

硅灰石-硅酸钠-生物炭复合材料对酸性黄壤的改良研究

张传峰¹, 朱霞萍¹, 钟佳祺¹, 朱梓玲¹, 赵平², 任维²

(1. 成都理工大学材料与化学化工学院, 四川 成都 610059; 2. 贵州省地质矿产勘查
开发局 105 地质大队, 贵州 贵阳 550018)

摘要: 以硅灰石为基体材料, 添加一定量的油菜秸秆与硅酸钠, 高温煅烧制备硅灰石-硅酸钠-生物炭的复合材料 (Ca-Si-C), 并应用于酸性黄壤的改良。复合材料的较佳制备条件为硅灰石:油菜秆:硅酸钠的质量比为 7:1:2、在 600 °C 马弗炉煅烧 1.5 h。XRD、IR、SEM 表征结果表明, Ca-Si-C 复合材料表面负载有生物炭, 孔隙多, 且含较多的-OH、C≡C、-COOH、C-O 等官能团。施加 2% 的 Ca-Si-C 到 pH 值为 4.7 的黄壤, 相比于对照, 土壤的初始 pH 值增加 1.4 个单位; 酸害容量增加了 11.5 mmol/kg; 土壤中钠、钾的溶出量增大; 钙、镁、铝的溶出量降低; 土壤酸缓冲曲线与铝离子溶出曲线交点由 pH 值 3.5 增大至 4.1。Ca-Si-C 应用于酸性土壤改良, 具有良好的应用前景。

关键词: 硅灰石; 酸性土壤; 酸害容量; 盐基离子; 土壤改良

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.01.010

中图分类号: TD98 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 01-0095-08

引用格式: 张传峰, 朱霞萍, 钟佳祺, 等. 硅灰石-硅酸钠-生物炭复合材料对酸性黄壤的改良研究[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(1): 95-102.

ZHANG Chuanfeng, ZHU Xiaping, ZHONG Jiaqi, et al. Improvement of acidic yellow soil by wollastonite- sodium silicate- biochar composites[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(1): 95-102.

土壤酸化是指土壤中钙镁等盐基离子被交换性氢、铝离子替换后淋失的过程, 是一个较迟缓的自然成土过程。酸沉降是导致土壤酸化的主要原因之一, 但全球工业化进程加快导致的酸沉降增加, 农药、化肥的过量使用以及土地利用方式的不合理等人类活动也加快了土壤酸化过程^[1]。土壤酸化会增强土壤中金属离子的活性, 比如铝、铁、锰、铬和铅, 加重土壤重金属的危害^[2-3]。土壤酸化增强 Cd 等重金属的流动性, 促进了水稻等作物对 Cd 的吸收, 增加了 Cd 对人类的健康风险^[4]。土壤酸化会降低细菌和酶的活性, 减缓 C、N、P 和 S 在土壤中循环, 抑制作物对土壤养分的吸收, 从而降低作物产量^[5-7]。因此土壤酸化问题

已成为影响人类健康和经济社会可持续发展的全球性环境问题^[8]。

石灰价格便宜且产量丰富, 是国内外最常见的酸化土壤改良剂。但石灰本身具备一定的危害性, 投入量的疏忽很有可能造成农作物生长受抑制。靳辉勇等^[9]关于硅酸盐土壤调理剂的相关研究表明, 施用硅酸盐土壤调理剂可有效提高土壤 pH 值, 使土壤中有效态 Cd 含量降低了 55.4%, 蔬菜中 Cd 含量降低了 53.3%。庄钟娟等^[10]关于硅酸盐菌剂对水稻生物学性状及养分累积的影响研究表明, 硅酸盐菌剂可显著增加水稻主要生育时期养分含量, 水稻植株全氮增加 7.4%~31.7%, 全磷增加 7.4%~14.3%, 全钾增加 3.7%~

收稿日期: 2022-04-08

基金项目: 贵州省地质矿产勘查开发局科研项目 (No [2019]35)

作者简介: 张传峰 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为酸化土壤的治理。

通信作者: 朱霞萍 (1967-), 女, 博士, 教授, 研究方向为土壤、水体环境污染防控及修复技术。

18.3%，全硅增加 5.9%~7.9%。

生物炭的大分子结构属于苯环化，应用到土壤能使土壤具备一定程度的惰性，可缓解土壤酸化^[11]。生物炭具备比较高的 pH 值，施加到土壤中可以降低土壤酸度。生物炭还可以加快农作物吸收土壤中有效离子的效率，提升土壤的肥力，改善土壤的质量，促进作物生长^[12-13]。刘慧屿等^[14]研究表明，与常规施肥比，连续多年添加秸秆生物炭可以使土壤有机质增长 12.36%，土壤 pH 值增长 12.88%，促进土壤物理化学性质向良性循环方向发展。

硅酸钠可以提高酸性土壤的 pH 值，也可提供作物需要的硅，同时硅酸钠还可对土壤中重金属离子产生抑制作用。赵明柳等^[15]的研究表明，施用硅酸钠对抑制水稻吸收 Pb、Zn 具有一定效果，糙米中 Pb、Zn 含量分别降低了 20%~83%、6%~13%。刘鸣达等^[16]的研究观察到施硅使土壤酸可提取态和可还原态铅含量分别降低 11.18% 和 18.54%。

硅灰石在我国矿藏丰富，其主要成分为硅酸钙，含有植物生长所需的钙和硅元素，并且有一定的碱性，目前主要应用于陶瓷、塑料、橡胶、造纸等领域，在土壤修复方面还未见应用。本文

选择硅灰石为基体材料，添加一定量的油菜秸秆和硅酸钠，马弗炉高温煅烧，制备硅灰石-硅酸钠-生物炭复合材料（Ca-Si-C）。优化了材料的制备工艺，进一步将材料应用于酸性土壤，考查材料对土壤初始 pH 值、酸害容量以及盐基离子溶出的影响，为酸化土壤的治理提供技术支撑。

1 实 验

1.1 主要仪器与试剂

SHA-B 双功能水浴恒温振荡器；pHS-3C pH 计；AA-7001 原子吸收分光光度计；UV-5500 紫外可见分光光度计；85-2 恒温磁力搅拌器；马弗炉；微量进样器。

硫酸，硝酸，盐酸，无水乙醇，氯化钠，氯化钾，硫酸镁，氯化锰，乙酸，硅酸钠，硫酸铝钾，硫酸亚铁铵，十六烷基三甲基溴化铵，抗坏血酸，铬天青 S，冰乙酸，所用试剂均为分析纯。硅灰石，油菜秸秆。实验用水为蒸馏水。

1.2 酸化土壤基本情况

实验所用的土壤采自江西萍乡，属于黄壤，pH 值为 4.7，有机质含量为 5.09 mg/kg，阳离子交换容量为 12.91 cmol/kg。其主要机械组成和化学组成见表 1、2。

表 1 供试土壤机械组成
Table 1 Mechanical composition of the tested soil

项目	粘粒		粉粒		砂粒		
粒度/mm	-0.005	-0.01+0.005	-0.05+0.01	-0.075+0.01	-0.25+0.075	-0.5+0.25	-1.0+0.5
含量/%	43.10	11.10	28.80	5.60	9.40	0.90	1.10

表 2 供试土壤主要化学组成/%
Table 2 Main chemical composition of the tested soil

Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MnO	Na ₂ O	CaO	MgO
2.71	50.37	14.23	16.15	0.017	0.19	0.14	0.47

1.3 实验方法

1.3.1 Ca-Si-C 的制备方法

采集油菜杆，用清水洗净，烘干，剪碎。以硅灰石为基体材料，按照质量比添加油菜杆和硅酸钠，搅拌均匀，设置一定的时间以及温度，放置于马弗炉中煅烧。冷却后研磨过 200 目筛，密封保存于干燥器中备用。

1.3.2 Ca-Si-C 应用性能测试方法

土壤酸害容量是指土壤 pH 值达到植物致害参考阈值时，单位土壤所需酸量，它表示土壤对酸

的承受能力。王敬华等^[17]认为，作物致害的土壤 pH 阈值为 3.5。本文选取 pH 值为 3.5 时，单位土壤所需酸量作为土壤酸害容量。

pH 值测试方法：称取 10 g 土壤样品加入 Ca-Si-C 后摇匀，加 25 mL 蒸馏水，盖上保鲜膜。静置数天后，利用恒温磁力搅拌器搅拌 30 min，取下，测量此时土壤的 pH 值。用微量进样器加入一定量酸后继续搅拌，此后每隔 10 min 加一次酸，测定溶液的 pH 值。

盐基离子与铝离子的溶出和测定方法：称取 10 g 土壤样品加入 0.2 g 的 Ca-Si-C，混匀，加入 25 mL 蒸馏水。静置两天后，加入一定量的酸，室温振荡 0.5 h，离心。采用火焰原子吸收光谱法测定钾、钠、钙、镁，铬天青 S 分光光度法测

定铝。

2 结果与讨论

2.1 Ca-Si-C 制备工艺研究

2.1.1 制备温度对 Ca-Si-C 改良效果的影响

按照 1.3.1 所述实验方法，设置 400、500、600、700 °C 制备 Ca-Si-C 复合材料，按照 1.3.2 所述方法测其 pH 值，并绘制土壤酸缓冲曲线见图 1。

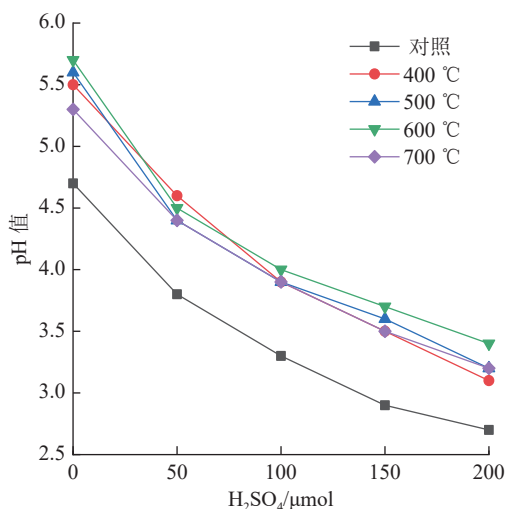


图1 制备温度对 Ca-Si-C 改良效果的影响

Fig.1 Effect of preparation temperature on improvement of Ca-Si-C

相比于对照，施加 Ca-Si-C 后土壤的酸缓冲曲线变得较为平缓，土壤的缓冲能力增强。施加 Ca-Si-C 后土壤的初始 pH 值以及酸害容量均明显增大。对照组土壤初始 pH 值为 4.7，酸害容量为 7.5 mmol/kg。相比于对照组，施加 400、500、600、700 °C 制备的 Ca-Si-C 后，土壤初始 pH 值分别增加至 5.5、5.6、5.7、5.3，酸害容量分别增加至 15、16、18、15 mmol/kg。pH 值最大增加了 1.0 个 pH 单位，酸害容量最大增长了 1.4 倍。煅烧温度超过 600 °C，土壤初始 pH 值以及酸害容量开始下降，可能是温度过高，部分碳化油菜杆被氧化成二氧化碳，影响了材料的应用性能。因此，制备 Ca-Si-C 的较佳温度为 600 °C。

2.1.2 制备时间对 Ca-Si-C 改良效果的影响

按照 1.3.1 所述实验方法，在 600 °C 煅烧 1、1.5、2、2.5、3 h 制备 Ca-Si-C，获得的土壤酸缓冲曲线见图 2。

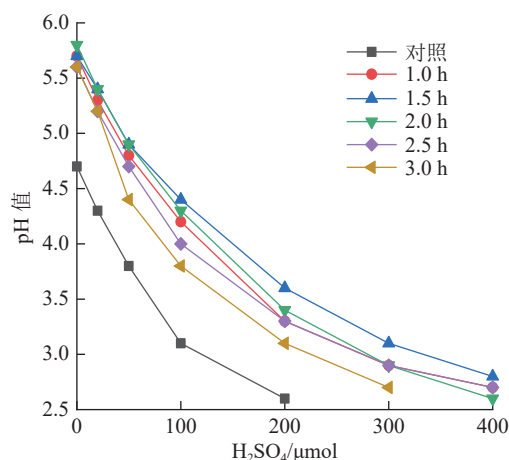


图2 制备时间对 Ca-Si-C 改良效果的影响

Fig.2 Effect of preparation time on the improvement of Ca-Si-C

相比于对照，施加 1、1.5、2、2.5、3 h 制备的 Ca-Si-C 复合材料使土壤初始 pH 值分别增加 1.0、1.0、1.1、0.9、0.9 个单位，酸害容量分别增加至 18、22、19、17、15 mmol/kg。综合材料对土壤初始 pH 值和酸害容量的影响，选择 Ca-Si-C 复合材料的较佳煅烧时间为 1.5 h。

2.1.3 物料质量比对 Ca-Si-C 改良效果的影响

确定硅灰石的用量为物料总量的 70%，分别施加油菜杆和硅酸钠，三种物料的质量比分别为 7:2:1 (WCS721)、7:1:2 (WCS712)、7:1.5:1.5 (WCS722)，在 600 °C 下煅烧 1.5 h 制备 Ca-Si-C 复合材料。获得的土壤酸缓冲曲线见图 3。

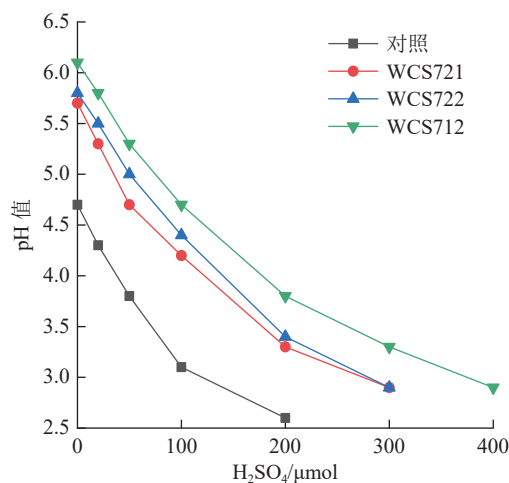


图3 物料质量比对 Ca-Si-C 改良效果的影响

Fig.3 Effect of material mass ratio on the improvement of Ca-Si-C

相较于对照，施加 WCS721 和 WCS712、WCS722 复合材料后土壤的酸缓冲曲线变得更加平

缓, 土壤的初始 pH 以及酸害容量均明显增大。土壤的初始 pH 值分别增大 1.0、1.4、1.1 个单位, 酸害容量分别增加至 17、25、19 mmol/kg。硅灰石:油菜杆:硅酸钠的质量比为 7:1:2 时, Ca-Si-C 具有较优的改良效果。

根据酸害容量大小将土壤划分为 4 个等级^[18]: 极易受害 (0~5 mmol/kg)、易受害 (5~20 mmol/kg)、稍易受害 (20~50 mmol/kg)、不易受害 (>50 mmol/kg)。添加 Ca-Si-C 复合材料后, 土壤的酸害容量从 7.5 mmol/kg 增加 25 mmol/kg, 从易受害变为稍易受害, 土壤缓冲能力明显增加。这是因为 Ca^{2+} 在质子缓冲中起着最重要的作用, 而硅灰石为 Ca-Si-C 提供了丰富的 Ca^{2+} , 能够提高土壤的缓冲能力。同时秸秆生成的生物炭和硅酸钠不仅能够提高土壤的 pH 值, 还能够提供植物生长所需要的 K 和 Si, 使土壤缓冲能力进一步增强。

综上, Ca-Si-C 复合材料的较佳制备条件为: 硅灰石:油菜杆:硅酸钠质量比为 7:1:2、煅烧温度 600 °C、煅烧时间为 1.5 h。

2.2 Ca-Si-C 材料的表征

2.2.1 X 射线-衍射 (XRD) 分析

图 4 是硅灰石和 Ca-Si-C 复合材料的 XRD。在 $2\theta=20.35^\circ$ 、 50.09° 、 59.88° 处出现了 $\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$ 的特征峰, 分别对应 $\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$ 的 (020)、(232)、(343) 晶面, 三个衍射峰都与 $\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$ 标准卡片 PDF#70-1916 相一致。 $2\theta=26.63^\circ$ 为 SiO_2 的特征衍射峰, 对应的晶面为 (011), 衍射峰与 SiO_2 PDF#85-0798 一致。与硅灰石相对比, Ca-Si-C 复合材料的 XRD 在 $2\theta=45.71^\circ$ 处出现 $\text{K}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ 的特征峰, 对应晶面为 (024), 与其标准卡片

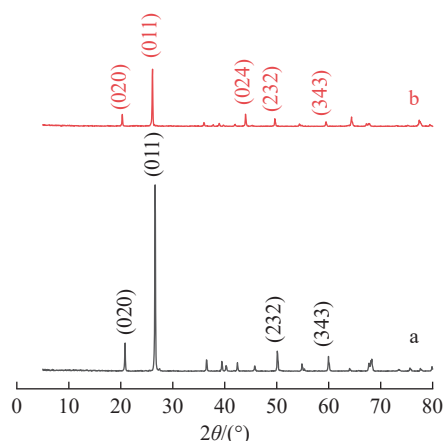


图 4 硅灰石 (a) 和 Ca-Si-C 材料 (b) 的 XRD
Fig.4 XRD patterns of wollastonite (a) and Ca-Si-C (b)

PDF#33-1495 相一致。可能高温灼烧条件下, 秸秆粉末与硅灰石作用, 部分生成了碳酸盐, 而碳酸盐具有很好的抵抗土壤酸化的能力。

2.2.2 红外光谱 (IR) 分析

对硅灰石和 Ca-Si-C 复合材料进行红外光谱分析见图 5, 在 $3\,236\sim3\,446\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,617\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是 -OH 的伸缩和弯曲振动; $1\,384\text{ cm}^{-1}$ 处为 CO_2 吸收峰。对比硅灰石, Ca-Si-C 复合材料在 $2\,000\sim2\,100\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰是 $\text{C}\equiv\text{C}$ 的伸缩振动; $1\,770\text{ cm}^{-1}$ 为 -COOH 的吸收峰; $1\,096\text{ cm}^{-1}$ 处宽而强的吸收峰为 Si-O 与 C-O 的伸缩振动; 780 cm^{-1} 处吸收峰为 Si-H 伸缩振动吸收峰; 694 cm^{-1} 处吸收峰为 Si-C 伸缩振动吸收峰。可见, Ca-Si-C 复合材料是以硅灰石为基体并且含有 -OH、 $\text{C}\equiv\text{C}$ 、-COOH、C-O 等官能团。

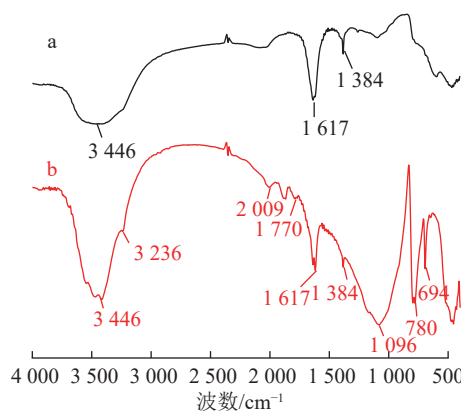


图 5 硅灰石 (a) 和 Ca-Si-C 材料 (b) 的红外光谱
Fig.5 IR spectra of wollastonite (a) and Ca-Si-C (b)

2.2.3 扫描电子显微镜 (SEM)

硅灰石和所制备的 Ca-Si-C 复合材料 2、3、5 μm 和 2、5、10 μm 的扫描电镜见图 6。硅灰石整体呈块状结构, 表面较为光滑, 内部孔隙数量较少。而 Ca-Si-C 复合材料上可以看到大量分布的颗粒 (图 6(d)、6(e)、6(f)), 是生物炭负载在硅灰石的表面, 材料的表面明显变蓬松, 孔隙数也显著增多。生物炭表面有着丰富的羧基、碳酸盐和其他碱性物质, 能够有效中和土壤酸度, 提高了酸性土壤的 pH 值。

2.3 Ca-Si-C 对土壤盐基离子与铝离子溶出的影响

由图 7 可知, 对照组中, Na^+ 的溶出量随着酸的加入呈现缓慢上升的趋势, 从 $6.41\text{ }\mu\text{g/g}$ 增加到 $9.70\text{ }\mu\text{g/g}$ 。施加 Ca-Si-C 后 Na^+ 的溶出量明显升高, 溶出量是对照组的 3.79 到 5.44 倍。这主要是

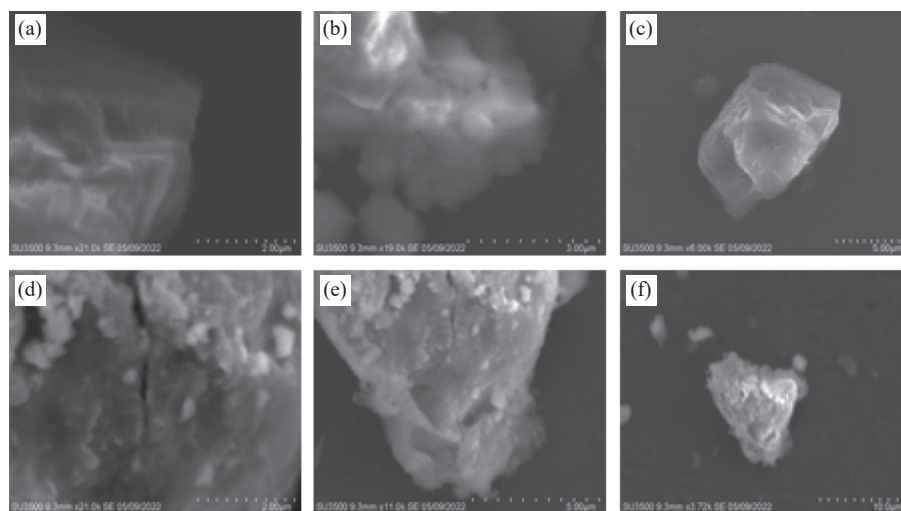


图 6 硅灰石 (a:2 μm b: 3 μm c: 5 μm) 和 Ca-Si-C 复合材料 (d:2 μm e: 5 μm f: 10 μm) 的 SEM
Fig.6 SEM of wollastonite (a: 2 μm b: 3 μm c: 5 μm) and Ca-Si-C composite (d: 2 μm e: 5 μm f: 10 μm)

由于 Ca-Si-C 的硅酸钠易溶于水，导致了 Na^+ 溶出量的增加。 Na^+ 最大溶出量为 $46.71 \mu\text{g/g}$ ，根据 Ca-Si-C 制备中硅酸钠的加入量计算， Na^+ 的溶出量占加入硅酸钠量的 1.17%，可见， Na^+ 也是缓慢释放的。

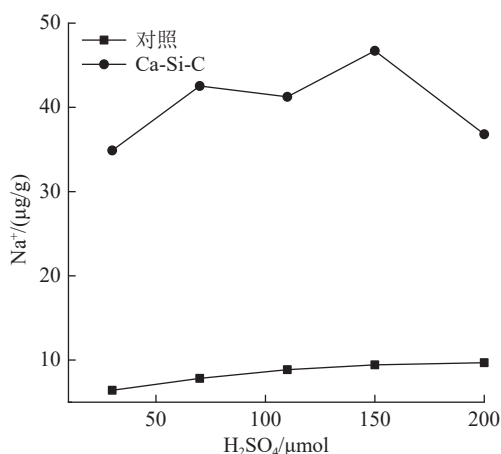


图 7 施加 Ca-Si-C 前后钠溶出量变化
Fig.7 Change of sodium dissolution before and after Ca-Si-C application

由图 8 可知，对照组中 K^+ 溶出量随着酸的加入没有明显变化，变化量在 $1 \mu\text{g/g}$ 以内。添加 Ca-Si-C 后 K^+ 的溶出量明显升高，加入 $200 \mu\text{mol}$ 硫酸时溶出量为 $25.86 \mu\text{g/g}$ ，为对照的 6.6 倍。张祥等^[19]研究了生物炭对红壤和黄棕壤土理化性质的影响，实验发现添加生物炭能够增加土壤有机质、氮、磷、钾的含量。因油菜秸秆含钾，施加 Ca-Si-C 可提高土壤中 K^+ 的释放量，为作物生长提供 K 肥。

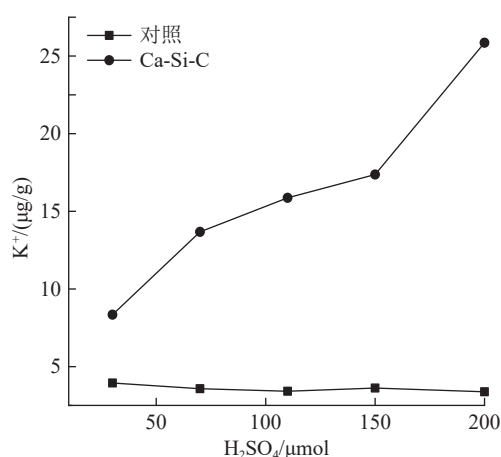


图 8 施加 Ca-Si-C 前后钾溶出量变化
Fig.8 Change of potassium dissolution before and after Ca-Si-C application

由图 9 可知，对照和施加组土壤中 Ca^{2+} 的溶出量均随硫酸加入量增加而下降，可能是因为 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 成难溶性的 CaSO_4 。但是，对照土壤中 Ca^{2+} 的溶出量从 $20.33 \mu\text{g/g}$ 下降至 $12.11 \mu\text{g/g}$ ；施加 Ca-Si-C 后土壤中 Ca^{2+} 的溶出量从 $8.62 \mu\text{g/g}$ 下降至 $4.82 \mu\text{g/g}$ 。相比于对照组，施加 Ca-Si-C 后土壤中 Ca^{2+} 的溶出量明显降低，Ca-Si-C 能够减缓土壤中 Ca^{2+} 的流失。

由图 10 可知，对照和施加组土壤中 Mg^{2+} 的溶出量均随硫酸加入量增加而增加然后趋于平稳。但施加 Ca-Si-C 后土壤中 Mg^{2+} 的溶出量均低于对照组，Ca-Si-C 能够有效阻止土壤中 Mg^{2+} 的流失。

由图 11 可知，与 Mg^{2+} 的溶出规律一致，对照和施加组土壤中 Al^{3+} 的溶出量均随硫酸加入量增加

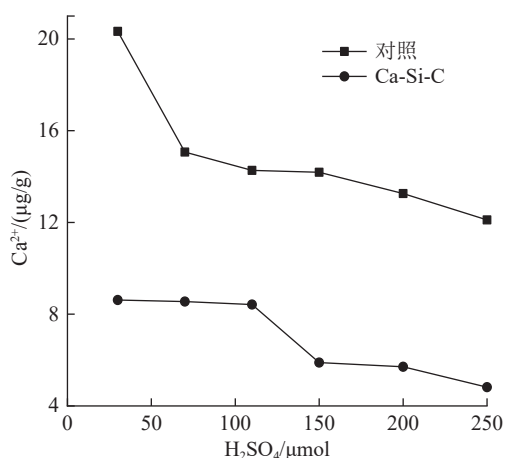


图9 施加 Ca-Si-C 前后钙溶出量变化

Fig.9 Changes of calcium dissolution before and after Ca-Si-C application

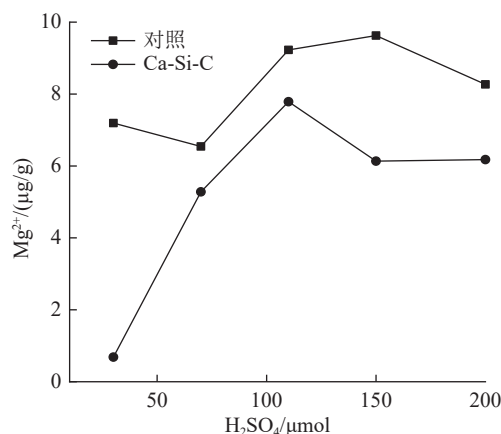


图10 施加 Ca-Si-C 前后镁溶出量变化

Fig.10 Changes of magnesium dissolution before and after Ca-Si-C application

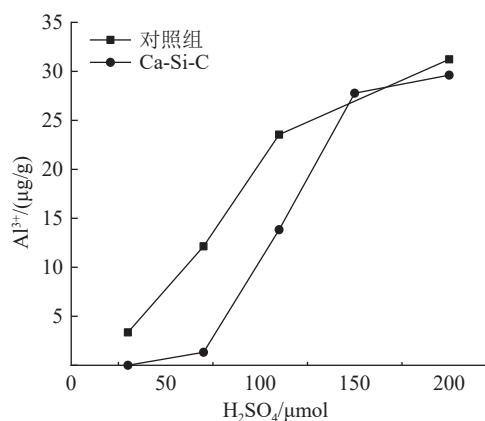


图11 施加 Ca-Si-C 前后铝溶出量变化

Fig.11 Change of aluminum dissolution before and after Ca-Si-C application

先增加然后趋于平稳。对照组土壤当硫酸添加量小于 110 μmol , 铝溶出量由 3.35 $\mu\text{g/g}$ 增加至 23.54 $\mu\text{g/g}$; 施加 Ca-Si-C 后, 铝溶出量由 1.33 $\mu\text{g/g}$

增加至 13.84 $\mu\text{g/g}$ 。当加酸量增至 150 μmol 时, 施加组和对照组中铝的溶出量相近, 说明尽管施加 Ca-Si-C, 但当土壤酸化至一定程度时, 仍旧会释放大量的铝。铝是作物的致害元素, 因此, 应严格控制土壤酸度, 减少铝对植物的毒害。

廖柏寒等^[20]认为, 缓冲能力强的土壤盐基离子对酸的敏感性排列顺序一般为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ \approx \text{Al}^{3+}$, 缓冲能力弱的一般排列顺序为 $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ 。Ca-Si-C 中含有大量的 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ , 酸加入的量较少时, 这些离子优先溶出, 因此施加 Ca-Si-C 的土壤 Al^{3+} 的溶出量低于对照组。可见, 施加 Ca-Si-C 能够有效抑制酸性土壤中铝的溶出, 明显提高土壤缓冲能力。

2.4 土壤中铝溶出量与 pH 值的关联

铝是植物致害元素, 对作物的生长影响很大, 朱霞萍等^[21]的研究发现, 酸缓冲曲线和铝释放曲线的交点可以成为一个除酸害容量和酸敏感值以外, 衡量土壤对酸敏感的指标。酸缓冲曲线和铝释放曲线的交点为铝释放的阈值, 这个值越低, 土壤对酸越敏感。

根据图 12 可知, 对照土壤铝溶出曲线与酸缓冲曲线交点 pH 值大约为 3.5, 而施用 Ca-Si-C 后, 两条曲线的交点 pH 值升高为 4.1, 增加 0.6 个 pH 单位。可见, 施加 Ca-Si-C 后, 土壤的酸敏感度降低, 即土壤的耐酸性更强。

3 结 论

(1) Ca-Si-C 复合材料的较佳制备条件为: 硅灰石:油菜杆:硅酸钠的质量比为 7:1:2、煅烧温度为 600 $^{\circ}\text{C}$ 、时间为 1.5 h。

(2) XRD、IR、SEM 分析表明, Ca-Si-C 复合材料以硅灰石为基体, 表面负载有生物炭, 表面蓬松, 孔隙数显著增多, 且含有丰富的羟基、羧基、碳酸盐等。

(3) 对照组土壤初始 pH 值为 4.7, 酸害容量为 7.5 $\mu\text{mol/g}$ 。施加 2% 的 Ca-Si-C。后, 土壤的初始 pH 值最多增加 1.4 个单位, 酸害容量最大增加了 17.5 $\mu\text{mol/g}$ 。

(4) 施加 Ca-Si-C 后, 随着酸量的不断增加, Na^+ 、 K^+ 的溶出量明显增加, 均高于对照组; Ca^{2+} 的溶出量降低, 均低于对照组; Al^{3+} 、 Mg^{2+} 溶出量增加, 低于对照组; 铝溶出曲线与酸缓冲曲

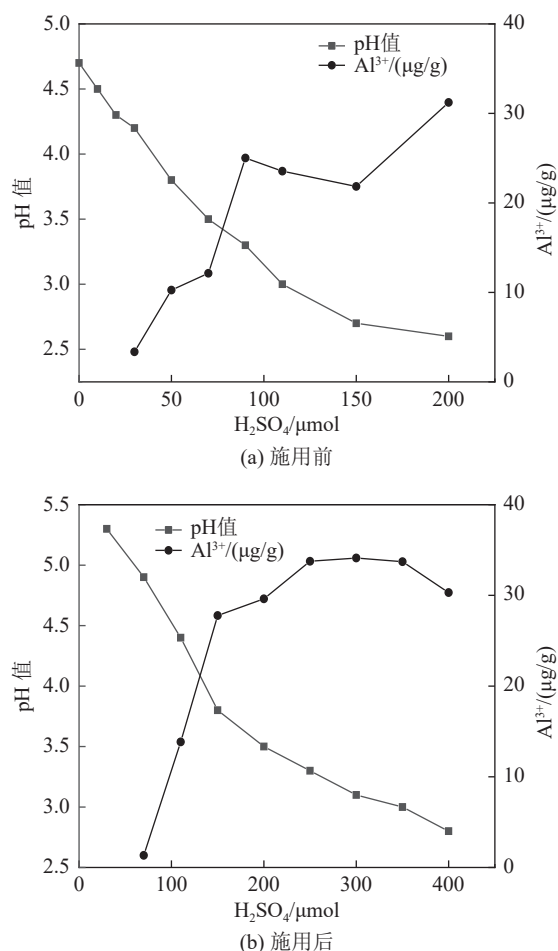


图12 施加 Ca-Si-C 前后 pH 值与铝溶出量的变化
Fig.12 Changes of pH value and aluminum dissolution before and after Ca-Si-C application

线交点 pH 值相较于对照组, 增加 0.6 个 pH 值单位。Ca-Si-C 使土壤初始 pH 值增加, 对酸的敏感性降低, 酸缓冲能力增强, 且原材料来源丰富、经济环保、制备工艺简单, 在酸性土壤改良中具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2):238-244.
- XU R K. Research progress of soil acidification and its control[J]. Soils, 2015, 47(2):238-244.
- [2] 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.
- [3] 倪中应, 谢国雄, 章明奎. 酸化对耕地土壤镉铅有效性及

农产品中镉铅积累的影响[J]. 江西农业学报, 2017, 29(8):52-56.

NI Z Y, XIE G X, ZHANG M K. Effects of acidification on bioavailability of cadmium and lead in cultivated land soil and their accumulation in agricultural products[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017, 29(8):52-56.

[4] Hu Y, Cheng H, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: a critical review[J]. Environment international, 2016, 92:515-532.

[5] Fageria N K, Nascente A S. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production[J]. Advances in Agronomy, 2014, 128:221-275.

[6] Zhang X, Guo J, Vogt R D, et al. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands[J]. *Geoderma*, 2020, 366:114234.

[7] Pan X Y, Li J Y, Deng K Y, et al. Four-year effects of soil acidity amelioration on the yields of canola seeds and sweet potato and N fertilizer efficiency in an ultisol[J]. *Field Crops Research*, 2019, 237:1-11.

[8] 张玲玉, 赵学强, 沈仁芳. 土壤酸化及其生态效应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6):1900-1908.

ZHANG L Y, ZHAO X Q, SHEN R F. Soil acidification and its ecological effects[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6):1900-1908.

[9] 靳辉勇, 齐绍武, 朱益, 等. 硅酸盐土壤调理剂对蔬菜 Cd 污染的治理效果[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(1):149-152.

JIN H Y, QI S W, ZHU Y, et al. The governance effect of silicate soil conditioner on cadmium-contaminated in vegetables[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(1):149-152.

[10] 庄钟娟, 杜迎辉, 朱瑞艳, 等. 硅酸盐菌剂对水稻生物学性状及养分累积的影响[J]. *中国稻米*, 2015, 21(6):88-90+93.

ZHUANG Z J, DU Y H, ZHU R Y, et al. Effects of silicate bacterium on biological character and nutrients accumulation of rice vegetables[J]. *China Rice*, 2015, 21(6):88-90+93.

[11] Shepherd J G, Joseph S, Sohi S P, et al. Biochar and enhanced phosphate capture: mapping mechanisms to functional properties[J]. *Chemosphere*, 2017, 179:57-74.

[12] Zhang M, Shu L, Shen X, et al. Characterization of nitrogen-rich biomaterial-derived biochars and their sorption for aromatic compounds[J]. *Environmental pollution*, 2014, 195:84-90.

[13] Yilangai R M, Manu A S, Pineau W, et al. The effect of biochar and crop veil on growth and yield of Tomato (*Lycopersicum esculentus* Mill) in Jos, North central

Nigeria[J]. *Current Agriculture Research Journal*, 2014, 2(1):37.

[14] 刘慧屿, 娄春荣, 韩英祚, 等. 秸秆生物炭与减量氮肥配施对玉米氮素利用率及土壤结构的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(5):1180-1188.

LIU H Y, LOU C R, HAN Y Z, et al. Impact of biochar addition combined with reduced nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and soil structure in brown earth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(5):1180-1188.

[15] 赵明柳, 唐守寅, 董海霞, 等. 硅酸钠对重金属污染土壤性质和水稻吸收 Cd Pb Zn 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(9):1653-1659.

ZHAO M L, TANG S Y, DONG H X, et al. Effects of sodium silicate on soil properties and Cd, Pb and Zn absorption by rice plant[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9):1653-1659.

[16] 刘鸣达, 张婧婷, 马聪, 等. 施硅降低碱性土壤铅生物有效性的机制研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3):555-562.

LIU M D, ZHANG J T, MA C, et al. Preliminary study on the mechanism by which silicon application reduces lead bioavailability in alkaline soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3):555-562.

[17] 王敬华, 张效年, 于天仁. 华南红壤对酸雨酸敏感性的研

究[J]. *土壤学报*, 1994, 31(4):348-355.

WANG J H, ZHANG X N, YU T R. Study on acid sensitivity of red soil in South China to acid rain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(4):348-355.

[18] Ulrich B. Natural and anthropogenic components of soil acidification[J]. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1986, 149(6):702-717.

[19] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8):979-984.

ZHANG X, WANG D, JIANG C C, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8):979-984.

[20] 廖柏寒, 李长生. 土壤对酸沉降缓冲机制探讨[J]. *环境科学*, 1989, 10(1):30-34.

LIAO B H, LI C S. Buffering mechanism of soil for acidic precipitation[J]. *Environmental Science*, 1989, 10(1):30-34.

[21] 朱霞萍, 汪模辉, 李锡坤, 等. 珠江三角洲潮土和水稻土酸缓冲特性实验研究[J]. *环境污染与防治*, 2010(1):47-50.

ZHU X P, WANG M H, LI X K, et al. Study on acid buffer characters of fluvo-quic soil and paddy soil in the Pearl River Delta South China Region[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2010(1):47-50.

Improvement of Acidic Yellow Soil by Wollastonite- sodium Silicate-biochar Composites

ZHANG Chuanfeng¹, ZHU Xiaping¹, ZHONG Jiaqi¹, ZHU Ziling¹, ZHAO Ping², REN Wei²
(1.College of Materials and Chemistry and Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2.105 Geological Brigade, Guizhou Bureau of Geology & Mineral Exploration & Development, Guiyang 550018, Guizhou, China)

Abstract: Wollastonite-sodium silicate-biochar composite material (Ca-Si-C) was prepared by calcination with wollastonite as the matrix material and adding a certain amount of rape straw and sodium silicate. And then the Ca-Si-C was applied to the improvement of acidic yellow soil. The optimum preparation conditions of the composite materials is as follows: the mass ratio of wollastonite, rape rod, sodium silicate is 7:1:2, the mixture calcines in 600 °C and muffle furnace for 1.5 h. The results of XRD, IR and SEM show that Ca-Si-C composite loaded with biochar has more surface pores and contains functional groups such as -OH, C≡C, -COOH and C-O. When 2% Ca-Si-C is applied to yellow soil with pH value 4.7, the initial pH value of the soil increases by 1.4 units compared with the control, and the acid damage capacity increases by 11.5 mmol/kg, the dissolution of sodium and potassium in soil increases, the dissolution of calcium, magnesium and aluminum decreases, the intersection point of soil acid buffer curve and aluminum ion dissolution curve increases from pH value 3.5 to 4.1. The Ca-Si-C has a good application prospect in acid soil improvement.

Keywords: Wollastonite; Acid soil; Acid damage capacity; Base cations; Soil improvement