t。如图1所示, 我国每年新产生磷石膏约0.8亿 t, 综合利用率约为60%, 未被利用的磷石膏以堆存为主, 目前我国堆存的磷石膏已达8.7亿 t^[1]。磷石膏的主要成分为二水硫酸钙 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 不同地

区的磷石膏的主要化学成分见表1^[2]。目前磷石膏主要用来制备建材及化工产品, 例如石膏板、石膏砖及硫酸铵等。然而, 由于磷石膏是湿法磷酸产物, 其 $w(\text{H}_2\text{O})$ 在20%~30%^[3], 在烘干时所需要的能耗高, 导致利用成本高, 另外, 磷石膏中含有多种杂质, 包括含P杂质 (可溶P、难溶P、共晶P)、含F杂质 (可溶F、难溶F)、有机杂质 (磷矿

收稿日期: 2024-10-26; 修回日期: 2025-12-02

作者简介: 鲁申奥 (2001—), 男, 湖北宜昌人, 在读硕士研究生, 从事固废资源化研究。

通信作者: 杨家宽, 教授。

基金项目: 长江生态环境保护修复联合研究中心 (2022-LHYJ-02-0301); 中国长江三峡集团科研项目 (202403033); 湖北省自然科学基金面上项目 (2024AFB579)

固有有机物、有机添加剂等)以及其他杂质(碱金属元素以及放射性元素等)^[4],使得除杂工艺复杂,高值化工产品制备困难。因此,磷石膏的处理及综合利用被认为是世界性难题。

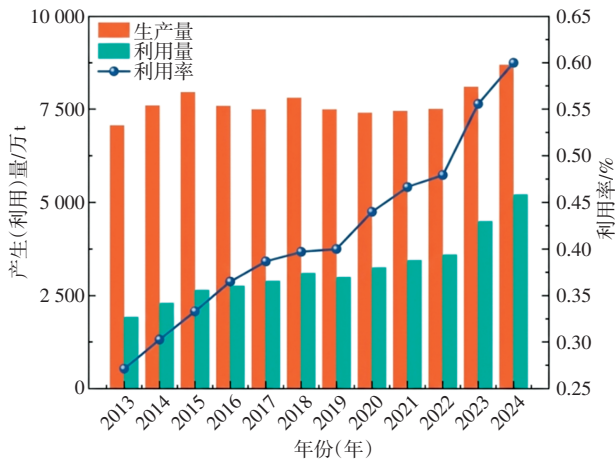


图1 2013—2024我国磷石膏综合利用情况^[1]

Fig. 1 The comprehensive utilization of phosphogypsum in China from 2013 to 2024

表1 磷石膏主要化学组成

Table 1 The main chemical composition of phosphogypsum

产地	w(CaO)	w(SO ₃)	w(SiO ₂)	w(P ₂ O ₅)	w(F)	w(Fe ₂ O ₃)	w(Al ₂ O ₃)	参考文献
湖北	32.70	49.08	13.19	1.61	1.46	0.55	0.43	课题组自测
湖北	26.62	37.45	6.26	1.65	1.7	0.31	0.46	[2]
云南	30.34	41.38	11.92	0.50	0.31	0.24	0.35	[3]
贵州	39.52	55.28	2.68	0.89	0.65	0.37	0.30	[4]
安徽	35.52	52.31	3.85	1.23	0.51	2.56	3.60	[5]

磷石膏大量堆存,若管理不善有可能对周边土壤、水体造成环境污染。主要污染物为可溶性P和F,少量磷石膏可能还含有重金属污染物,如Cd、As、Hg、Pb等。罗栋源等^[5]检测了磷石膏水洗液中P和F的质量浓度,分别为2 200 mg/L和1 500 mg/L,若磷石膏长期堆存,其中的P和F存在释放风险,可能会对土壤或水体环境造成污染。王玉龙等^[6]对贵州省某磷石膏堆场周边土壤重金属情况进行了调研,发现堆场周边土壤中重金属含量普遍超过当地土地背景值,其中Cd在堆场周边土壤明显积累,具有中度生态风险。

2021年3月,国家发展和改革委员会发布的《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》中指出,在确保环境安全的前提下,探索磷石膏在土壤改良、井下充填、路基材料等领域的

进一步应用。2024年3月工业和信息化部等七部门联合印发《磷石膏综合利用行动方案》,其中明确提出开拓磷石膏资源化利用新场景,例如土壤改良和生态修复材料等。磷石膏本质来源于磷矿,若能将磷石膏经过处理后重新应用于土壤,不仅可以大规模利用磷石膏,解决磷石膏堆存问题,还能推动磷等营养元素在自然界中的循环。因此,本文对磷石膏在土壤改良和生态修复方面的研究现状进行综述,期望为磷石膏综合利用新方向提供参考。

1 磷石膏在土壤改良方面的应用

联合国粮农组织发布报告称全球已有超过30%的土壤已经或者正在发生退化,其中亚洲土壤退化较严重,有超过70%的土壤发生退化^[7-8]。我国的土壤退化趋势也比较显著,仅南方山区的土壤退化面积就占该地区土壤总面积的20%^[9]。土壤退化主要有土壤酸化、土壤盐碱化、土壤沙化和水土流失等类型。磷石膏呈酸性,且富含Ca、P和S等元素,可被用作土壤改良剂,用来调理酸性土壤和盐碱化土壤,还可以当作肥料施用。

1.1 改良酸性土壤

我国土壤酸化比较普遍,pH<6.5的土壤占比约30%。根据第二次全国土壤普查数据,全国酸化土壤面积高达311.1万km²,约占我国陆地面积的32.4%^[10]。当土壤酸度过大时(pH<5),土壤中的可交换性Al³⁺占比大幅提升,土壤中Al³⁺会严重影响植物根尖部分的发育,减少作物产量^[11]。土壤中的Ca²⁺能提高植物抗胁迫能力,让植物能适应不良环境,但有研究报道,土壤中Al³⁺浓度过高会将与植物细胞壁结合的Ca²⁺置换出来,影响植物生长^[12]。

目前改良酸性土壤中可交换Al³⁺过多的主要办法是外加钙源。例如施加石灰,石灰中的Ca²⁺可以与土壤中的Al³⁺发生反应,促进Al³⁺转化为其他稳定的化合物,从而减轻Al³⁺对植物的毒害作用^[13]。然而,添加石灰也存在一定弊端,一旦停止添加石灰,可能会引发土壤再次酸化,并且长期使用石灰还会致使土壤板结^[14]。磷石膏含有大量的Ca²⁺,施用磷石膏可以有效减少土壤中可交换Al³⁺含量(如表2所示),同时磷石膏还含有SO₄²⁻和F⁻,可以促使土壤中可交换Al³⁺转变为稳定的Al(SO₄)₄⁺、AlF₂⁺等化合物(式(1)至(3))从而使土壤阳离子交换量增加,增加植物抗胁迫能力,缓解酸化土壤中可交换Al³⁺过多问题。





此外,温元波^[15]发现在施加少量磷石膏的条件下,磷石膏施加量与土壤中可交换 Al^{3+} 呈负相关,同时施加磷石膏能够使作物增产,促进植物吸收营养元素。肖厚军等^[16]对比了添加石灰和添加磷石膏的酸性黄壤上高粱的生长情况,发现添加石灰确实能降低土壤中可交换性 Al^{3+} 含量,且能提高土壤中的 Ca^{2+} 含量,但是石灰无法显著提高土壤中P、K含量,高粱的长势仍然较差;而施加了磷石膏的高粱生长较好,且高粱植株的 $w(\text{K})/w(\text{Al})$ 明显高于对照组,说明添加磷石膏不仅能改良酸性土壤,还能提高植物的养分。BOURAY等^[17]将磷石膏施用在酸性土壤中,发现磷石膏能减少土壤中可交换 Al^{3+} 含量,且能增加土壤有效磷的含量;通过植物种植实验发现,磷石膏能促进苜蓿对P和S的吸收,增加产量。

表2 添加磷石膏对土壤可交换 Al^{3+} 的去除效果

Table 2 The removal effect of phosphogypsum on exchangeable Al^{3+} in soil

磷石膏添加量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	陈化时间/d	可交换 Al^{3+} 去除率/%	参考文献
6	50	80.77	[21]
12	30	62.50	[24]
4.5	30	46.15	[25]

1.2 改良盐碱土壤

土壤盐碱化是指易溶性盐在土壤表层积累的现象,土壤中可交换 Na^+ 饱和度(ESP)大于20%、电导率(EC)大于4 mS/cm、pH大于8的土壤可被定义为盐碱土。全球盐碱化土壤面积超过 $9.3 \times 10^6 \text{ km}^2$,我国盐碱化土壤面积约为 $1.0 \times 10^6 \text{ km}^2$,主要分布在内陆干旱、半干旱地区,以及沿海地区^[18]。土壤盐碱化会破坏土壤的理化性质和生物性质,降低作物产量,影响全球粮食安全,对全球农业生产构成严重威胁^[19]。改良土壤盐碱化的主要方法是去除土壤中过多的可交换性 Na^+ 和调控土壤pH,目前用得较多的是施用石膏改良盐碱地,石膏中含有 Ca^{2+} ,可以置换土壤中的可交换性 Na^+ ^[20]。磷石膏主要成分和石膏相似,且磷石膏呈酸性,具有改良土壤盐碱化的潜力,同时磷石膏可以提升土壤肥力,可能起到比普通石膏更好的效果。

SMAOUI等^[21]针对施加磷石膏对盐碱土壤的改良效果以及番茄生长情况展开研究。结果表明,施加磷石膏能够降低盐碱地的pH和电导率,在磷石膏施用量为5%~20%的条件下,番茄的产量、

叶片叶绿素含量有所增加,但是当磷石膏施加量超过20%时,会毒害番茄,导致其产量大幅度降低。一方面,随着 Ca^{2+} 的增加,不仅置换了 Na^+ ,也置换了一部分 K^+ ,导致植物缺钾;另一方面,随着磷石膏用量增加,会导致土壤板结钙化,且磷石膏中部分污染物进入土壤,导致番茄减产。展争艳等^[22]通过施用磷石膏复配其他调理剂的方法对甘肃某重度盐碱地进行改良,并通过种植玉米来评估改良效果,发现当磷石膏用量为 12 t/hm^2 时,土壤pH和盐碱度降幅最大,且和对照组相比玉米增产了18.4%。LU等^[23]也发现适量施用磷石膏可以改良盐碱地,此外还发现磷石膏可以提高水稻对C、N、P的利用效率,同时可以提高土壤的微生物多样性,促进土壤健康发展。

1.3 作为肥料

植物在生长进程中需从土壤汲取各类营养元素,其中Ca、S、P是植物生长不可或缺的元素。Ca能够预防植物早衰,提高作物的品质^[24];S的不足会对植物的光合作用、根系发育以及抗胁迫等能力产生不良影响^[25];P是肥料三要素之一,是至关重要的营养元素。磷石膏中蕴含丰富的Ca、S、P等元素,因此具有成为肥料的潜力。安景文等^[26]将磷石膏作为肥料施用到种植花生的土壤上,在施加量为 $0.3 \sim 1.5 \text{ t/hm}^2$ 的条件下,磷石膏能够增加土壤中的有效态元素含量,并且使花生增产16.5%~47.0%。NAYAK等^[27]发现,施加磷石膏可以增加土壤中P和微量元素的含量,同时磷石膏可以改良土壤结构、增加土壤有机质含量,还提高了土壤的保水性能,当磷石膏施加量为 10 t/hm^2 时,与天然土壤相比,玉米和水稻的产量有明显增加。ZWOLINSKI等^[28]使用高架种植床种植辐射松,研究发现在8.5年树龄时,单独使用种植床使得木材增产5倍,而在种植床上施加磷石膏作为肥料(施加量为 4.5 t/hm^2)后木材产量增加了10倍。

2 磷石膏在生态修复方面的应用

2.1 修复重金属污染土壤

我国土壤重金属污染严重,重金属污染土壤面积高达333万 hm^2 ^[29],重金属污染不仅使农作物大量减产,有的重金属还会富集到作物中,进入食物链后危害人体健康^[30]。近年来也有学者研究磷石膏对重金属污染土壤的修复作用,发现磷石膏在土壤修复领域的潜力。磷石膏修复重金属污染土壤的机制主要是表面金属络合物的形成^[31],磷石膏中Ca-OH、Fe-OH、Al-OH等表面位点与重金属相结

合,从而降低土壤重金属的毒性。此外,杨花等^[32]认为磷石膏中含有一定的氟,氟会与重金属形成络合物,可以降低重金属毒性。MA等^[33]指出磷石膏固定重金属的机制还包括离子交换和静电吸附,同时磷石膏的施加可能会改变土壤中的优势菌群,从而诱导微生物对土壤重金属进行固定。磷石膏钝化重金属机制如图2所示。

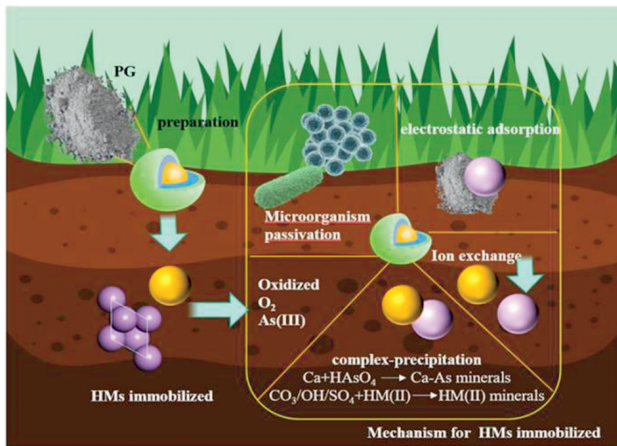


图2 磷石膏钝化重金属机制^[33]

Fig. 2 The mechanism of heavy metals passivation with phosphogypsum

例如, MAHMOUD等^[34]研究磷石膏和主要成分为稻草和畜禽粪便的堆肥对Cd、Pb、Zn污染土壤的修复效果,结果表明单独施用磷石膏对土壤的重金属有着较好的钝化效果,在污染土壤中施加10 g/kg的磷石膏,植物对Pb、Zn和Cd的吸收分别降低至19%、45%和39%。REN等^[35]将磷石膏和高炉矿渣制作成一种胶凝材料用来固化Pb污染土壤,使用该固化剂后污染土壤的浸出毒性明显减少,Pb的浸出毒性已经低于我国《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)规定的5 mg/L。孙媛媛^[36]对比几种重金属钝化剂对土壤中As有效性的影响,结果表明磷石膏对As的钝化效果良好,效果仅次于水铁矿,优于海泡石、赤泥、钢渣等其他钝化剂,污染土壤添加1%磷石膏后,种植的小油菜 $w(\text{As})$ 降低了30%。

2.2 作为土壤生态修复基质

磷石膏中含有很多植物生长所需的营养成分,除了可以作为肥料和土壤改良剂直接施加到土壤环境以外,有学者探究如何将磷石膏和其他材料复配,在磷石膏大掺量的条件下,将其作为植物生长的基质,也有学者将其称为人工土壤^[37]。这种生长基质或者人工土壤可应用于缺土地区城市绿化、矿山生态修复以及荒漠化治理等修复场景,不

仅可以大量利用磷石膏,还可以减少客土成本,是一种将磷石膏大宗消纳的新手段。例如,王运长等^[38]将磷石膏、赤泥、粉煤灰和污泥进行复配,并对复配基质的理化性质进行了测定,结果表明,复配基质的总N、速效N和总K偏低,而总P、有效P和速效K均高于贵州4种农用地土壤,由此可见磷石膏和其他固废协同复配基质具有植物生长的潜力。李木俊等^[39]使用磷石膏、粉煤灰和污泥在质量比10:80:10的条件下研究出一种绿化基质,在此基质上,黑麦草发芽率在90%以上且40 d株高可达30 cm。LIU等^[40]使用赤泥、磷石膏混合形成基质,外加少量稻壳粉、粉煤灰、膨润土和聚丙烯酰胺对基质进行改良,对基质300 d中营养成分的变化进行了详细研究,该复配基质完全能够满足植物生长的需求。曾维等^[41]使用60%磷石膏+5%生物质炭+10%赤泥+10%菌渣混匀,5%生石灰作为中间层,10%菌渣作为底层复配了一种磷石膏基质,黑麦草在该基质中生长状况良好,和对照组相比发芽率提高了33%左右,且黑麦草75 d株高能达到35.09 cm,比对照组提高了29.7%。

2.3 作为矿坑生态修复充填材料

我国矿产资源较为丰富,大量开采矿石资源后矿山会留下采空区,易造成地质灾害,采空区常采用充填法修复,但充填材料成本较高,不适用于修复低经济价值矿采空的矿坑^[42]。我国磷石膏产量大,将磷石膏制作成矿井充填材料,既能解决磷石膏的综合利用问题,也能对矿坑进行低成本的修复。

潘祖德等^[43]以75%磷石膏、10%粉煤灰、10%硅酸盐水泥、5%赤泥为原料,在水灰比0.2、外加0.5%的高效减水剂的条件下制备了磷石膏基矿井充填材料,其浆料的流动度和抗压强度均能满足矿坑充填材料的要求;李剑秋等^[44]将半水磷石膏、二水磷石膏和碱性激发剂以质量比1.00:0.20:0.03,在料浆 $w(\text{固})$ 69%的条件下设计了一款磷石膏基充填材料,该材料已经用于实践,其3 d强度高于0.5 MPa,且浸出水的污染物浓度满足国家污水排放I级标准(GB 8978—1996);蔺东飞等^[45]在磷石膏、固硫灰、水泥熟料质量比30:63:7,外掺1.1%的水玻璃,胶砂比1:2,料浆 $w(\text{固})$ 为78%的条件下开发了一款磷石膏基充填材料,其工作性能良好,7 d和28 d无侧限抗压强度分别为1.06 MPa和4.48 MPa。

云南及贵州等省已经在积极探索将磷石膏作为矿坑充填材料。云天化集团有限责任公司有

1.03 km²遗留磷矿坑,该集团根据磷石膏的性质,添加4%~6%的改性剂,将磷石膏与改性剂搅拌混合后,存放14 d,控制磷石膏浸出液中磷质量浓度低于0.5 mg/L,氟质量浓度低于10 mg/L,pH在6~9。回填之后覆膜并覆上泥土,即可恢复矿山生态环境,覆土后恢复为农用地0.209 km²,恢复林地0.818 km²,矿山生态环境得到极大改善。

3 磷石膏土壤改良及生态修复利用技术比较和问题分析

磷石膏土壤改良及生态修复利用方式优缺点对比见表3。由表3可知,磷石膏在土壤改良与修复领域展现出显著的利用潜力,但其大规模推广利用还需详尽的土壤学与生态学考量。在土壤改良层面,磷石膏不仅能够有效应对酸性土壤与盐碱化问题,还有作为肥料的应用价值。其改良酸性、碱性

土壤的机制核心在于通过增加土壤中的Ca²⁺浓度,进而降低可交换性Al³⁺、Na⁺的含量,但是磷石膏自身呈酸性,改良土壤pH时效果有限,为克服此局限,将磷石膏与碱性改良剂(如碱性生物炭、粉煤灰等)复配使用^[46-47],不仅能显著提升土壤pH,还能有效抑制Al³⁺活性,同时增强土壤肥力,促进作物增产。然而,鉴于磷石膏资源主要集中于湖北、云南、贵州及四川等地,其大规模生产土壤改良剂或者磷石膏肥料还需权衡运输成本因素。此外,磷石膏在重金属污染土壤治理、土壤生态修复基质制备及矿坑回填等方面展现出独特价值。尽管其应用前景广阔,但当前技术体系尚不完善,限制了其大规模推广。磷石膏土地利用过程中潜在的污染物泄漏风险也不容忽视,在使用中应当对污染物进行固化后再利用。

表3 磷石膏不同土壤改良及生态修复利用方式优缺点对比

Table 3 Comparison of the advantages and disadvantages of soil improvement and ecological restoration utilization methods of phosphogypsum

土地利用方向	土地利用方法	优点	缺点
土壤改良	改良酸性土壤	有效减少土壤可交换Al ³⁺	磷石膏本身呈酸性,难以控制施放量
	改良盐碱土壤	盐碱改良效果好	磷石膏产地受限,运输成本高
	磷石膏肥料	充分利用磷石膏中营养元素	技术不成熟,大量施加可能有环境风险
生态修复	修复重金属污染土壤	钝化重金属,修复被污染土壤	磷石膏本身含有一定的重金属,技术尚不完善
	土壤生态修复基质	大规模利用磷石膏,能替代表面土壤	磷石膏中钙含量高,可能存在板结情况,技术仍有待提高
	矿坑生态修复材料	大规模利用磷石膏	技术尚不完善,存在磷、氟泄漏风险

4 展望

我国磷石膏产生量逐年上升,综合利用率却处于较低水平,大量磷石膏亟待有效消纳。除在建材、化工领域的应用外,深入探索磷石膏在土壤环境中的多元化利用路径显得尤为迫切。当前,磷石膏在土地直接利用方面的比例相对较低,其作为土壤改良剂或特定肥料的功能虽已显现,但仅能消纳有限的磷石膏。因此,积极开拓磷石膏作为矿坑充填材料及土壤生态修复基质等大规模消耗途径显得至关重要。总体来说,磷石膏土地利用今后应聚焦以下方面。

(1) 完善磷石膏土壤改良剂相关技术,以磷石膏为主要原料,复配其他材料改性磷石膏,充分利用磷石膏中有益元素,固定磷石膏有害元素,实现可推广、低风险、低成本的磷石膏土壤改良剂。

(2) 积极探索磷石膏在矿坑充填材料及土壤生态修复基质方面的应用,尽快构建完善的行业标准体系与操作指南,为现场实施提供指导。

(3) 强化磷石膏土地利用全过程的环境监测与

风险管理体系,是实现其生态效益与经济效益双重目标的关键保障,特别需关注的是磷石膏中潜在污染物的有效控制,以防止对地下水资源及周边土壤环境造成不利影响。

综上所述,磷石膏的土地利用策略须全面考量其理化性质、生态环境影响以及经济效益,通过综合评估与科学规划,达成环境友好与经济可行的双赢局面。

[参考文献]

- [1] 项子豪,孙昌平,陈思凡,等.磷石膏综合利用现状及其功能化应用浅析[J/OL].无机盐工业,1-15.https://doi.org/10.19964/j.issn.1006-4990.2025-0065.
XIANG Z H, SUN C P, CHEN S F, et al. A review on current status and functional applications of phosphogypsum [J/OL]. Inorganic Chemicals Industry, 1-15. https://doi.org/10.19964/j.issn.1006-4990.2025-0065.
- [2] 谭善宜,文惠子,何淑玉,等.磷石膏中磷的浸出行为及其动力学研究[J].无机盐工业,2025,57(2):105-112.
TAN S Y, WEN H Z, HE S Y, et al. Study on leaching behavior and kinetics of phosphorus from phosphogypsum [J]. Inorganic

- Chemicals Industry, 2025, 57(2): 105–112.
- [3] 梁德强, 王凯, 张铭, 等. 微波法快速测定磷石膏含水率研究[J]. 建材世界, 2024, 45(3): 10–14.
LIANG D Q, WANG K, ZHANG M, et al. Study on rapid determination of moisture content of phosphogypsum by microwave method[J]. The World of Building Materials, 2024, 45(3): 10–14.
- [4] 姜国庆, 高璐阳, 肖晨星. 磷石膏资源利用进展分析[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(10): 31–34.
JIANG G Q, GAO L Y, XIAO C X. Progress in utilization of phosphogypsum resources[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(10): 31–34.
- [5] 罗栋源, 吴海霞, 杨子杰, 等. 磷石膏水洗液中磷、氟、有机物的去除[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(5): 129–137.
LUO D Y, WU H X, YANG Z J, et al. Removal of phosphorus, fluorine and organic matter from phosphogypsum washing solution[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(5): 129–137.
- [6] 王玉龙, 李金娟, 李晨, 等. 磷石膏堆场周边土壤中重金属污染特征及环境风险评估[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(2): 57–59.
WANG Y L, LI J J, LI C, et al. Characteristics and environmental risk Assessment of heavy metal pollution in soil surrounding phosphogypsum storage yard [J]. China Water Transport, 2022, 22(2): 57–59.
- [7] WU F. The treatment of phosphogypsum leachate is more urgent than phosphogypsum [J]. Environmental Research, 2024, 262: 119849.
- [8] 黄慧琼. 遏止全球土壤退化刻不容缓[J]. 生态经济, 2021, 37(2): 5–8.
HUANG H Q. The urgency of halting global soil degradation[J]. Ecological Economy, 2021, 37(2): 5–8.
- [9] 向春雨, 罗栋源, 郭莉, 等. 植物-微生物联合修复化学退化土壤研究进展[J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 288–300.
XIANG C Y, LUO D Y, GUO L, et al. Advances in plant-microbial combined remediation of chemically-degraded soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(1): 288–300.
- [10] 吴道铭, 傅友强, 于智卫, 等. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治[J]. 土壤, 2013, 45(4): 577–584.
WU D M, FU Y Q, YU Z W, et al. Status of red soil acidification and aluminum toxicity in south china and prevention[J]. Soils, 2013, 45(4): 577–584.
- [11] 赵学强, 潘贤章, 马海艺, 等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1248–1263.
ZHAO X Q, PAN X Z, MA H Y, et al. Scientific Issues and Strategies of Acid Soil Use in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1248–1263.
- [12] 胡文君, 游春燕, 牛二利, 等. 土壤酸化条件下植物响应铝毒时钙与铝交互作用的研究进展[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(12): 3048–3052.
HU W J, YOU C Y, NIU E L, et al. Research progress on the interaction between calcium and a luminumin plant response to aluminum toxicity under soil acidification [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2024, 65(12): 3048–3052.
- [13] 李嘉琦, 卢维宏, 韩云昌, 等. 磷石膏改性及其在酸性土壤调控中的应用研究[J]. 磷肥与复肥, 2021, 36(10): 16–20.
LI J Q, LU W H, HAN Y C, et al. Study on modification of phosphogypsum and its application in acid soil regulation [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2021, 36(10): 16–20.
- [14] 肖厚军. 磷石膏矫治酸性黄壤的效应及机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
XIAO H J. Effect of phosphogypsum on acidic yellow soil and its mechanism[D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [15] 温元波. 磷石膏对黄壤酸性和铝形态的影响及机制研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
WEN Y B. Effect of phosphogypsum on acidity and aluminumform of yellow soil and its mechanism [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [16] 肖厚军, 王正银, 何佳芳, 等. 酸性黄壤施用磷石膏对高粱营养生长和膜保护酶的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 637–642.
XIAO H J, WANG Z Y, HE J F, et al. Effect of phosphogypsum on nutrient balance and membrane defense enzyme of broomcorn in strongly acidic soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(4): 637–642.
- [17] BOURAY M, MOIR J, CONDRON L, et al. Impacts of phosphogypsum, soluble fertilizer and lime amendment of acid soils on the bioavailability of phosphorus and sulphur under lucerne (medicago sativa)[J]. Plants, 2020, 9(7): 883.
- [18] WANG X R, LI C, SHI Y R, et al. Improvements in saline soil and the law of water-salt transport based on salt inhibition using MICP technology[J]. Biogeotechnics, 2024, 2(1): 100055.
- [19] XU X, WANG J H, TANG Y M, et al. Mitigating soil salinity stress with titanium gypsum and biochar composite materials: Improvement effects and mechanism [J]. Chemosphere, 2023, 321: 138127.
- [20] 徐鑫. 基于磷石膏的土壤改良剂对盐碱地的改良和安全性评价[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
XU X. Improvement and safety evaluation of phosphogypsum-based soil amendment in mitigating soil salinity stress [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [21] SMAOUI M, KRIAA W, MAALEJ M, et al. Effect of the phosphogypsum amendment of saline and agricultural soils on growth, productivity and antioxidant enzyme activities of tomato (Solanum lycopersicum L.) [J]. Ecotoxicology, 2017, 26(8): 1089–1104.
- [22] 展争艳, 顾生芳, 展成业. 施用磷石膏对甘肃引黄灌区重度盐碱地改良效果研究[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(3): 61–64.
ZHAN Z Y, GU S F, ZHAN C Y. Study on the improvement effect of applying phosphogypsum on severe saline alkali land in Gansu Yellow River irrigation area [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2021, 41(3): 61–64.
- [23] LU G R, FENG Z H, XU Y, et al. Impact of Phosphogypsum Application on Fungal Community Structure and Soil Health in Saline-Alkali-Affected Paddy Fields [J]. Agronomy-Basel, 2023, 13(11): 2726.
- [24] 龙谨, 杨凤龙, 吴钦雪, 等. 磷石膏对土壤的性能影响研究综述[J]. 广州化工, 2021, 49(19): 35–37.
LONG J, YANG F L, WU Q X, et al. Study on effects of phosphogypsum on soil properties [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(19): 35–37.
- [25] 崔帅, 刘烁然, 王寅, 等. 吉林省旱地土壤有效硫含量及其与土

- 壤有机质和全氮的关系[J].中国农业科学,2022,55(12):2372-2383.
- CUI S, LIU S R, WANG Y, et al. Soil available sulfur content in Jilin province and its correlation with soil organic matter and soil total nitrogen[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(12):2372-2383
- [26] 安景文,陈秋,侯成山.磷石膏作为肥料的增产效果及改碱作用的初探[J].辽宁农业科学,1993(2):15-18.
- [27] NAYAK A K, MISHRA V K, SHARMA D K, et al. Efficiency of phosphogypsum and mined gypsum in reclamation and productivity of Rice-Wheat cropping system in sodic soil [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(5):909-921.
- [28] ZWOLINSKI J, JOHNSTON M, KOTZE H. Soil treatments for improved timber production in Pinus radiata plantations in South Africa [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 171(1):199-207.
- [29] 朱雅琪,巫静,余震,等.我国农田土壤重金属污染现状及治理研究进展[J].现代农业科技,2024(5):115-118,125.
- ZHU Y Q, WU J, YU Z, et al. Current situation and control research progress on heavy metal pollution in farmland soil in China [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(5):115-118,125
- [30] 樊建琼.农田土壤重金属污染现状及治理措施[J].农业与技术,2023,43(24):94-96.
- FAN J Q. Current situation and control measures of heavy metal pollution in farmland soil [J]. Agriculture and Technology, 2023, 43(24):94-96.
- [31] MAHMOUD E K, ELKADER N A. Heavy Metal Immobilization in Contaminated Soils using Phosphogypsum and Rice Straw Compost [J]. Land Degradation & Development, 2015, 26(8):819-824.
- [32] 杨花,齐佳敏,李彬.磷石膏改良土壤研究进展[J].磷肥与复肥,2023,38(5):40-44.
- YANG H, QI J M, LI B. Research progress of phosphogypsum in soil improvement [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(5):40-44.
- [33] MA M, XU X, HA Z, et al. Deep insight on mechanism and contribution of arsenic removal and heavy metals remediation by mechanical activation phosphogypsum [J]. Environmental Pollution, 2023, 336:122258.
- [34] MAHMOUD E K, ELKADER N A. Soil Immobilization of Heavy Metal Using Soil Amendments in a Greenhouse Study [J]. Compost Science & Utilization, 2013, 21(3-4):156-163.
- [35] REN Z, WANG L, WANG H, et al. Solidification/stabilization of lead-contaminated soils by phosphogypsum slag-based cementitious materials [J]. Science of the Total Environment, 2023, 857:159552.
- [36] 孙媛媛.几种钝化剂对土壤砷生物有效性的影响与机理[D].北京:中国农业大学,2015.
- SUN Y Y. The mechanisms of soil chemical amendments on arsenic bioavailability [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [37] 王敏,陈昭乐,王敏慧,等.基于污泥堆肥产物与余泥渣土制备的人工土壤的理化性质分析与评价[J].环境工程学报,2024,18(1):245-252.
- WANG M, CHEN Z L, WANG M H, et al. Analysis and evaluation of physical and chemical properties of artificial soil prepared from sludge compost products and residual sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(1):245-252.
- [38] 王运长,李金娟,解田,等.磷石膏改良基质中Cd、Zn在蔬菜内的富集和迁移特征[J].中国农学通报,2012,28(13):271-275.
- WANG Y C, LI J J, XIE T, et al. The characteristics of enrichment and migration of Cd and Zn in vegetables planted in improved phosphogypsum matrix [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(13):271-275.
- [39] 李木俊,吴永贵.磷石膏、粉煤灰及活性污泥在绿化基质中的应用技术研究[J].贵州化工,2010,35(3):1-6.
- LI M J, WU Y G. The research of phosphogypsum, fly ash and activated sludge application technology in the green medium [J]. Guizhou Chemical Industry, 2010, 35(3):1-6.
- [40] LIU Y, ZHANG L, CHEN L, et al. Potential of artificial soil preparation for vegetation restoration using red mud and phosphogypsum [J]. Science of the Total Environment, 2024, 941:173553.
- [41] 曾维,尹辉,刘方,等.改良磷石膏对黑麦草生长及渗滤液的影响[J].非金属矿,2023,46(3):28-32.
- ZENG W, YIN H, LIU F, et al. Effect of modified phosphogypsum on the growth of ryegrass and leachate filtration [J]. Non-Metallic Mines, 2023, 46(3):28-32.
- [42] 李剑秋,李子军,王佳才,等.磷石膏充填材料与技术发展现状及展望[J].现代矿业,2018,34(10):1-4,8.
- LI J Q, LI Z J, WANG J C, et al. Development status and prospect of phosphogypsum filling material and technique [J]. Modern Mining, 2018, 34(10):1-4,8.
- [43] 潘祖德,刘琦,曹阳,等.磷石膏基矿井充填材料制备及其性能研究[J].无机盐工业,2022,54(11):90-95.
- PAN Z D, LIU Q, CAO Y, et al. Study on preparation and properties of phosphogypsum based mine filling materials [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(11):90-95.
- [44] 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.
- [45] 蔺东飞,刘尚各.磷石膏基尾矿胶结充填材料研究[J].建筑施工,2023,45(11):2286-2288.
- LIN D F, LIU S G. Study on phosphogypsum-based tailings cemented filling material [J]. Building Construction, 2023, 45(11):2286-2288.
- [46] 杨尽,龚艺.贫瘠土壤改良剂的配制及应用研究[J].安徽农业科学,2010,38(8):4142-4145.
- YANG J, GONG Y. Study on preparation and application of poor soil amendment [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(8):4142-4145.
- [47] 舒艺周.磷石膏和生物质炭联合改良云南红壤的试验研究[J].磷肥与复肥,2019,34(12):40-42.
- SHU Y Z. Experimental study on effect of both phosphogypsum and biochar in Yunnan red soil [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2019, 34(12):40-42.