

磷石膏基质中添加辣椒秸秆生物炭对柳枝稷生长的影响

徐秀月¹, 向彩霞², 邱林艳¹, 陆天兰¹, 刘晓焱¹, 密淑豪¹,
钟闯闯¹, 刘英³, 高业朋¹, 向仰州^{1*}

¹贵州师范学院地理与资源学院, 贵州 贵阳

²兴义市清水河镇初级中学, 贵州 兴义

³贵州师范学院生物科学学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年9月9日; 录用日期: 2023年10月10日; 发布日期: 2023年10月17日

摘要

生物炭调节磷石膏作为能源植物生长基质, 既可有效利用磷石膏, 又可提供可再生能源。本文以磷石膏、辣椒秸秆生物炭、柳枝稷为供试材料, 按0, 1%, 2.5%, 5%, 10%, 20%质量比配置生物炭-磷石膏混合基质种植柳枝稷, 研究生物炭对磷石膏栽培基质理化特性及柳枝稷生长的影响。结果表明: 磷石膏栽培基质的含水量、pH、速效磷和速效钾随辣椒秸秆生物炭用量的增加而增加, 碱解氮含量随生物炭用量增加呈先增加后降低趋势; 辣椒秸秆生物炭用量介于2.5%~5%对柳枝稷生长有较好的促进作用。这说明适量的生物炭可以改良磷石膏, 从而促进柳枝稷的生长。本实验结果为磷石膏及辣椒秸秆的资源化利用提供了一种有效途径。

关键词

辣椒秸秆, 生物炭, 磷石膏, 柳枝稷, 理化性质

Effects of Biochar Produced from Chili Straw on Physicochemical Properties of Phosphogypsum and Switchgrass Growth

Xiuyue Xu¹, Caixia Xiang², Linyan Qiu¹, Tianlan Lu¹, Xiaoyi Liu¹, Shuhao Mi¹,
Chuangchuang Zhong¹, Ying Liu³, Yepeng Gao¹, Yangzhou Xiang^{1*}

¹School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang Guizhou

²Qingshuihe Town Junior High School, Xingyi City, Xingyi Guizhou

³School of Biological Sciences, Guizhou Education University, Guiyang Guizhou

*通讯作者。

文章引用: 徐秀月, 向彩霞, 邱林艳, 陆天兰, 刘晓焱, 密淑豪, 钟闯闯, 刘英, 高业朋, 向仰州. 磷石膏基质中添加辣椒秸秆生物炭对柳枝稷生长的影响[J]. 土壤科学, 2023, 11(4): 204-210. DOI: 10.12677/hjss.2023.114024

Abstract

Biochar regulating phosphogypsum as an energy plant growth substrate, not only can effectively utilize phosphogypsum, but also provide renewable energy. In this study, phosphogypsum, chili straw biochar and switchgrass were used as test materials. Switchgrass was planted with biochar-phosphogypsum mixed substrate at 0, 1%, 2.5%, 5%, 10% and 20% mass ratio. The effects of biochar on the physicochemical properties of phosphogypsum substitute and the growth of switchgrass were investigated. The results showed that the moisture, pH, available phosphorus and available potassium of the phosphogypsum substrate increased with the increasing the amount of chili straw biochar, and the alkali-hydrolyzable nitrogen content increased first and then decreased with the increase of the amount of biochar. The loads of chili straw biochar between 2.5%~5% have a good promoting effect on switchgrass growth. The results of our study showed that an appropriate amount of biochar can improve physicochemical properties of phosphogypsum substitute, and thereby promoting the growth of switchgrass. Therefore, in conclusion, our study provides an effective way for the resource utilization of phosphogypsum and chili straw.

Keywords

Chili Straw, Biochar, Phosphogypsum, Switchgrass, Physicochemical Property

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磷石膏是采用湿法从磷矿石中提取磷酸后排放的固体废物。相关研究表明每生产 1 t 磷酸排放大约 5 t 磷石膏[1]。湿法工艺产生的磷石膏具有较强酸性,同时含有镉、铅、汞、氟等有毒元素[2]。因此磷石膏管理不善容易对堆场周边土壤、水体、农作物等造成危害[3] [4] [5] [6] [7],甚至有可能出现有毒有害物质通过食物链危及人体[8] [9]。当前,磷石膏无害化处理技术成本高,且综合利用率比较低,因而严重制约着磷化工产业的可持续发展[10]。为了减少磷石膏对环境的负面影响,磷石膏资源化利用受到极大关注[10] [11] [12]。例如,利用磷石膏生产各种建材[13] [14],从磷石膏中提取稀土元素[15] [16],利用磷石膏作为土壤改良剂[17] [18]。然而,上述这些磷石膏利用途径使用的磷石膏较小,有必要寻找其它的利用方式。

磷石膏中含有磷、钙、硫、硅等元素,可为植物生长提供必要的营养元素。由于能源植物基本不进入食物链,因此把磷石膏开发为能源植物的栽培基质可能是一种较好的利用途径。然而磷石膏具有强酸性、团粒结构极差等缺点,有必要采用碱性调节剂进行改良。生物炭是有机废弃物在低氧或限制氧气条件下,经过热解而形成的富碳且多孔的材料,具有较强碱性,可用作酸性栽培基质的调节剂。辣椒是贵州省及多个周边省市的主要调料作物,栽培面积大,但产生的秸秆也很多。若将辣椒秸秆就地还田容易滋生病虫害,对后茬作物产生危害;若焚烧辣椒秸秆,容易对大气造成污染。因此,辣椒秸秆加工成生物炭,既可消除附着在秸秆上的虫卵和病菌,又可作为磷石膏等酸性介质的改良剂,可有效促进辣椒产

业的绿色发展。

柳枝稷作为一种能源植物,在全球的栽培面积巨大[19],已有研究报道柳枝稷在治理矿山取得较好的效果[20]。然而,迄今未见在磷石膏中添加辣椒秸秆生物炭后栽培柳枝稷的研究。因此,有必要研制辣椒秸秆生物炭与磷石膏合理配比以便较好地促进柳枝稷生长,从而为磷石膏和辣椒秸秆的资源化利用提供理论参考。

2. 材料与方法

2.1. 供试材料

1) 柳枝稷种子来自中国农业大学动物科技学院草地研究所,品种名“Blackwell”。2) 磷石膏来自瓮福化工公司独田磷石膏综合利用工业场地。3) 辣椒秸秆来自晴隆县碧痕镇新坪村合作社辣椒种植基地。4) 生物炭:将辣椒秸秆在室内自然风干,用粉碎机粉碎,在马弗炉中厌氧、350℃条件下炭化2 h,过筛2 mm后装袋备用。

2.2. 试验设计

本盆栽实验在贵州师范学院大棚中开展。实验用盆的尺寸为塑料材质,高11.5 cm,上口内径20.5 cm,下底内径9.5 cm。实验设置5个辣椒秸秆生物炭与磷石膏质量添加比例,即1%,2.5%,5%,10%,20%五个处理,分别用C1,C2.5,C5,C10,C20表示,同时以纯磷石膏为对照(CK),每个处理设3次重复。将不同比例的生物炭与磷石膏混合均匀,每盆加入1 kg的混合基质。基质装盆后浇透水,静置24 h。

选取大小均一、健康饱满的柳枝稷种子,首先用去离子水洗净,然后用50%的酒精溶液消毒30 s,再次用去离子水冲洗3次。将消毒洗净后的种子置于玻璃杯中,去离子水浸种12 h。播种量为20粒/盆,深度为1 cm。在柳枝稷生长过程中,观测生长情况并及时浇水,生长90 d后采集植株、基质样品。

2.3. 样品采集与处理

1) 柳枝稷:先用自来水清洗植株上附着的杂质,然后再用去离子水清洗3次;将柳枝稷放在试验的烘箱内,调节烘箱温度在105℃的条件中杀青30 min,接着在75℃下烘干至恒重称干重;2) 株高:卷尺测量所有柳枝稷植株高度,再求平均值;3) 含水量:取适量基质放到铝盒中,称取铝盒和烘干基质重,将其放入烘箱,烘干后用电子天平称铝盒+烘干基质重量,计算质量含水量;4) pH:用电子pH计测量基质的pH值(水、土比为2.5:1);5) 碱解氮采用碱解扩散法测定;6) 有效磷含量采用0.5 mol·L⁻¹碳酸钠浸提-钼锑抗分光光度法测定;7) 速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定。参照文献[21]中的方法测定碱解氮、速效磷和速效钾。

2.4. 数据处理与分析

在Microsoft Excel 2016软件中整理原始数据,用DPS 19.05软件[22]对各处理组作单因素方差分析,同时选用LSD法检验不同处理之间的差异($P < 0.05$)。

3. 结果与分析

3.1. 生物炭对磷石膏基质理化特性的影响

从表1可知,磷石膏基质含水量随辣椒秸秆生物炭用量的增加而增加,其中添加量为20%的生物炭处理含水量最大,为8.66%,从生物炭用量为5%到20%的基质含水量与对照含水量均有显著差异($P < 0.05$)。基质pH随生物炭用量增加而增加,其中生物炭用量为20%的处理pH最大,为6.73。与对照pH相比,

生物炭用量在 1% 以上均对磷石膏 pH 有显著促进作用 ($P < 0.05$)。磷石膏基质碱解氮随生物炭用量增加呈先增加后降低趋势, 其中生物炭用量为 1% 的处理碱解氮最高, 而生物炭用量为 5% 以上的处理碱解氮含量均小于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 除 2.5% 和 5% 的生物炭处理外, 其余处理碱解氮含量与对照间存在显著差异 ($P < 0.05$)。各处理速效磷含量随生物炭用量增加呈先增加后减少趋势, 其中生物炭用量为 10% 的处理速效磷含量最大, 为 $1335.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。添加生物炭的 5 个处理的速效磷含量与对照均存在显著差异 ($P < 0.05$)。基质速效钾含量随生物炭用量呈线性增加趋势, 其中生物炭用量为 20% 的处理速效钾含量最大, 为 $96.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。添加生物炭在 2.5% 以上处理的速效磷含量与对照均存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Table 1. The effect of different treatments on physicochemical properties of phosphogypsum substrate
表 1. 不同处理对磷石膏基质理化特性的影响

处理	含水量(%)	pH	碱解氮($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	5.73 c	4.13 d	78.01 a	583.71 c	4.93 d
C1	5.91 c	5.26 c	84.52 a	943.63 b	13.22 d
C2.5	5.41 c	5.78 bc	77.43 a	939.72 b	39.04 c
C5	7.31 b	6.2 ab	53.89 b	1324.33 a	69.84 b
C10	8.66 a	6.54 a	58.52 b	1335.21 a	88.65 a
C20	7.93 ab	6.73 a	59.73 b	1319.72 a	96.71 a

注: 同一列的不同小写字母表示处理间差异达到显著水平(LSD-test, $P < 0.05$)。

3.2. 不同处理对柳枝稷的影响

由表 2 可见, 磷石膏基质中添加辣椒秸秆生物炭显著增加了柳枝稷的株高 ($P < 0.05$), 且柳枝稷株高随生物炭用量增加呈先增加后降低趋势, 其中以生物炭用量为 5% 的处理植株最高。生物炭显著增加了柳枝稷的鲜重、干重 ($P < 0.05$), 随生物炭用量增加均呈现先升高后降低趋势, 其中生物炭用量为 2.5% 的处理柳枝稷鲜重、干重最大, 分别为 $10.62 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 、 $3.16 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 。柳枝稷根冠比随生物炭用量增加呈先增加后减小趋势, 其中生物炭用量为 2.5% 的处理柳枝稷根冠比最大, 为 0.84, 而 20% 的处理柳枝稷根冠比最小, 为 0.30。

Table 2. The effect of different treatments on switchgrass growth
表 2. 不同处理对柳枝稷生长的影响

处理	株高(cm)	鲜重($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)	干重($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)	根冠比
CK	3.78 b	0.12 c	0.05 d	0.78 a
C1	27.89 a	2.65 c	0.87 cd	0.8 a
C2.5	32.72 a	10.62 a	3.16 a	0.84 a
C5	33.61 a	6.67 b	2.11 abc	0.41 a
C10	32.85 a	7.11 b	2.28 ab	0.56 a
C20	30.1 a	6.75 b	1.69 bc	0.3 a

注: 同一列的不同小写字母表示处理间差异达到显著水平(LSD-test, $P < 0.05$)。

4. 讨论

磷石膏基质含水量受到基质物理结构、有机质等因素的影响[23]。生物炭为多孔介质,具有较强的吸水能力[24]。因此,磷石膏基质含水量随生物炭用量增加而增加。湿法工艺产生的磷石膏含有较多的 H^+ , 因而 pH 特别低[24]。生物炭呈强碱性,与磷石膏中的酸发生中和反应。因此,磷石膏基质的 pH 随生物炭用量增加而提高。低量生物炭可以促进氮循环微生物活性,从而增加氮素有效性[25]。较高用量生物炭改善磷石膏基质的环境以更适宜柳枝稷生长,但因柳枝稷吸收的氮超过生物炭与磷石膏释放的氮,从而导致碱解氮含量降低。因此,建议生物炭与氮肥配合施用,降低因生物炭用过多引起的氮限制。生物炭表面含有丰富的-COOH、-COH 和-OH 等含氧官能团,具有较大的交换能力[26]。磷石膏中添加生物炭后,含氧官能与铁、铝等结合,从而促进铁铝结合态磷的释放[27]。

新鲜磷石膏基质具有强酸性,且富含较多的有害物质,植物很难在其上健康生长[28]。磷石膏基质中添加辣椒秸秆生物炭后,提高了 pH,含水量以及速效养分,为柳枝稷的生长创造了良好的环境。因此,生物炭用量介于 2.5%~5% 对柳枝稷的生长比较理想。辣椒秸秆生物炭添加量在 10% 以上,柳枝稷生长出现降低趋势,这可能是因为过量的生物炭导致基质中 C:N 失衡,降低氮素有效性,从而抑制植物生长[29]。

5. 结论

1) 磷石膏中添加辣椒秸秆生物炭对含水量、pH 有显著提升作用,同时磷石膏基质含水量、pH 均随辣椒秸秆生物炭用量增加而增加。

2) 辣椒秸秆生物炭对磷石膏基质速效养分有显著影响,但 3 个养分指标的变化趋势有别,具体为较低用量辣椒秸秆生物炭显著增加速效氮含量,而较高用量生物炭显著减少速效氮,速效磷和速效钾含量随辣椒秸秆生物炭用量增加而增加。

3) 磷石膏基质中添加适量的辣椒秸秆生物炭对柳枝稷株高、鲜重、干重、根冠比有显著的正效应,其中以 5% 的生物炭用量对株高有最大提升作用,而 2.5% 的生物炭用量对鲜重、干重和根冠比有最大的促进效果。因本研究目标是获取最大的柳枝稷生物量,因此推荐 2.5% 的辣椒秸秆生物炭改良磷石膏。

4) 理想的矿山生态修复希望投入少、生态效益长,本研究只做了一个生长季,因此未来研究有必要做相对长期的观测研究,以便为磷石膏治理提供更加有效的治理建议。此外,有必要在本研究基础上做淋溶液试验,观测生物炭对磷石膏中重金属固定效果,从而筛选出既能显著促进柳枝稷生长,又能有效固定重金属的生物炭添加配比。

基金项目

贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2021] 246); 贵州师范学院 2020 年度校级科学研究基金博士项目(No. 2020BS020); 贵州师范学院科研项目(2020BS019); 贵州师范学院大学生自主研究科研项目(2021DXS004; 2021DXS005; 2021DXS006); 贵州师范学院大学生创新创业训练计划项目(202214223165)。

参考文献

- [1] Tayibi, H., Choura, M., López, F.A., Alguacil, F.J. and López-Delgado, A. (2009) Environmental Impact and Management of Phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*, **90**, 2377-2386. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.03.007>
- [2] Kuryatnyk, T., Angulski da Luz, C., Ambroise, J. and Pera, J. (2008) Valorization of Phosphogypsum as Hydraulic Binder. *Journal of Hazardous Materials*, **160**, 681-687. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.014>
- [3] 董春雨, 张好, 钟雄, 罗宏林, 杨海婵, 张乃明, 夏运生, 包立. 云南磷石膏堆存对区域水环境的影响研究[J]. 中

- 国农学通报, 2022, 38(27): 26-34.
- [4] 兰玉书, 石楷岐, 杨刚, 司艺阳, 程蓉. 磷石膏堆场周边水稻土重金属污染特征及稻米的人体健康风险分析[J]. 地球环境学报, 2021, 12(2): 224-231.
- [5] 刘珊, 吴丰辉, 瞿广飞, 赵晨阳, 陈帮金, 杨玉益. 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.
- [6] 王仙慧, 龙涛, 张建昆, 周春壮, 唐运来, 刘继恺. 土壤钝化剂对磷石膏污染土壤中 cd 的钝化修复效应[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(12): 68-71.
- [7] 谢荣, 吴永贵, 王晓睿, 杨开智, 王铁运. 磷石膏浸出液对斑马鱼的急性毒性及氧化应激损伤[J]. 环境科学学报, 2021, 41(3): 1101-1110.
- [8] Cao, J.Z., Wang, Z.Y., Ma, X.H., Yang, X.D., Zhang, X.H., Pan, H.Y., *et al.* (2022) Promoting Coordinative Development of Phosphogypsum Resources Reuse through a Novel Integrated Approach: A Case Study from China. *Journal of Cleaner Production*, **374**, Article ID: 134078. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134078>
- [9] Wang, C.Q., Wang, Z.Y., Huang, D.M., Huang, Q.C., Chen, Y., Zhang, H. and Shui, Z.H. (2023) Recovery and Recycling Core of Phosphogypsum: Characteristic Hazardous Elements Risk Assessment and Analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, **170**, 738-756. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.062>
- [10] Hu, X.P., Wang, J.F., Wu, F.X., Li, D.H., Yang, J.J., Chen, J.G., *et al.* (2023) Phosphorus Recovery and Resource Utilization from Phosphogypsum Leachate via Membrane-Triggered Adsorption and Struvite Crystallization Approach. *Chemical Engineering Journal*, **471**, Article ID: 144310. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144310>
- [11] Wu, F.H., Ren, Y.C., Qu, G.F., Liu, S., Chen, B.J., Liu, X.X., Zhao, C.Y. and Li, J.Y. (2022) Utilization Path of Bulk Industrial Solid Waste: A Review on the Multi-Directional Resource Utilization Path of Phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*, **313**, Article ID: 114957. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114957>
- [12] Yang, J., Liu, S.Y., Wang, Y.F., Huang, Y., Yuxin, S., Dai, Q.X., Liu, H.P. and Ma, L.P. (2022) Phosphogypsum Resource Utilization Based on Thermodynamic Analysis. *Chemical Engineering & Technology*, **45**, 776-790. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100590>
- [13] 付德进, 勾碧波, 李明东, 王海峰, 王家伟. 增强剂对磷石膏免烧建材的性能影响研究[J]. 无机盐工业, 2022, 54(2): 90-94.
- [14] 孙天琦, 秦绪江, 闵惜茗, 陈晓璇, 吴玉蓉, 刘荣. 磷石膏在建材行业的应用研究进展[J]. 广州化工, 2021, 49(10): 20-22+66.
- [15] 夏亮亮, 王玲, 杨国华, 李燊, 刘淑贤, 聂轶苗, 范晨子. 磷石膏中稀土元素溶解浸出研究进展[J]. 金属矿山, 2023(2): 126-134.
- [16] 余伟健, 管青军, 眭滢, 张方. 硫酸浸出磷石膏中稀土的动力学研究[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(5): 110-118.
- [17] 肖厚军, 王正银, 何佳芳, 苟久兰. 磷石膏改良强酸性黄壤的效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 62-66.
- [18] 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.
- [19] Kang, S.J., Nair, S.S., Kline, K.L., Nichols, J.A., Wang, D.L., Post, W.M., *et al.* (2014) Global Simulation of Bioenergy Crop Productivity: Analytical Framework and Case Study for Switchgrass. *GCB Bioenergy*, **6**, 14-25. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12047>
- [20] Novak, J.M., Ippolito, J.A., Watts, D.W., Sigua, G.C., Ducey, T.F. and Johnson, M.G. (2019) Biochar Compost Blends Facilitate Switchgrass Growth in Mine Soils by Reducing Cd and Zn Bioavailability. *Biochar*, **1**, 97-114. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00004-7>
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 唐启义. DPS 数据处理系统[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [23] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 眭彦伟, 温晓霞. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1009-1015.
- [24] 陈静, 李恋卿, 郑金伟, 俞欣妍, 潘根兴, 林振衡. 生物质炭保水剂的吸水保水性能研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 232-237.
- [25] 何秀峰, 赵丰云, 于坤, 杨湘, 王军武, 郁松林. 生物炭对葡萄幼苗根际土壤养分、酶活性及微生物多样性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 19-26.
- [26] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 779-785.

- [27] 巢军委, 王建国, 戴敏, 沈明星, 陆长婴. 生物炭对水稻土 olsen-p 的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4): 670-674.
- [28] 曾维, 尹辉, 刘方, 朱健, 贺宇, 翟念, 安娜娜, 赵菊. 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.
- [29] 朱盼, 应介官, 彭抒昂, 姜存仓. 生物炭和石灰对红壤理化性质及烟草苗期生长影响的差异[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(6): 590-595.