

炭基肥添加对蜜柚果园酸性土壤 pH 和交换性能的影响

赵琳^{1,2}, 刘桂珍³, 钱笑杰^{2,3}, 郭豪¹, 方熊³, 王飞², 李清华², 易志刚^{1,3}

(1.福建农林大学机电工程学院,福州 350002;2.福建省农业科学院土壤肥料研究所,

福州 350013;3.福建农林大学资源与环境学院,福州 350002)

摘要:为研究炭基肥添加对蜜柚果园酸性土壤 pH 和交换性能的影响,设不添加肥料空白(CK)、只添加尿素(N)、水稻秸秆炭基肥(rice straw biochar-based fertilizer, BR)和竹屑炭基肥(bamboo biochar-based fertilizer, BB)各 4 个用量梯度(2.5, 5, 10, 20 g/kg)且配施尿素处理,开展 60 天室内培养试验。结果表明:随着培养进行, BR 和 BB 处理土壤 pH 均先升高后降低,交换性酸和交换性盐基离子含量呈上升趋势。培养 60 天时,随着 BR 和 BB 施用量增加,对提升土壤 pH、CEC 及盐基饱和度,降低交换性酸、交换性铝等效果越明显,且 BR 效果优于 BB。与 N 处理相比, BR 和 BB 使土壤 pH 分别提升 0.24~3.43 和 0.21~3.40 个单位,交换性酸分别降低 45.55%~97.25% 和 34.01%~96.70%, 交换性铝分别降低 46.95%~99.75% 和 38.99%~99.00%, CEC 分别提升 7.02%~170.74% 和 6.52%~134.90%, 盐基饱和度分别增加 29.40%~51.61% 和 32.08%~53.90%。施用炭基肥可以提高蜜柚果园酸性土壤 pH, 减少土壤交换性酸, 大幅度降低交换性铝含量, 同时提升土壤 CEC 和盐基饱和度。蜜柚果园土壤酸化治理炭基肥适宜用量为 2.5~5.0 g/kg, 水稻秸秆炭基肥效果优于竹屑炭基肥。研究结果为蜜柚果园酸化土壤治理提供科学依据。

关键词:炭基肥;蜜柚果园;土壤酸化;交换性能

中图分类号:S156.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)03-0244-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.035

Effects of Biochar-based Fertilizer on pH and Exchange Capacity of Acidic Soil in Pomelo Orchard

ZHAO Lin^{1,2}, LIU Guizhen³, QIAN Xiaojie^{2,3}, GUO Hao¹,

FANG Xiong³, WANG Fei², LI Qinghua², YI Zhigang^{1,3}

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University,

Fuzhou 350002; 2.Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013;

3.College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002)

Abstract: This experiment explored the effects of the application of biochar-based fertilizer on the pH and exchange capacity of the acidic soil in pomelo orchard, and the laboratory culture experiments were conducted for 60 days. In the experiment, no fertilizer control (CK), single application of urea (N), rice straw biochar-based fertilizer (BR) and bamboo biochar-based fertilizer (BB) at four dosage gradients (2.5, 5, 10 and 20 g/kg) were set up, and urea was applied in all treatments. The results showed that with the development of culture experiment, the soil pH value of BR and BB increased first and then decreased, and the contents of exchangeable acid and base ions increased. After 60 days of culture, the improving effects of BR and BB on soil pH, exchangeable acid, exchangeable aluminum, CEC and base saturation became more obvious with the increasing of the dosage of BR and BB, and the effect of BR was better than that of BB. Compared with N treatment, in the BR and BB treatments, the soil pH increased by 0.24~3.43 and 0.21~3.40 units, the exchangeable acid decreased by 45.55%~97.25% and 34.01%~96.70%, the exchangeable aluminum decreased by 46.95%~99.75% and 38.99%~99.00%, the soil CEC increased by 7.02%~170.74% and 6.52%~134.90%, the base saturation increased by 29.40%~51.61% and 32.08%~53.90%, respectively.

收稿日期:2021-10-19

资助项目:“5511”协同创新工程项目(XTCXGC2021009);福建省属公益项目(2018R1022-1);福建省农科院科技创新团队项目(CXTD2021015-1)

第一作者:赵琳(1997—),女,硕士研究生,主要从事农业生物环境与能源研究。E-mail:zhaolin_97@163.com

通信作者:李清华(1978—),男,硕士,副研究员,主要从事植物营养研究。E-mail:13003898776@163.com

The application of biochar-based fertilizer could improve the pH of acidic soil, reduce exchangeable acid, greatly reduce exchangeable aluminum, and improve soil CEC and base saturation. Therefore, the optimum amount of biochar-based fertilizer for the acid soil of pomelo orchard was about 2.5~5.0 g/kg, and the effect of rice straw biochar-based fertilizer was better than bamboo biochar-based fertilizer. This experiment provided a scientific basis for the treatment of the acidified soil in pomelo orchard.

Keywords: biochar-based fertilizer; pomelo orchard; soil acidification; exchange capacity

土壤酸化是指在自然因素和人为因素共同作用下,土壤 pH 下降、交换性酸增加及交换性盐基离子淋失的过程^[1]。根据中国土壤 pH 分级标准,将土壤 pH<5.0 划为强酸性土壤。我国南方亚热带是土壤酸化主要区域,以福建、江西等省土壤酸化尤为严重^[2]。福建省是我国蜜柚重要产地,常年种植面积 $19.14 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。近年蜜柚果园土壤酸化较为严重,以琯溪蜜柚主产区福建平和为例,全县蜜柚果园强酸性土壤占 67.71%^[3]。土壤酸化会加剧土壤营养元素流失,降低保肥和供肥能力,促进铝的活化^[4],危害作物生长和生态环境。因此,采取有效措施来减缓柑橘果园土壤酸化,将蜜柚果园土壤酸碱度维持在适宜范围,对于蜜柚产业可持续发展具有重要意义。

目前,围绕土壤酸化治理报道较多,徐仁扣等^[2]指出,对于 pH<5.0 的强酸性土壤,建议施用石灰等碱性改良剂。牡蛎壳是沿海地区产量较高的一种贝类固体废弃物且呈碱性,经热改性处理后获得优异结构,具有较强吸附能力^[5],还能缓解因过量施肥造成土壤酸化并补充土壤交换性钙镁含量。白云石粉是一种天然碳酸盐矿物,在酸性土壤中施用,可使土壤交换性铝显著下降、pH 显著升高^[6]。由于石灰改良剂单独长期施用会引起土壤板结、营养失调,因此,石灰改良剂应同时配施生物炭等碱性改良剂以减少石灰负面效应。生物炭(biochar,BC)是以作物秸秆等农林植物废弃生物质为原料,在绝氧或有限氧气供应条件下,高温热解得到的稳定固态富碳产物^[7]。它具有较大比表面积和高电荷密度,具备良好稳定性和吸附性^[8]。赵秋芳等^[9]指出,生物炭的广泛应用是解决热带和亚热带地区土壤和环境问题的有效途径。已有研究^[10]表明,添加生物炭能使砖红壤交换性铝占比下降 42%~67%。生物炭生产工艺复杂,能耗较高,且不含有作物生长所需养分,在农业上推广利用较难。生物炭基肥料是以生物炭为基质,添加 N、P、K 等养分中的一种或几种,采用物理或化学方法混合制成的肥料,它不仅能使多年生茶园酸化土壤 pH 提升 0.19~0.91 个单位,还能使交换性钙、镁较对照提升 7.60%和 21.74%^[11]。

目前,国内外关于生物炭对土壤酸度影响的研究已有大量报道^[12-15],但关于利用生物炭与碱性改良剂研发炭基肥,并用于酸性土壤改良的研究报道相对较

少,且主要集中在水稻^[16]、茶树^[17]等作物。本研究以水稻秸秆和竹屑生物炭等为主要原料,试制出不同生物炭基肥。通过室内培养试验,研究炭基肥与尿素配施对蜜柚果园酸性土壤 pH、交换性酸、交换性盐基离子及阳离子交换量等影响,探讨炭基肥适宜用量,旨在为蜜柚果园酸化土壤治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自福建省漳州市平和县小溪镇产坑村的蜜柚果园,土壤类型为硅铝质赤红壤,质地为黏壤土,土样采集深度为 0—30 cm,土壤 pH 为 4.38,有机质、全氮分别为 32.00,1.63 g/kg,碱解氮、速效钾分别为 115.09,142.50 mg/kg,交换性氢、交换性铝、交换性钾、交换性钠、交换性钙、交换性镁、阳离子交换量分别为 0.43,3.25,0.21,0.18,2.91,0.32,9.00 cmol/kg。新鲜土壤样品送至实验室后,经自然风干,研磨后用 2 mm 筛网进行均质和筛分。

1.2 炭基肥制备及特性表征

供试生物炭包含水稻秸秆炭和竹屑炭。2 种生物炭均采用限氧裂解法制备。将水稻秸秆和竹屑烘干粉碎过 2 mm 筛,分别称取 1 000 g 原料置于气氛箱式电阻炉。先通入 N_2 30 min,使炉内形成限氧环境,再以 5 °C/min 升温速率加热至 450 °C 并保温热解 120 min。待热解过程完成后,持续通入 N_2 ,使炉内生物炭自然冷却,过 0.15 mm 筛,干燥保存备用。

供试炭基肥包含水稻秸秆炭基肥(rice straw biochar-based fertilizer,BR)和竹屑炭基肥(bamboo biochar-based fertilizer,BB)。2 种炭基肥均采用直接掺混法制备。将牡蛎壳清洗后,进行低温烘干烘焙,而后用破碎机将牡蛎壳破碎 0.25 mm 保存备用($\text{CaO} \geq 46\%$);将白云石经选矿、粗碎、中碎、磨粉至 0.178 mm 保存备用($\text{CaO} \geq 32\%$, $\text{MgO} \geq 21\%$);将硫酸钾经研钵研磨后过 0.178 mm 筛网保存备用。生物炭、牡蛎壳粉、白云石粉和硫酸钾分别按 25%,30%,35%,10%比例混合,并用搅拌机将所有原料搅拌均匀后过 0.25 mm 筛,保存备用。BR、BB 的 pH 分别为 10.00 和 9.53,碳、水分、总氮、总磷、总钾、氧化钙、氧化镁含量分别为 18.11%,3.75%,0.11%,0.22%,13.89%,22.35%,8.74%和 17.30%,1.68%,

0.12%,0.17%,9.81%,18.26%,5.44%。

生物炭表面结构见图 1,表面官能团结构表征见图 2,其中,水稻秸秆生物炭含有 2 个羟基(—OH)振动峰,1 个 SiO₂ 特征峰^[18]。竹屑生物炭含有 1 个 C—O—C 振动峰^[19]。不同生物质制备的生物炭也

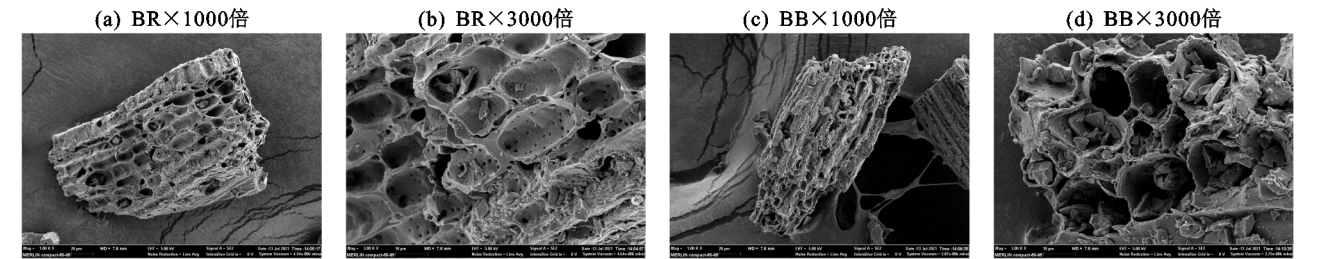


图 1 生物炭的扫描电镜

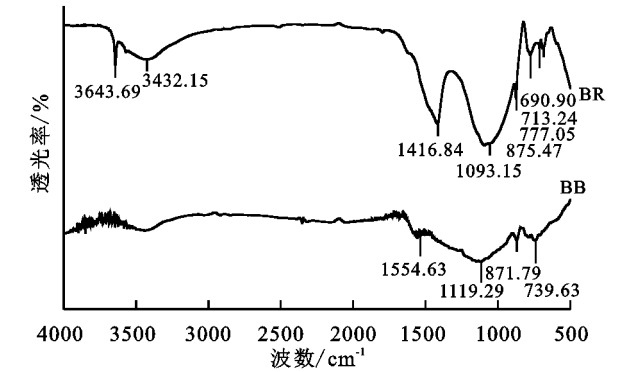


图 2 生物炭的红外光谱

1.3 试验设计

室内培养试验以不添加肥料空白(CK)和只添加尿素(N,0.72g/kg)作为2个对照,在添加等量尿素基础

存在相同的芳香族 C=C 键特征峰^[18];2 种生物炭都出现多个芳香族 C—H 振动峰,但数量上存在差异,水稻秸秆炭出现 4 个峰,而竹屑炭仅出现 2 个。此外,水稻秸秆和竹屑生物炭比表面积分别为 54.0,1.7 m²/g。生物炭和炭基肥主要元素及比例分析见表 1。

上,设置 2 种炭基肥类型(水稻秸秆炭基肥,BR;竹屑炭基肥,BB),4 个炭基肥用量水平(2.5,5,10,20 g/kg)。试验共计 10 个处理(CK、N、2.5BR、5BR、10BR、20BR、2.5BB、5BB、10BB、20BB),每个处理重复 3 次。

称取 100 g 风干过筛(2 mm)土样,根据试验设计,分别添加相应量尿素和炭基肥,搅拌和混匀,置于 300 mL 三角瓶中,用去离子水调节土壤含水量至土壤田间最大持水量的 60%,用 parafilm 封口膜封住培养瓶口减少水分散失。培养温度设为 25 ℃,每隔 3 天称重 1 次并补充水分,以保持土壤含水量恒定。培养试验周期为 60 天。在培养开始后的第 0,7,15,30,60 天采集土壤样品,经风干、研磨和过筛后用于测定土壤 pH、交换性酸、交换性盐基离子和 CEC。

表 1 生物炭和炭基肥主要元素分析

供试材料	C/%	H/%	N/%	O/%	C/H	C/N	O/C	(O+N)/C
水稻秸秆炭	60.35	0.58	0.3	7.88	104.10	201.17	0.13	0.14
竹屑炭	57.65	2.58	0.41	4.27	22.34	140.61	0.07	0.08
水稻秸秆炭基肥	18.11	0.16	0.11		113.19	164.64		
竹屑炭基肥	17.30	0.78	0.12		22.18	144.17		

1.4 分析方法

采用场发射扫描电子显微镜(SEM)观察生物炭表面结构;采用全自动比表面分析仪(ASAP 2020)测定生物炭比表面积;采用元素分析仪(Elementar Vario MACRO cube)分析生物炭 C、H、O 和 N 含量;采用傅里叶红外光谱(FTIR Nicoet 460)对生物炭表面官能团结构进行表征。

土壤 pH 采用台式 pH 参数测定仪 SevenExcellence S400—K 测定,水土比 2.5 : 1;土壤交换性酸(交换性铝、交换性氢)采用氯化钾交换—中和滴定法测定;土壤交换性盐基离子、阳离子交换量采用乙酸铵法^[20]测定。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件处理数据,Origin Lab 8.0 软件作图,IBM SPSS Statistics 26 软件

进行差异显著性统计分析检验。

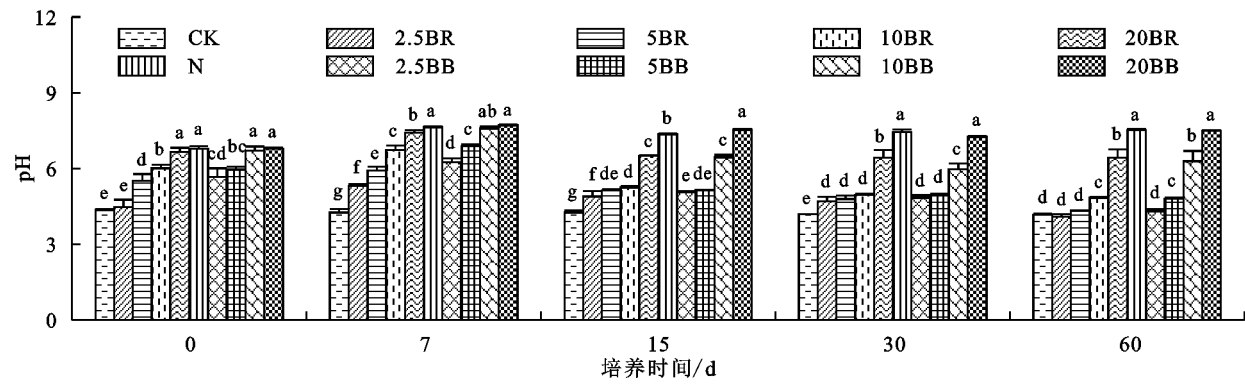
2 结果与分析

2.1 不同处理下蜜柚果园酸性土壤 pH 变化

由图 3 可知,除 CK 外,其余各处理随培养进行,土壤 pH 均呈现先升高后降低趋势,这是由于尿素在适宜土壤环境中,先后发生水解、铵化和硝化作用的结果。炭基肥与尿素配施或单施尿素,会使酸性土壤 pH 迅速提升,在第 7 天时达到峰值,而后逐渐下降,到 30 天后则趋向于稳定,除 10,20 g/kg 炭基肥处理外,其余处理土壤 pH 均在 60 天最低。与 CK 相比,60 天时 N 处理土壤 pH 差异并不显著,这说明在蜜柚果园酸性土壤中添加尿素并不会导致土壤酸化加剧。

培养 60 天时,相同施用量水平下(2.5,5,10,20 g/kg),BR 和 BB 处理间土壤 pH 差异不显著;同种炭基

肥随着施用量增加,土壤 pH 均显著增加($P<0.05$)。此外,与 N 处理相比,BR 和 BB 处理分别使土壤 pH 提升 0.24~3.43 和 0.21~3.40 个单位,其中添加 2.5BR 和 2.5BB 处理土壤 pH 与 N 处理差异不显著。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 3 蜜柚果园酸性土壤 pH 变化

2.2 不同处理下蜜柚果园酸性土壤交换性酸变化

土壤交换性酸是指土壤胶体所吸附的交换性氢和交换性铝含量,其反映了土壤潜性酸量,由图 4 可知,CK、N、2.5BR、5BR、2.5BB 和 5BB 处理的土壤交换性氢、交换性铝和交换性酸总量随培养时间推移整体均呈现上升趋势,而 10BR、20BR、10BB 和 20BB 处理的土壤交换性氢、交换性铝和交换性酸总量则呈先上升后下降趋势,以 30 天时数值最高。与对照(CK)相比,在 30 天时,单施尿素会使土壤交换性氢、交换性铝和交换性酸总量显著降低($P<0.05$),到 60 天时,土壤交换性氢和交换性酸总量差异不显著。

培养 60 天时,相同施用量水平下(2.5,5,10 g/kg)BR 处理对土壤交换性氢、交换性铝和交换性酸总量的降低效果显著优于 BB 处理。同种炭基肥随着施用量的增加,土壤交换性氢、交换性铝和交换性酸总量均显著下降($P<0.05$),但 10,20 g/kg 炭基肥处理间差异不显著,表明适量炭基肥有利于调节土壤交换性酸。与 N 处理相比,BR 和 BB 的土壤交换性酸总量降幅分别为 45.55%~97.25% 和 34.01%~96.70%,交换性铝降幅分别为 46.95%~99.75% 和 38.99%~99.00%,交换性氢降幅分别为 28.33%~86.12% 和 11.95%~86.38%。

2.3 不同处理下蜜柚果园酸性土壤交换性盐基离子变化

土壤交换性盐基离子总量是评价土壤质量的重要指标。由表 3 可知,各处理交换性盐基离子总量随培养试验进行,整体有增加的趋势。培养 60 天时,与 CK 相比,N 处理交换性盐基离子总量差异不显著,相同施用量水平下(2.5,5,10,20 g/kg),BR 处理对土壤盐基离子总量提升效果明显优于 BB 处理;而同种炭基肥随着施用量的增加,土壤交换性盐基离子总量均显著增加($P<0.05$)。与 N 处理相比,BR 和 BB

的土壤交换性盐基离子总量增幅分别为 105.57%~473.53% 和 88.41%~436.82%。

土壤交换性盐基包括交换性钾、钠、钙、镁,在各个处理中,交换性钙、交换性镁占交换性盐基总量比例分别为 75.95%~85.82%,6.82%~13.28%,而交换性钾和交换性钠所占比例相对较少。培养 60 天时,相同施用量水平下(2.5,5,10,20 g/kg),BR 处理对土壤交换性钙和交换性镁提升效果明显优于 BB 处理。同种炭基肥随着施用量的增加,土壤交换性钙、交换性镁、交换性钾和交换性钠含量均有增加的趋势,其中,各处理土壤交换性钙均达到显著水平($P<0.05$)。相较于 N 处理,BR 和 BB 土壤交换性钙、交换性镁、交换性钾、交换性钠增幅为 88.49%~420.80%,265.90%~645.63%,149.95%~1 266.48%,149.92%~249.84% 和 67.87%~386.16%,261.67%~510.34%,166.62%~1 133.19%,149.92%~549.75%。

2.4 不同处理下蜜柚果园酸性土壤 CEC 和盐基饱和度变化

由图 5 可知,各处理土壤 CEC 和盐基饱和度随时间整体有增加的趋势。与 CK 相比,60 天时 N 处理土壤 CEC 差异不显著,而盐基饱和度显著降低($P<0.05$)。相同施用量水平下(10,20 g/kg),BR 处理对土壤 CEC 和盐基饱和度提升效果显著高于 BB 处理($P<0.05$)。同种炭基肥随着施用量的增加,土壤 CEC 和盐基饱和度均显著增加($P<0.05$)。与 N 处理相比,配施 BR 和 BB,其土壤 CEC、盐基饱和度增幅分别为 23.55%~165.07%,66.31%~116.40% 和 9.32%~142.31%,72.35%~121.56%。

3 讨论

强酸性土壤中,土壤活性酸(H^+)主要来源于交换性铝,而交换性铝与 pH 又呈极显著负相关^[21]。本研究表明,施用炭基肥能够大幅度降低交换性铝含量,显著提高土壤 pH。这与其自身理化性质密切相

关：一是炭基肥中生物炭含有丰富的含氧官能团，例如在波数 1 500 /cm 附近，2 种生物炭均含有芳香族特征峰(图 2)，能与交换性铝发生络合，形成稳定的螯合物，使交换性铝转化成活性较低的有机结合态铝；二是炭基肥中生物炭表面具有丰富的微孔结构

(图 1)，通过吸附矿质离子，与交换性铝发生交换反应，降低交换性铝含量，从而缓解铝毒作用^[10]；三是 BR 和 BB 均为碱性物质，可中和土壤中活性酸，而土壤中铝的形态会随土壤 pH 提高而发生变化，进而降低交换性铝含量。

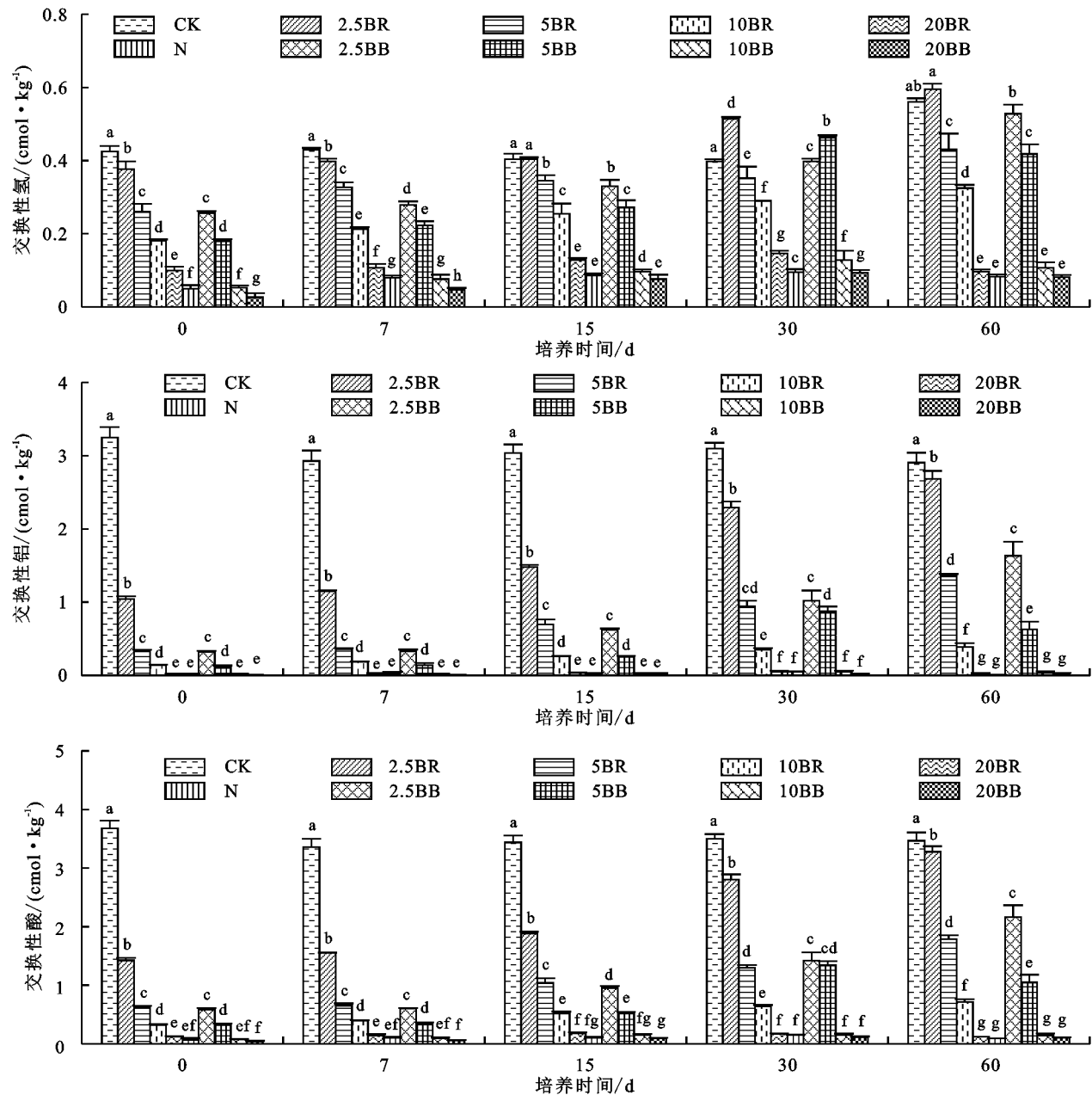


图 4 蜜柚果园酸性土壤交换性酸变化

土壤 CEC 和盐基饱和度是评价土壤保肥能力的重要指标。本研究中，随着炭基肥用量增大，土壤 CEC 和盐基饱和度均呈现明显上升趋势，说明炭基肥会提高酸性土壤保肥能力，这与 Chintala 等^[22]、Yuan 等^[23]结果一致。分析其原因，首先是炭基肥中生物炭利用其表面含氧官能团中和 H⁺ 和水解活性 Al³⁺，通过含氧羧基官能团对碱基离子进行吸附，使土壤胶体可变负电荷增加或可变正电荷减少，从而使土壤胶体有效负电荷密度增加；其次，炭基肥中包含

白云石粉和牡蛎壳粉等原料，其本身有利于增加土壤盐基离子总量，进而提高土壤 CEC 和盐基饱和度；最后是由炭基肥大量带入土壤的阳离子会提升土壤溶液离子强度，增加土壤有效负电荷密度^[24]，从而提升土壤阳离子吸附能力。

本研究中，配施炭基肥会影响酸性土壤 pH、交换性铝、CEC 和盐基饱和度，且随着用量增加，各处理间存在不同程度差异，因此，需要根据酸化土壤治理目标，提出炭基肥适宜用量。对 pH 而言，由

于蜜柚果园适宜土壤 pH 为 5.0~6.5,pH 过高或者过低均会影响果树对营养元素的吸收,进而影响蜜柚生长,炭基肥适宜用量为 2.5~5 g/kg。对交换性铝而言,土壤中铝形态与 pH 密切相关,在强酸性土壤中,土壤交换性酸以交换性铝为主。当土壤交换性铝含量超过 2 cmol/kg 时,铝毒作用开始显现^[25]。在培养 60 天时,2.5BR 和 2.5BB 处理土壤交换性铝分别降低 46.95%,38.99%,其数值均低于 2 cmol/kg,已能显著降低交换性铝含量;且随着炭基肥用量增加,土壤交换性铝降低幅度越大,表明施用炭

基肥是降低酸性土壤交换性铝的有效措施。对于土壤 CEC 和盐基饱和度而言,一般认为,当土壤 CEC ≥10 cmol/kg 或盐基饱和度 ≥80% 时,土壤保肥能力较强,当炭基肥用量 ≥5 g/kg 时,酸性土壤达到 CEC ≥10 cmol/kg 且盐基饱和度 ≥80% 水平。综合考虑上述各因素,蜜柚果园酸性土壤炭基肥适宜用量为 2.5~5 g/kg。由于本研究采用室内培养方式,研究结果可能与田间试验存在一定差异,因此,蜜柚果园酸性土壤炭基肥适宜用量还应通过田间试验进一步验证。

表 2 蜜柚果园酸性土壤交换性盐基离子变化						单位:cmol/kg
培养时间/d	处理	交换性盐基总量	交换性钙	交换性镁	交换性钾	交换性钠
7	CK	3.62±0.24f	2.91±0.27f	0.32±0.04d	0.21±0.00f	0.18±0.00b
	N	4.11±0.62f	3.22±1.00f	0.37±0.27d	0.21±0.00f	0.30±0.21b
	2.5BR	6.83±0.14e	5.46±0.16e	0.67±0.04c	0.53±0.00e	0.18±0.00b
	5BR	9.34±0.16d	7.58±0.20d	0.73±0.06bc	0.84±0.11d	0.18±0.00b
	10BR	13.77±0.18c	11.18±0.12c	0.83±0.02abc	1.40±0.06c	0.37±0.18b
	20BR	22.14±1.07a	18.45±1.10a	0.93±0.02a	2.39±0.06b	0.37±0.00b
	2.5BB	6.55±0.55e	4.96±0.31e	0.39±0.08d	0.53±0.00e	0.67±0.28a
	5BB	8.89±1.56d	6.99±1.50d	0.69±0.06bc	0.91±0.06d	0.30±0.11b
	10BB	12.80±0.35c	10.23±0.19c	0.77±0.08abc	1.37±0.11c	0.43±0.11ab
	20BB	19.84±0.85b	15.42±0.56b	0.84±0.04ab	2.91±0.16a	0.67±0.38a
30	CK	4.20±0.14h	3.50±0.17f	0.31±0.03e	0.21±0.00f	0.18±0.00e
	N	4.87±0.29h	4.08±0.16f	0.33±0.05e	0.21±0.00f	0.24±0.11e
	2.5BR	9.30±0.57f	6.59±0.43e	0.98±0.14cd	0.63±0.11e	1.10±0.32bc
	5BR	13.37±0.18d	10.19±0.09c	1.49±0.21b	0.74±0.00de	0.96±0.20c
	10BR	17.40±0.69c	13.27±0.70b	1.57±0.17b	1.16±0.11c	1.40±0.11a
	20BR	21.52±0.64a	15.89±0.48a	1.98±0.11a	2.32±0.11b	1.34±0.21ab
	2.5BB	7.58±1.22g	5.67±1.17e	0.80±0.06d	0.56±0.06e	0.55±0.00d
	5BB	10.64±0.29e	8.13±0.18d	1.08±0.09c	0.88±0.06d	0.55±0.00d
	10BB	13.74±0.43d	10.52±0.45c	1.55±0.10b	1.30±0.06c	0.37±0.00de
	20BB	20.06±0.83b	15.34±0.73a	1.67±0.02b	2.63±0.32a	0.43±0.11de
60	CK	4.56±0.36g	3.92±0.38i	0.31±0.06e	0.21±0.00d	0.12±0.21c
	N	4.20±0.18g	3.58±0.05i	0.29±0.05e	0.21±0.00d	0.12±0.11c
	2.5BR	8.62±0.49f	6.74±0.47g	1.05±0.05d	0.53±0.00cd	0.30±0.11bc
	5BR	11.70±0.39d	8.95±0.41e	1.55±0.10c	0.77±0.66c	0.43±0.21b
	10BR	15.94±0.26c	12.50±0.07c	1.62±0.14bc	1.40±0.16b	0.43±0.11b
	20BR	24.07±1.09a	18.63±0.26a	2.13±0.09a	2.88±0.90a	0.43±0.11b
	2.5BB	7.91±0.47f	6.01±0.59h	1.04±0.08d	0.56±0.06cd	0.30±0.11bc
	5BB	10.26±0.63e	7.88±0.45f	1.05±0.16d	0.84±0.00c	0.49±0.11b
	10BB	15.15±0.52c	11.77±0.27d	1.55±0.10c	1.40±0.06b	0.43±0.21b
	20BB	22.53±0.39b	17.39±0.46b	1.75±0.16b	2.60±0.06a	0.79±0.28a

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示相同培养时间不同处理间差异显著($P<0.05$); $n=3$ 。

本研究中,相同施用量水平下(2.5,5 g/kg),BR 处理在降低土壤交换性酸、提升土壤 CEC 等方面明显优于 BB 处理($P<0.05$)。这可能是由于物料自身

差异造成的,一方面是水稻秸秆炭芳香族振动峰数量(图 2)和 C/H 比值(表 1)均明显高于竹屑炭,水稻秸秆炭能够通过其更丰富的硅酸盐颗粒和含氧官能团,

实现中和交换性铝,进而降低土壤交换性酸^[26];另一方面,是水稻秸秆生物炭(图 1b)表面孔隙度更高,孔隙间排列紧密,微孔分布均匀且表面光滑,竹屑生物炭(图 1d)表面则含有更多碎片,且比表面积比竹屑生物炭高 $52.3 \text{ m}^2/\text{g}$,因此,能为阳离子吸持提供更多附着位点,不仅有利于增加土壤对交换性钾、钙、镁

离子吸附,同时,还有利于减少土壤碱基阳离子淋溶损失,提升土壤 CEC。

本研究中,2 种生物炭均采用 450°C 限氧热解法制备而得,由于生物炭性质与制备温度密切相关,因此,后续应进一步开展不同热解温度下生物炭所制备炭基肥的酸化治理效果研究。

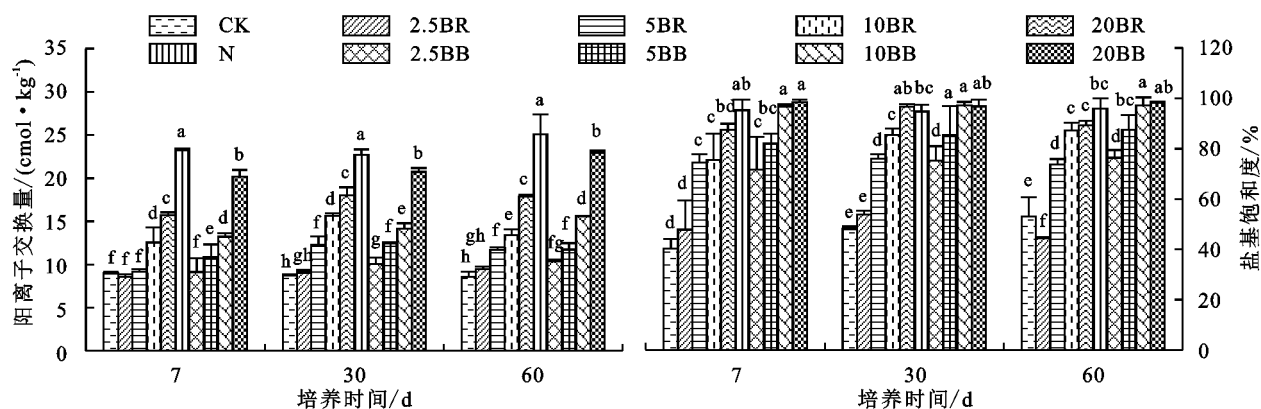


图 5 蜜柚果园酸性土壤 CEC 和盐基饱和度变化

4 结论

施用炭基肥可以提高蜜柚果园酸性土壤 pH,减少土壤交换性酸,大幅度降低交换性铝含量,增加土壤 CEC 和盐基饱和度,炭基肥用量越大,治酸效果和提升土壤保肥能力越明显。综合考虑蜜柚果园酸性土壤(pH 4.38)治理目标,炭基肥适宜用量为 $2.5\sim 5 \text{ g/kg}$ 。不同生物炭原料制备的炭基肥对土壤 pH 和交换性能的影响存在差异,水稻秸秆炭基肥效果优于竹屑炭基肥。

参考文献:

- [1] Wang H, Xu R K, Wang N, et al. Soil acidification of Alfisols as influenced by tea cultivation in eastern China [J]. *Pedosphere*, 2010, 20(6): 799-806.
- [2] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等.我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 160-167.
- [3] 李敬博,林伟杰,李湘君,等.琯溪蜜柚园土壤酸化特征研究[J]. *经济林研究*, 2020, 38(1): 169-176.
- [4] Shetty R, Vidya C S, Nagabovanalli P, et al. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 756: e142744.
- [5] 赵娟,杨耐德,周亮.牡蛎壳资源开发利用综述[J]. *安徽农学通报*, 2015, 21(21): 79-80.
- [6] 武际,郭熙盛,王文军,等.施用白云石粉对黄壤酸度和油菜产量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2006, 28(1): 55-58.
- [7] 田冬,高明,黄容,等.油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. *环境科学*, 2017, 38(7): 2988-2999.

- [8] Miheretu B. Soil acid management using biochar: Review [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2021, 10(5): 1-6.
- [9] 赵秋芳,赵青云,王辉,等.生物炭改良土壤机理及其在我国热区应用前景综述[J]. *热带农业科学*, 2014, 34(10): 57-66.
- [10] 索龙,潘凤娥,胡俊鹏,等.秸秆及生物质炭对砖红壤酸度及交换性能的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(6): 1157-1162.
- [11] 李昌娟,杨文浩,周碧青,等.生物炭基肥对酸化茶园土壤养分及茶叶产质量的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52(2): 387-397.
- [12] Jiang S J, Duan L X, Dai G L, et al. Immobilization of heavy metal(loid)s in acid paddy soil by soil replacement-biochar amendment technology under normal wet condition [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(48): 68886-68896.
- [13] Prasetyo T B, Naspendra Z, Maulana A, et al. Potential of biochar bamboo and sub-bituminous coal as a amendment of acid mineral soils for improving the growth of arabica coffee [*Coffea arabica* L.] seedlings [J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, 741(1): 658-669.
- [14] Jia M Y, Yu J P, Li Z, et al. Effects of biochar on the migration and transformation of metal species in a highly acid soil contaminated with multiple metals and leached with solutions of different pH [J]. *Chemosphere*, 2021, 278: 372-383.
- [15] Yan P, Shen C, Zou Z H, et al. Biochar stimulates tea growth by improving nutrients in acidic soil [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 283: 234-246.
- [16] 喻成龙,汤建,郑琴,等.紫云英翻压条件下生物炭基肥

配施量对水稻 Cd 迁移累积的影响[J].2020,39(11): 2554-2560.

[17] Wya B, Cla B, Swa B, et al. Influence of biochar and biochar-based fertilizer on yield, quality of tea and microbial community in an acid tea orchard soil [J].Applied Soil Ecology,2021,166:e104005.

[18] 罗煜,赵立欣,孟海波,等.不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析[J].农业工程学报,2013,29(13): 208-217.

[19] Keiluweit M, Nico P S, Johnson M G, et al. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) [J].Environmental Science and Technology,2010,44(4):1247-1253.

[20] 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.

[21] 李昂,王旭,范洪黎.4 种土壤调理剂改良红壤铝毒害的效果研究[J].中国土壤与肥料,2014(4):7-11.

[22] Chintala R, Schumacher T E, Mcdonald L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures [J].Clean-Soil,Air,Water,2014, 42(5):626-634.

[23] Yuan J H, Xu R K, Wang N, et al. Amendment of acid soils with crop residues and biochars [J].Pedosphere,2011,21(3):302-308.

[24] Li J Y, Wang N, Xu R K, et al. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation [J].Pedosphere,2010, 20(5):645-654.

[25] 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.

[26] Uchimiya M, Wartelle L H, Klasson K T, et al. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil [J].Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011,59(6):2501-2510.

(上接第 243 页)

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GBT32737-2016 土壤硝态氮的测定紫外分光光度法[S].北京:中国标准出版社,2016.

[17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[18] 黄容,高明,万毅林,等.秸秆还田与化肥减量配施对稻—菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J].环境科学, 2016,37(11):4446-4456.

[19] 朱浩宇,高明,龙翼,等.化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J].环境科学, 2020,41(4):1921-1929.

[20] Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, et al. Changes in soil characteristics and maize yield under straw returning system in dryland farming [J].Field Crops Research, 2018,218:11-17.

[21] 侯慧芝,张绪成,尹嘉德,等.秸秆还田量对旱地全膜覆土穴播春小麦水分利用及产量的影响[J].麦类作物学报,2021,41(4):457-464.

[22] 黄婷苗,郑险峰,侯仰毅,等.秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报, 2015,21(4):853-863.

[23] 余坤,冯浩,李正鹏,等.秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响[J].农业机械学报,2014,45(10): 116-123.

[24] 林祥,王东.不同底墒条件下补灌对冬小麦耗水特性、产量和水分利用效率的影响[J].作物学报,2017,43 (9):1357-1369.

[25] 曾研华,范呈根,吴建富,等.等养分条件下稻草还田替代双季早稻氮钾肥比例的研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):658-668.

[26] 陈金,唐玉海,尹燕桦,等.秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响[J].作物学报,2015,41 (1):160-167.

[27] 马红梅,曹寒冰,谢英荷,等.晋南黄土旱塬小麦养分投入与化肥减施经济环境效应评价[J].中国农业科学, 2021,54(13):2804-2817.

[28] Dai J, Wang Z H, Li M H, et al. Winter wheat grain yield and summer nitrate leaching: Long-term effects of nitrogen and phosphorus rates on the Loess Plateau of China [J].Field Crops Research,2016,196:180-190.

[29] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等.长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J].中国农业科学, 2018,51(12):2336-2347.