

磷石膏在喀斯特农田土壤改良中的应用及其环境影响评估

覃东明^{1,2}, 王敬富^{2,3}, 胡鑫平^{2,3}, 刘勇⁴, 杨姣姣^{2,3}, 李单昊^{2,5}, 朱治强^{1,*}

(1. 海南大学热带农林学院,海口 570228; 2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室,贵阳 550081; 3. 中国科学院大学,北京 100049; 4. 贵阳学院 生物与环境工程学院,贵阳 550005; 5. 西安理工大学 水利水电学院,西安 710048)

摘要: 磷石膏固废污染治理与资源化利用是我国西南喀斯特地区磷化工产业可持续发展的关键技术挑战。探索磷石膏改良当地土壤的方法对于规模化消纳磷石膏固废具有重要的潜在价值。尽管如此,磷石膏添加对土壤理化性质的具体影响尚未得到充分阐明。本研究采用净化磷石膏和原状磷石膏,针对喀斯特地区黄壤进行了改良和土柱淋滤实验研究。实验结果显示,在磷石膏改良作用下,黄壤的pH平均下降0.59~3.09个单位,含水率增幅为4.9%~30.0%,而总磷含量显著增加,从190 mg/kg增至5 768 mg/kg。同时,土壤中总氮和总钾的含量轻微下降。无论是添加净化磷石膏还是原状磷石膏,黄壤中的Pb(铅)、Cr(铬)、Cd(镉)、As(砷)等潜在有毒重金属含量均维持在农用地土壤污染风险管制值以下。淋滤实验结果显示,少量添加净化处理的磷石膏在提升黄壤磷含量的同时,保持了较低的磷流失量,而未经净化处理的磷石膏增肥效果更显著,但伴随较高的磷流失量,增加了“二次污染”的风险。因此,净化后的磷石膏用于改良喀斯特土壤,在提高土壤的保水性和养分含量,有效控制重金属污染风险等方面具有一定的应用潜力。

关键词: 磷石膏;喀斯特;土壤改良;磷;重金属

中图分类号: S156 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3724/EE.1672-9250.2024.52.042

磷石膏作为湿法磷酸生产过程中的固体废弃物^[1],其主要成分为硫酸钙,亦含有磷、氟及微量重金属等杂质^[2]。我国磷石膏的固废堆存量已超过8亿吨^[3],且每年新增量超过6 000万吨,这不仅占据了宝贵的土地资源,还导致了严重的水体污染问题^[4-6]。特别是在西南喀斯特地区,作为我国磷化工产业的集中区,磷石膏的堆存量已超过4亿吨,其强酸性渗滤液与该地区的碳酸盐岩发生反应,曾引发乌江洋水河、瓮安河及34号泉等多起严重的水污染事件,这些事件已被中央环保督察列为重点督办案例。因此,磷石膏污染的治理与资源化利用,成为制约我国西南喀斯特地区磷化工产业可持续发展的关键技术难题。

目前,我国磷石膏的综合利用率不足50%^[4,7-8],主要应用于建材、水泥缓释剂和路基填充材料等领域。由于产品性能限制和运输半径的制约,磷石膏资源化产品尚未实现大规模应用^[9]。磷石膏中含有对植物生长有益的磷、钙、铁、硅、铝、硫等元素,通过制备成土壤改良

剂、土壤调理剂和缓释肥料,可有效提升土壤的肥力^[3,10-11]。此外,磷石膏所含的多种离子可用于中和酸性土壤中的Al³⁺,减少铝污染^[8]。由于富含钙离子,磷石膏还能与土壤中的阴离子反应,降低碱性土壤中的交换性钠离子含量,有效改良盐碱地^[12-14]。作为一种高效的保水剂,磷石膏的吸水性使其能够提高土壤含水率,减少水分流失^[15]。然而,磷石膏中除了含有土壤所需的养分外,还包含氟、砷及其他重金属杂质,这些成分可能对土壤性质产生负面影响^[16-17]。因此,将磷石膏用于土壤改良时,必须严格监控其有害杂质含量及其迁移活性,防止在降雨等自然条件下污染物的流失,避免对地表水和地下水造成二次污染^[18-20]。

鉴于磷石膏在改良当地土壤中展现出的应用潜力,本研究通过开展不同类型磷石膏的土壤改良和土柱淋滤实验,旨在深入探讨磷石膏添加对土壤理化性质的影响,全面评估磷石膏改良土壤的安全性与潜在风险,以为磷石膏的土壤化应用提供坚实的科学依据。

收稿日期: 2024-04-30; 改回日期: 2024-07-05

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才-YQK[2023]034); 国家重点研发计划项目(2023YFF0806000); 贵州省科技支撑计划(一般项目)项目(黔科合支撑[2023]一般097)。

第一作者简介: 覃东明(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为磷石膏改良土壤。email: dongming0812@qq.com。

*通信作者: 朱治强(1979—),男,教授,研究方向为土壤污染与修复、作物植物营养与施肥。email: zqzhu@hainanu.edu.cn。

© Editorial office of Earth and Environment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

实验所用磷石膏样本均源自贵州省黔东南福泉市的一家磷石膏生产企业。根据处理工艺的不同,磷石膏被分为两种主要类型:第1种是经过净化处理的磷石膏(记为净化磷石膏, JH), 其处理工艺涵盖了磁浮选、筛分、脱酸以及除铁等关键步骤^[21], 这一过程有效去除了磷石膏中的有机质、硅、铁及部分磷元素等成分; 第2种为未经任何工艺处理的原状磷石膏(记为未净化磷石膏, WJH), 与净化磷石膏相比, 它保留了较多的有机质、硅、铁等原始组分。

实验中所用的土壤样本采集自贵州省贵阳市红枫湖周边的耕作区域, 该地区的土壤类型被归类为黄壤。在实验操作前, 对采集的土壤进行了晾干处理, 并精心去除了其中的植物残体、石块等非土壤成分。关于土壤和磷石膏的活性磷、总磷、总钾、总氮和重金属含量等详细理化性质, 见表1。

表1 土壤和磷石膏的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil and phosphogypsum

指标	土壤	净化磷石膏(JH)	未净化磷石膏(WJH)
pH	6.63	4.82	1.86
有效磷/(mg/kg)	31.89	96.90	1 667.10
总磷/(mg/kg)	1 021.44	4 353.94	2 0581.31
总钾/(mg/kg)	7 094.82	359.49	3 862.19
总氮/(mg/kg)	1 548.13	50.00	100.00
Pb/(mg/kg)	29.99	4.72	9.55
Cr/(mg/kg)	70.74	14.15	21.61
Ni/(mg/kg)	37.03	3.52	4.81
Cu/(mg/kg)	28.97	1.23	3.68
Zn/(mg/kg)	108.95	7.64	18.69
As/(mg/kg)	70.42	25.08	35.62
Cd/(mg/kg)	0.63	0.03	0.07

1.2 土柱淋滤实验

本实验采用柱状装置来模拟土壤在表层水渗透时的特征。具体步骤如下: 首先, 在直径为150 mm的有机玻璃管底部铺设一层透水石, 随后将经过筛选的干净土壤和与磷石膏混合的土壤分两层均匀填充于管中, 每层的填充高度精确为200 mm。实验中, 使用去离子水对土样进行渗透模拟, 淋溶量参照贵州省的年均降水量进

行设定, 即1 000~1 400 mm。基于此, 实验中总淋溶量设定为平均1.7 L, 分3次对土柱进行淋滤。每次淋滤的时间间隔为10天, 淋滤量为0.55 L, 每次淋滤时, 以土柱最上层土壤湿润但没有积水为准。土柱装置底部放置收集装置收集滤液。并在室温条件下对这些土样进行了为期30天的养护。此外, 实验共设置了9组不同磷石膏添加量的改良土壤处理(见表2), 每组处理重复3次。实验结束后, 将土样取出, 并按照10 cm的厚度进行分层取样。采集到的土壤样本经过冷冻干燥处理, 随后研磨至均匀。研磨后的土壤样本通过60目筛网进行筛分, 以确保粒度的一致性。最后, 将过筛后的土壤样本存放于-20 °C的低温环境中, 以备后续分析使用。

表2 不同处理中磷石膏的添加量

Table 2	Addition of phosphogypsum in different treatments			%
处理	土壤	净化磷石膏	未净化磷石膏	
CK	100	0	0	
JH	JH1	75	25	0
	JH2	50	50	0
	JH3	25	75	0
	JH4	0	100	0
WJH	WJH1	75	0	25
	WJH2	50	0	50
	WJH3	25	0	75
	WJH4	0	0	100

1.3 样品分析方法

采用由氢氟酸和硝酸组成的浓酸混合液对土壤样品进行彻底消解处理^[22]。消解后的土壤溶液中总钾含量的测定是通过电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES)来进行的^[23]。此外, 利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对溶液中的镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)、铜(Cu)、铬(Cr)、镍(Ni)和锌(Zn)等重金属含量进行精确测定。

土壤样品的pH通过电极法进行测定, 其中土壤与水的比例严格控制为1:5。土壤中总磷的含量则通过碱熔-钼锑抗分光光度法进行定量分析。为了提取土壤中的有效磷, 采用碳酸氢钠提取法^[24]。最后, 使用有机元素分析仪(Elementar-vario MACRO)对土壤样品中的总氮含量进行测定^[25]。

1.4 数据处理及分析

试验数据使用Microsoft Excel 2020、SPSS 27软件进行统计分析, 采用OriginLab Origin 2023b软件绘制图表。

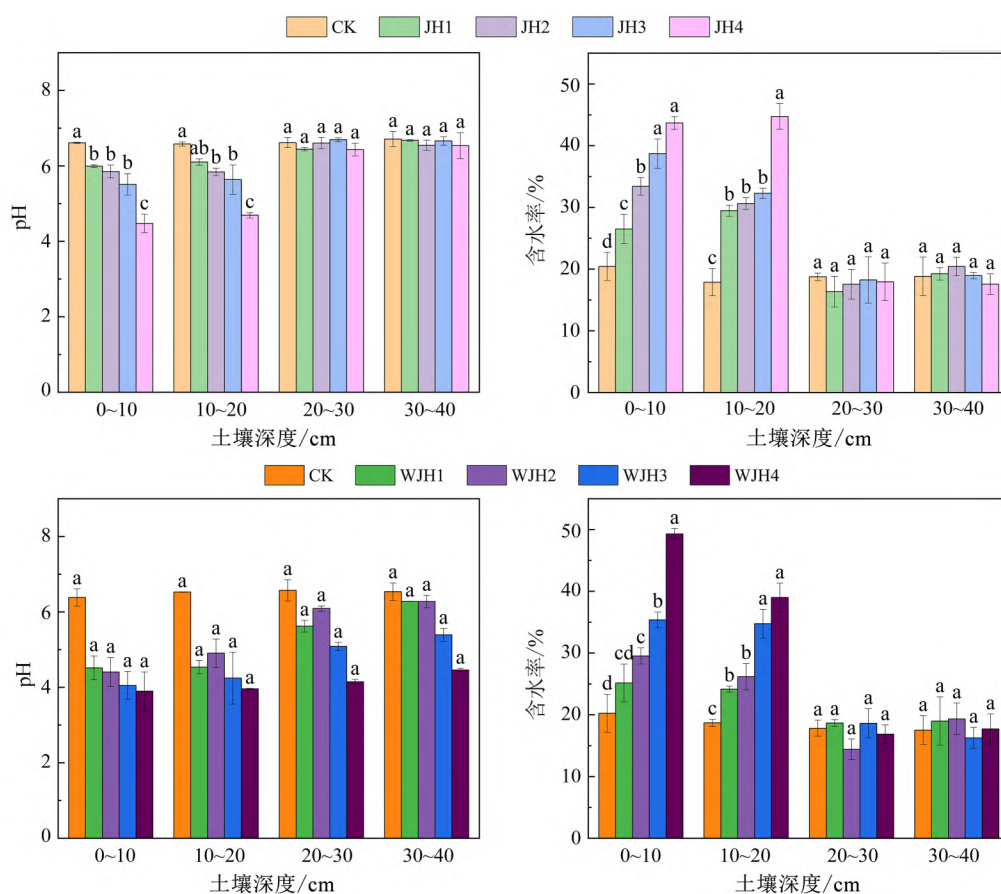
2 结果与讨论

2.1 磷石膏改良对喀斯特黄壤pH及养分剖面分布的影响

在本研究中,我们通过模拟渗滤实验评估了磷石膏改良土壤对环境的潜在影响,并详细分析了改良土壤pH及养分含量的剖面分布特征。图1清晰地展示了磷石膏对土壤pH和含水率的淋滤效应。实验数据显示,0~20 cm土层的土壤含水率随着磷石膏添加比例的增加,呈现出明显的上升趋势,从24.2%增至49.3%。特别是JH4和WJH4处理条件下,含水率增加幅度分别高达131.7%和155.3%。这证实了磷石膏具有出色的保水性能,能够显著提高土壤的持水能力。在20~40 cm土层中,含水率的变化并不显著,与对照组CK的结果相近。磷石膏处理后土壤具有更高的含水率,能吸收并保留水分,这可能是磷石膏拥有较细的颗粒,在使用磷石膏改良处理后,土壤毛管孔隙增加,表面积大,对水分具有较大的吸附力,磷石膏中的一些成分对水分有结合作用。土壤含水率对植物吸收水分的能力有直接影响^[26],当

土壤水分过低时,植物将无法有效吸收水分,导致水分缺乏。因此,磷石膏改良后的土壤较高的含水率有利于植物对水分的吸收和利用。

土壤的pH是评价土壤肥力的一个关键性指标,它直接关系到土壤中养分元素的形态、有效性^[27-28],以及土壤生物过程,包括酶活性、微生物活动和植物生长等^[29]。实验结果表明,在0~20 cm土层中,随着磷石膏添加比例的增加,土壤pH呈现下降趋势。具体来看,JH处理的土壤pH介于4.30~6.04之间,与对照组CK相比,下降了8.9%~35.1%;而WJH处理的土壤pH则在3.54~4.64之间,相比CK降低了30.0%~46.6%。这一结果表明,经过净化处理的磷石膏对土壤pH的影响相对较小,而未净化磷石膏则对土壤pH有较大影响,这与磷石膏的原始pH密切相关。净化磷石膏的pH高于未净化磷石膏,且土壤对pH的变化具有一定的缓冲性。在相同的淋滤条件下,净化磷石膏对底层土壤pH的影响较小,而未净化磷石膏由于较低的pH,在向下渗透时更容



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图1 磷石膏添加比例对土壤pH及含水率剖面分布的影响

Fig.1 Effect of phosphogypsum addition rate on the profile distribution of soil pH and water content

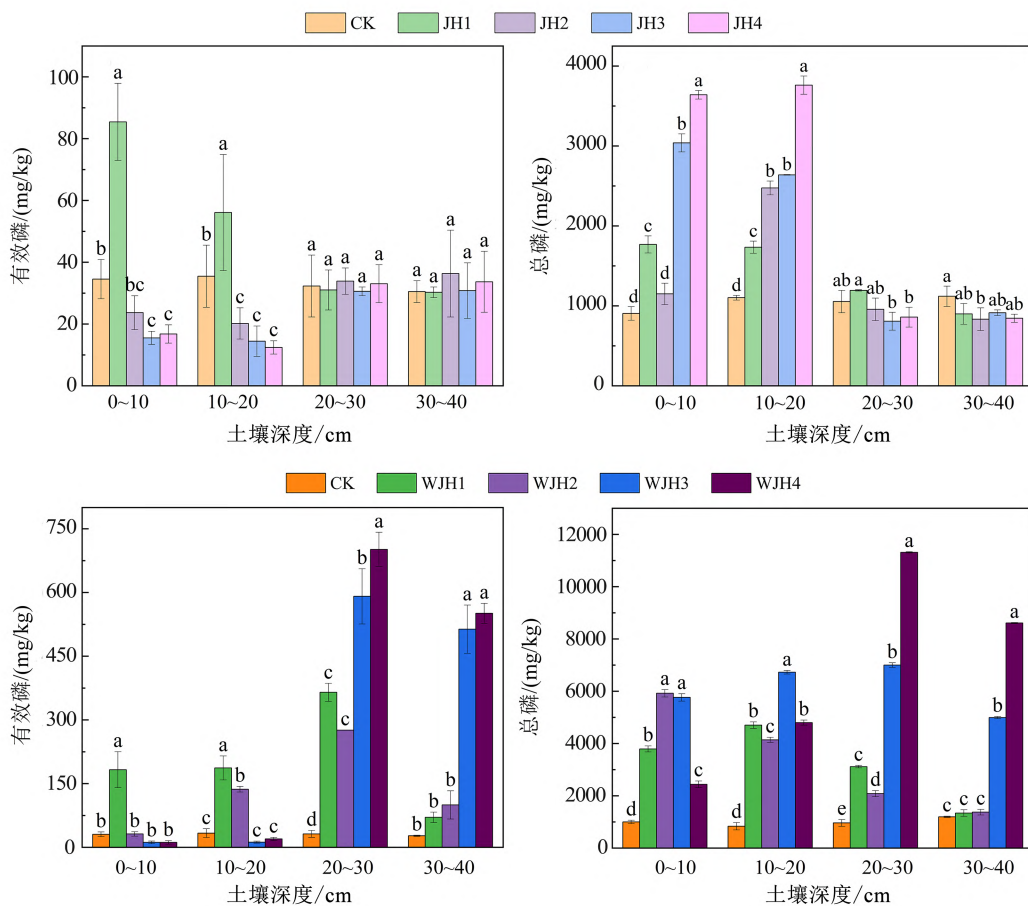
易影响底层土壤的pH。

土壤pH对植物生长至关重要,大多数植物在过酸或过碱的土壤条件下难以正常生长。此外,土壤pH还影响养分元素的转化与供应,在pH低于5时,活性铁(Fe)和铝(Al)的增加可能导致磷酸根与之结合形成不溶性沉淀,从而降低土壤中磷的有效性。当pH处于6~7的范围内时,土壤对磷的固定作用最弱,磷的有效性达到最高。在本实验中,JH1和JH2处理的土壤pH处于5.73~6.29之间,此时土壤中的铁(Fe)、铝(Al)、钙(Ca)对磷的固定作用较弱,对磷的有效性影响较小。

土壤中有有效磷是指植物可以直接吸收利用的磷形态,这通常包括易于溶解和吸附的正磷酸盐。根据图2所示的数据,在0~20 cm土层中,土壤有效磷含量随着磷石膏添加量的增加呈现先增加后减少的趋势,在添加磷石膏后,土壤的pH降低和渗透等原因,使得原本增加的有效磷一部分被固定在土壤中,另一部分随着渗滤液流

失,呈现磷石膏添加比例增加而有效磷含量下降的现象。在JH1和WJH1处理条件下,有效磷含量达到最高值,分别为85.43和186.92 mg/kg。在JH处理系列中,总磷含量与磷石膏添加量之间存在正相关关系;在WJH处理中,总磷含量则随添加量的增加呈现先增加后减少。在20~40 cm土层中,JH处理的土壤有效磷含量未见显著变化,而总磷含量则略有下降;WJH处理的土壤有效磷和总磷含量随着磷石膏添加比例的增加而上升,在WJH4处理条件下含量最高,分别为701.37和11 311.59 mg/kg。

实验结果进一步表明,JH1处理在0~20 cm土层中有有效磷和总磷显著增加,相比之下,其余净化磷石膏处理总磷含量有增加的趋势,但有效磷含量却减少了。未净化磷石膏(WJH)处理在0~40 cm土层中,有效磷和总磷含量均有提升,这表明未净化磷石膏虽然能够提高土壤的磷含量,但由于磷随着水分渗透向土壤深层移动,增加了磷



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图2 磷石膏添加比例对土壤有效磷及总磷含量影响的剖面分析

Fig.2 Profile analysis of the effect of phosphogypsum addition rate on available phosphorus and total phosphorus content of soil

流失的风险。实验结果与尹元萍等^[30]的研究结果相似,施用磷石膏能增加土壤中有效磷以及总磷的含量,胡兆明等^[31]发现,在淋滤后,磷石膏中的磷会随着渗滤液一起流失,未净化磷石膏中磷等含量较高,易于流失,净化磷石膏中的磷较少,在土壤中能留存下来,增加土壤肥力。

图3的数据显示,在添加磷石膏之后,0~20 cm深度土壤的总钾和总氮含量显著下降,且随着磷石膏添加比例的增加,总钾和总氮含量呈现负相关。总钾含量范围为443.9~6 436.9 mg/kg,总氮含量范围为45~1 490 mg/kg。当磷石膏添加比例超过50%时,总钾和总氮的平均减少量超过40%。然而,在20~40 cm深度土壤中,总钾和总氮的含量相对稳定。磷石膏中钾和氮的含量较低,在大量与土壤混合后,会导致土壤中钾和氮含量的降低,在使用磷石膏改良土壤时,应配合增施氮肥和钾肥。

2.2 磷石膏改良对土壤重金属含量的影响

实验结果显示,不同比例的磷石膏添加对土壤中重

金属含量有显著影响。在施用磷石膏改良土壤后,检测到的镉(Cd)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、铬(Cr)和砷(As)等重金属元素含量普遍降低,且随着磷石膏添加量的增加,重金属含量的降低幅度也随之增大(表3、4)。具体来看,所有样品中均可检测到这些重金属元素,其中铅的含量范围为6.15~32.12 mg/kg,铬的含量范围为10.06~82.50 mg/kg,镍的含量范围为2.37~42.78 mg/kg,铜的含量范围为2.69~51.97 mg/kg,锌的含量范围为7.20~129.17 mg/kg,砷的含量范围为14.29~88.65 mg/kg,镉的含量范围为0.03~0.73 mg/kg。

由于磷石膏中重金属含量低于土壤自然背景值,改良后的土壤重金属含量相应降低。在混合土壤样品中,铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、铬(Cr)等重金属的检出值均低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[32]规定的土壤污染风险筛选值,表明其生态风险较低。对于镉(Cd)和砷(As),

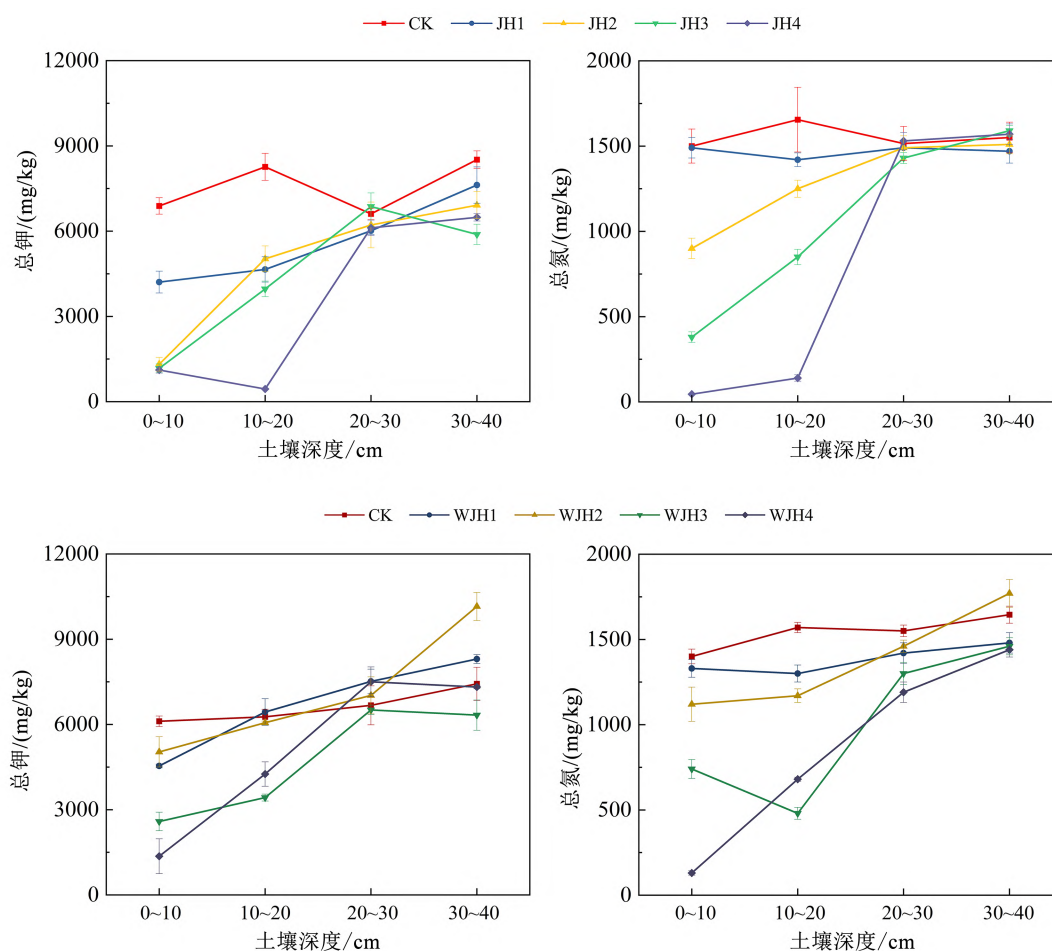


图3 磷石膏添加对土壤总钾和总氮含量影响的分析

Fig.3 Effect of phosphogypsum addition on total potassium and total nitrogen content of soil

表3 净化磷石膏添加对土壤重金属含量影响的详细分析

Table 3 Effect of purified phosphogypsum addition on soil heavy metal content

处理	土壤深度/cm	Pb	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd
		mg/kg						
CK	0~10	30.99	67.26	35.25	28.75	107.05	69.10	0.63
	10~20	29.51	64.19	34.57	28.77	106.45	71.30	0.58
	20~30	29.51	61.17	33.62	27.53	101.33	61.40	0.60
	30~40	25.96	79.69	40.72	28.47	118.22	66.65	0.55
JH1	0~10	11.67	37.72	21.63	16.13	53.43	42.89	0.34
	10~20	14.39	66.95	34.30	15.55	52.61	43.38	0.36
	20~30	29.29	67.75	36.27	29.57	113.36	67.32	0.54
	30~40	29.01	67.62	35.33	27.64	106.53	68.83	0.59
JH2	0~10	9.73	36.51	9.61	8.52	23.74	14.78	0.15
	10~20	12.03	52.01	20.37	12.53	45.07	37.11	0.28
	20~30	28.49	60.97	35.69	27.30	103.28	63.09	0.66
	30~40	27.95	61.08	33.99	27.48	102.85	68.77	0.61
JH3	0~10	6.50	10.06	4.15	3.27	12.41	18.55	0.09
	10~20	10.70	46.75	19.57	10.96	47.12	34.42	0.31
	20~30	28.04	54.63	31.27	25.49	94.39	65.73	0.63
	30~40	27.90	82.50	40.89	26.12	98.71	62.07	0.64
JH4	0~10	7.03	24.73	8.20	3.66	11.79	16.35	0.05
	10~20	6.15	13.72	3.07	3.42	8.41	14.48	0.03
	20~30	28.44	79.55	41.56	27.53	100.54	72.91	0.54
	30~40	28.92	70.50	38.59	30.45	105.29	72.19	0.62

注:表中数据为平均值,n=3。

表4 未净化磷石膏添加对土壤重金属含量影响的分析

Table 4 Effect of unpurified phosphogypsum addition on soil heavy metal content.

处理	土壤深度/cm	Pb	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd
		mg/kg						
CK	0~10	28.73	78.71	35.15	27.57	101.17	65.92	0.67
	10~20	32.12	70.52	39.39	30.55	115.25	81.88	0.73
	20~30	31.79	81.79	41.59	30.74	111.20	75.73	0.71
	30~40	31.33	62.60	35.96	29.39	110.89	71.38	0.59
WJH1	0~10	16.40	63.07	26.26	17.88	59.98	49.05	0.40
	10~20	15.73	54.47	25.15	18.12	57.39	43.26	0.33
	20~30	29.53	66.07	36.80	29.47	103.05	75.25	0.71
	30~40	30.71	68.17	37.14	33.15	110.95	73.10	0.70
WJH2	0~10	12.98	43.14	18.31	12.54	42.28	38.67	0.23
	10~20	13.64	49.75	24.85	17.85	57.87	45.84	0.35
	20~30	26.90	65.78	35.06	25.59	98.26	66.02	0.56
	30~40	30.21	70.00	35.61	51.97	102.78	88.65	0.62
WJH3	0~10	10.87	21.50	5.34	6.33	22.15	23.72	0.13
	10~20	11.33	29.38	7.12	7.13	21.77	27.01	0.12
	20~30	28.15	63.88	40.43	26.94	129.17	72.85	0.67
	30~40	27.96	72.11	42.78	27.78	111.60	75.72	0.56
WJH4	0~10	11.36	18.34	2.37	2.69	7.20	14.29	0.06
	10~20	11.76	28.70	7.51	8.25	17.62	25.02	0.07
	20~30	29.28	69.26	38.24	27.88	113.71	76.47	0.61
	30~40	30.14	65.74	38.09	27.65	111.12	73.99	0.63

注:表中数据为平均值,n=3。

尽管其含量超过了土壤污染风险筛选值,但仍未超过土壤污染风险管制值,说明当前条件下,磷石膏改良土壤对环境安全的风险是可控的。特别是在0~20 cm土层中,Cd、Pb、Cu、Zn、Ni、Cr、As等重金属含量均显著降低。而在20~40 cm土层中,所有处理组的重金属含量与对照组(CK)相比未发生显著变化,这表明磷石膏添加后,重金属在土壤中未发生明显的迁移流失。有研究发现,在施用磷石膏后土壤中的Cd、Pb、Zn、Ni、Cr等重金属含量没有增加,均在安全范围中,在较低用量时,重金属含量没有在土壤中积累,在长期施用条件下还需进一步研究确定合理的施用量^[33-35]。刘珊等^[36]则研究发现,磷石膏中的重金属会在堆放过程中渗透转移到深层土壤中,造成重金属积累,而本实验中,暂时未明显发现重金属元素往底层土壤渗透或积累。

3 结论

磷石膏在喀斯特黄壤改良中的应用展现出积极的前景,尤其在提升土壤的保水能力和肥力方面表现出显著的改良效果。在本研究中,施用磷石膏能够显著增加土壤的含水率,同时可以提高土壤中有效磷和总磷的含

量,显示出磷石膏在土壤改良方面的有效性。此外,磷石膏的应用还有助于降低土壤中的重金属含量,所有改良后的土壤样品中重金属含量均低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的国家农用地土壤污染风险筛选值的要求,表明其生态风险较低。使用净化磷石膏进行土壤改良时,磷和重金属的流失风险较低。未净化磷石膏改良土壤虽然在磷素增肥效果上更为显著,重金属元素流失并不明显,但存在磷流失问题。磷石膏中残留的氟(F)等元素也会对土壤微生物、植物和环境造成影响,在利用磷石膏改良土壤时还需要关注氟(F)在土壤中的变化。综合考虑,净化磷石膏可以作为一种土壤改良剂,在提升土壤质量和降低环境风险方面具有较好的应用效果,并为磷石膏的规模化利用提供了可行的途径。磷石膏作为土壤改良剂的应用可通过实施特定的前处理方法,如通过化学或物理方法降低磷石膏中活性磷和总磷的含量,以进一步减少施用后可能发生的磷流失问题。此外,建议科学制定磷石膏改良土壤的相关标准和规范,确保磷石膏的土壤化应用环保和高效,为磷石膏的可持续利用提供坚实的科学依据。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 白海丹.我国磷石膏综合利用形势及对策建议[J].磷肥与复肥,2020,35(12):1-3.
- [3] 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.
- [4] 叶学东.2018年我国磷石膏利用现状、问题及建议[J].磷肥与复肥,2019,34(7):1-4.
- [5] 付强强,沈彦辉,陈宏坤,等.磷石膏综合利用现状及建议[J].磷肥与复肥,2020,35(8):44-46.
- [6] 徐振华,黄绪泉,刘立明.磷石膏制硫酸联产水泥过程中的碳排放核算[J].磷肥与复肥,2022,37(2):46-48.
- [7] 赵明星,霍鹏臣,郭今错,等.磷石膏环境问题和资源化利用初探[J].当代化工研究,2024(4):68-70.
- [8] 邓华,侯硕旻,李中军,等.磷石膏综合利用现状及展望[J].无机盐工业,2024,56(1):1-8,22.
- [9] 龚晓强.磷石膏改性水泥砂浆的性能研究[D].武汉:武汉轻工大学,2020.
- [10] 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.
- [11] 许敬敬,张乃明.磷石膏的农业利用研究进展[J].磷肥与复肥,2017,32(9):34-38.
- [12] 张丽辉,孔东,张艺强.磷石膏在碱性土壤改良中的应用及效果[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2001,22(2):97-100.
- [13] 王舒华,陈爽,王悦,等.有机改良剂配施磷石膏的盐碱土改良效果研究[J].江苏农业科学,2022,50(11):227-233.
- [14] 黄迪,宗荣荣,马航,等.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.
- [15] 官娅莉,陈静曦,李洪飞.磷石膏对盐碱土的改良研究[J].内蒙古环境科学,2008,20(1):59-61.
- [16] Elmeknassi M, Elghali A, de Carvalho H W P, et al. A review of organic and inorganic amendments to treat saline-sodic soils: emphasis on waste valorization for a circular economy approach[J]. Science of the Total Environment, 2024, 921: 171087.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 李佳宜,施泽明,唐瑞玲,等.磷石膏堆场对周围农田土壤重金属含量的影响[J].中国非金属矿工业导刊,2010(5):52-55.
- [20] Ammar R, Kanbar H J, Kazpard V, et al. Role of phosphogypsum and NPK amendments on the retention or leaching of metals in different soils[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 178: 20-29.
- [21] 杨再祥,何金泉,雷勇,等.一种化工废渣深度净化处理工艺:2021115948844[P].2021-12-23.

- [22] Bing H J, Liu Y, Huang J C, et al. Dam construction attenuates trace metal contamination in water through increased sedimentation in the Three Gorges Reservoir[J]. *Water Research*, 2022, 217: 118419.
- [23] 蒋旭升, 刘杰, 李海翔, 等. 复垦铅锌矿尾砂库的植被恢复和基质演变[J]. *环境工程*, 2021, 39(12): 220–226.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [25] 李馨怡, 王北辰, 熊雄, 等. 青海湖岸带土壤与沉积物的地化特征与细菌群落对水位上升的响应[J]. *微生物学报*, 2023, 63(6): 2312–2329.
- [26] 杨乐, 龙兰, 艾施荣, 等. 植物根系吸水模型研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(4): 1326–1337.
- [27] 李春情, 屈用函, 农全东, 等. 基于主成分和聚类分析的云南文山典型石漠化区土壤肥力分析[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(1): 66–72.
- [28] 毛伟, 李文西, 高晖, 等. 扬州市耕地土壤pH值30年演变及其驱动因子[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 883–893.
- [29] Václavková Š, Šyc M, Moško J, et al. Fertilizer and soil solubility of secondary P sources—the estimation of their applicability to agricultural soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(17): 9810–9817.
- [30] 尹元萍, 舒艺周, 董文汉, 等. 连续3年施用磷石膏对红壤理化性质的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(9): 2187–2192.
- [31] 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.
- [32] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [33] 严建立, 章明奎, 王道泽. 磷石膏与石灰石粉配施对新垦红壤耕地的改良效果[J]. *农学学报*, 2022, 12(7): 33–37.
- [34] 王成宝, 崔云玲, 郭天文, 等. 磷石膏的农业应用及其安全性评价[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2): 408–412.
- [35] Liu Y, Zhang L S, 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.
- [36] 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.

Application of Phosphogypsum as Soil Amendment in Karst Farmlands and Its Environmental Impact Assessment

QIN Dongming^{1,2}, WANG Jingfu^{2,3}, HU Xinping^{2,3}, LIU Yong⁴,
YANG Jiaojiao^{2,3}, LI Danhao^{2,5}, ZHU Zhiqiang¹

(1. Hainan University, School of Tropical Agriculture and Forestry, Haikou 570228, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. College of Biological and Environmental Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China;

5. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The management of phosphogypsum solid waste pollution and resource utilization pose key technical challenges for the sustainable development of the phosphate chemical industry in Southwest China's karst regions. Investigating methods for using phosphogypsum to improve local soils has significant potential value for the large-scale disposal of phosphogypsum solid waste. Nonetheless, the specific impacts of phosphogypsum addition on soil physical and chemical properties have not been fully elucidated. This study conducted amendment and soil column leaching experiments on the yellow soils of karst farmlands using purified phosphogypsum and crude phosphogypsum. The experimental results show that under the influence of phosphogypsum amendment, the pH value of the yellow soil decreased by 0.59 to 3.09 units on average, the moisture content increased by 4.9% to 30.0%, and the total phosphorus content significantly increased from 190 mg/kg to 5 768 mg/kg. Simultaneously, minor declines were observed in the content of total nitrogen and total potassium in the soil. Whether purified phosphogypsum or crude phosphogypsum was added, the contents of potential toxic heavy metals such as Pb (lead), Cr (chromium), Cd (cadmium), and As (arsenic) in the yellow soil remained below the risk control values for soil pollution in agricultural lands. The results of the leaching experiments showed that the addition of a small amount of purified phosphogypsum could increase the phosphorus content in loess while maintaining low phosphorus losses, while the treatment with unpurified phosphogypsum, although more effective in fertilizer enhancement, was accompanied by higher phosphorus losses, thus increasing the risk of "secondary pollution". Therefore, the purified phosphogypsum used to improve karst soil has a certain application potential in improving the water retention and nutrient content of the soil and effectively controlling the risk of heavy metal pollution.

Keywords: phosphogypsum; karst areas; soil amendment; phosphorus; heavy metals