



辣椒秸秆生物炭对酸化土壤交换性能及酶活性的影响

李贞霞,任秀娟,祁雪娇,余小燕,王广印

(河南科技学院 园艺园林学院,河南新乡 453003)

摘要 将辣椒秸秆通过高温热解的方法制备成辣椒秸秆生物炭,与酸化土壤共培养,探讨辣椒秸秆生物炭对酸化土壤交换性能及土壤酶活性等的影响。结果表明,添加辣椒秸秆生物炭能显著提高酸化土壤 pH,提高幅度与辣椒秸秆生物炭的添加量成正比;土壤交换性 Al^{3+} 含量与辣椒秸秆生物炭添加量呈显著负相关;添加辣椒秸秆生物炭能显著影响土壤 $NO_3^- -N$ 和 $NH_4^+ -N$ 。土壤交换性 Na^+ 和交换性 K^+ 与辣椒秸秆生物炭添加量呈显著正相关;交换性 K^+ 的变化与辣椒秸秆生物炭中 K 元素呈极显著正相关;交换性 Ca^{2+} 、交换性 Mg^{2+} 与辣椒秸秆生物炭添加量之间相关性不显著;总盐基离子、土壤阳离子交换量(CEC)与辣椒秸秆生物炭添加量之间呈显著正相关。土壤脲酶、蔗糖酶与辣椒秸秆生物炭添加量呈正相关;土壤酸性磷酸酶、蛋白酶、过氧化氢酶与辣椒秸秆生物炭添加量之间相关性不显著;土壤酶的几何平均数(GMea)表明添加辣椒秸秆生物炭可以显著改善酸化土壤质量。试验为开拓辣椒秸秆利用途径、改善酸化土壤及提高土壤肥力等方面提供科学依据。

关键词 酸化土壤;辣椒秸秆生物炭;土壤 pH;交换性盐基离子;土壤酶

中图分类号 S156

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2019)01-0117-08

目前,酸性土壤占全世界耕地土壤的 40%,在中国酸性土壤的分布遍及 14 个省区,总面积达 2 030 万 km^2 ,约占全国耕地面积的 21%^[1-3]。近几十年来,各种人为活动显著地加速了土壤酸化^[4-5]。土壤酸化会造成土壤养分利用效率降低、土壤有害物质增多,严重影响土壤性质和土壤微生物活性^[6]。施用石灰是改良酸性土壤、提高作物产量的主要途径^[7]。近期的研究表明,农作物秸秆等农业废弃物直接施入农田也可改良土壤酸度^[8-9],但改良效果因植物材料不同而异,且易被土壤微生物分解,造成改良效果不持久。农作物秸秆经高温厌氧热解可以制成生物炭,生物炭是一种具有高度芳香化及富含碳素的多孔固体颗粒物。关于生物炭对酸化土壤的影响也有报道^[10-12],但关于生物炭对酸化土壤离子交换性能与土壤酶活性变化的研究还很少。

辣椒(*Capiscum annuum* L.)是中国重要的蔬菜作物,年种植面积超过 130 万 hm^2 ,产值和效益居蔬菜作物之首^[13],其生产伴生的大量秸秆已成为蔬菜废弃物的重要来源之一,如何绿色环保

的利用辣椒秸秆已经成为农业废弃物资源利用上的一个重要课题。毕金华等^[14]根据辣椒秸秆高含水率的特点研究其厌氧发酵产沼气潜力,弭宝彬等^[13]利用辣椒秸秆丰富的含氧官能团研究其对重金属铬的吸附行为及机制,陆相龙^[15]利用辣椒秸秆丰富的营养成分和辣椒素含量研究其对饲喂产蛋鸡的效果;但在辣椒生产中还有大量辣椒秸秆废弃物未得到有效利用^[16],因此本研究比较添加不同量的辣椒秸秆生物炭后酸化土壤离子交换性能与土壤酶活性的变化,探讨其对酸化土壤理化性质及土壤酶活性的影响,以期改善土壤酸度、提高土壤肥力及拓宽辣椒秸秆废弃物利用途径提供有益的探索。

1 材料与方法

1.1 土壤材料

土样采自河南省信阳市平桥区平桥镇(N32°06',E114°07')一个百年老茶园,属黄棕壤,采用“S”型多点混合取样法,采自土表 0~20 cm 的土层,土壤样品从茶园取回后按常规方法处理,

收稿日期:2018-03-10 修回日期:2018-03-29

基金项目:河南省大宗蔬菜产业技术体系建设项目(S2010-03-G06);河南省高等学校重点项目(18A210015,15A210002)。

第一作者:李贞霞,女,副教授,硕士生导师,研究方向为蔬菜生理生态。E-mail:842291829@qq.com

剔除植物根系和石块等,充分混合后用四分法留取,土样自然风干后,过 2 mm 筛,备用,土样 pH 4.1,有机质质量分数 14.48 g · kg⁻¹,全氮 1.62 g · kg⁻¹,全磷 1.57 g · kg⁻¹,全钾 12.18 g · kg⁻¹。

1.2 辣椒秸秆生物炭

辣椒茎秆采集于河南省新乡市农业科学院辣椒课题组,将辣椒茎秆除去叶片后室温自然风干,用粉碎机粉碎,过 1 mm 筛,过筛后分别装入

50 mL 的陶瓷坩埚中,装满后压实,加盖后置马弗炉于 500 °C 下进行厌氧热解,升温速率 20 °C · min⁻¹,热解过程持续 4 h,制成辣椒秸秆生物炭,待自然冷却后取出,备用。辣椒秸秆生物炭主要成分采用 Optima 2100pv 电感耦合等离子发射光谱仪(美国 PE 仪器有限公司)测定;pH 按炭:水为 1:5(质量比)搅拌,过滤测定;火焰光度法测定全磷;灰化碱测定采用返滴定法^[17]。辣椒秸秆生物炭的主要成分与化学性质见表 1。

表 1 辣椒秸秆生物炭的基本性质

Table 1 Basic properties of chili straw biochar

测定项目 Determination of the project	主要成分/(μg · g ⁻¹) Principal component				pH	灰化碱/ (cmol · kg ⁻¹) Ashing alkali	产率/% Recovery rate	灰分/% Ash
	P	K	Ca	Mg				
辣椒秸秆生物炭 Chili straw biochar	719.85	612.38	138.69	99.74	10.04	70.3	25.9	23.3

1.3 土壤培养

称取 200 g 风干土,分别以 0、0.5%、1.5% 和 2.5% 的比例加入辣椒秸秆生物炭;将充分混合均匀的土放入一次性塑料杯中,向杯内添加去离子水,使土壤中的含水量达到田间持水量的 70%,以称量法保持持水量,用保鲜膜将其口封住,保鲜膜的中间要留一个小孔,以便气体交换;将塑料杯放到 25 °C 的恒温培养箱中培养,每隔 2~3 d 观察并补充水分。本试验测定培养第 5、10、20、30、40、50、60 天 7 个不同时间段的土壤,培养后将土壤放在室内自然风干,备用。

1.4 土壤性质测定

土壤 pH 采用 1:2.5 土水比测定;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮采用开氏法测定;土壤全磷采用硫酸高氯酸消煮比色法测定;土壤全钾采用 NaOH 提取火焰光度法测定;土壤交换性 H⁺ 和 Al³⁺ 用 1 mol · L⁻¹ KCl 滴定法测定;交换性 K⁺、Na⁺ 用 1 mol · L⁻¹ 乙酸铵交换法处理土壤获取浸出液,用火焰光度计测定;交换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 用 EDTA 络合滴定法测定;土壤中铵态氮采用靛酚蓝比色法测定;土壤阳离子交换量(Cation exchange capacity,简称 CEC)的计算由土壤中交换性 H⁺、Al³⁺、Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 各离子含量之和而得。以上项目的测定主要参考鲍士旦^[18]的方法;土壤硝态氮用紫外分光光度计法测定^[19]。

1.5 土壤酶活性测定

土壤酶活性分析采用关松荫等^[20]的方法;土壤脲酶采用苯酚钠一次氯酸钠比色法,土壤酸性

磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,土壤蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,土壤蛋白酶采用茚三酮比色法。

目前,人们用酶活的几何平均数(GMea)作为评价土壤质量的指数^[21-22]。一般来说,GMea 价值越高,土壤质量就越好。GMea 的计算方法为:GMea=(Ura×Pho×Suc×Pro×Cat)^{1/5}。

1.6 数据处理

用 Excel 2010 软件进行数据处理并制作折线图,采用 DPS 7.55 软件对数据进行方差分析与回归分析。

2 结果与分析

2.1 辣椒秸秆生物炭对土壤 pH 及交换性酸的影响

辣椒秸秆生物炭对土壤 pH 的影响见图 1。由图 1 可知,辣椒秸秆生物炭能显著提高酸化土壤 pH;土壤 pH 与辣椒秸秆生物炭的添加量呈显著正相关(r=0.967 4,P<0.05)。培养 60 d 后,添加量为 0.5%、1.5% 和 2.5% 的土壤 pH 分别升高 7.56%、30.73% 和 36.83%。

辣椒秸秆生物炭对土壤交换性 H⁺ 的影响见图 2。由图 2 可知,各处理交换性 H⁺ 都呈下降趋势,培养 60 d 后,添加量为 0、0.5% 的交换性 H⁺ 的变化趋向一致,添加量为 1.5% 和 2.5% 的交换性 H⁺ 的变化趋向一致;回归分析表明土壤交换性 H⁺ 与辣椒秸秆生物炭添加量之间差异不显著(P>0.05)。

辣椒秸秆生物炭对土壤交换性 Al³⁺ 的影响

见图 3。由图 3 可知,土壤交换性 Al^{3+} 随培养时间的延长而下降;添加辣椒秸秆生物炭处理交换性 Al^{3+} 显著低于未加炭处理;回归分析表明土壤交换性 Al^{3+} 与辣椒秸秆生物炭添加量之间呈显著负相关($r=0.9521, P<0.05$)。

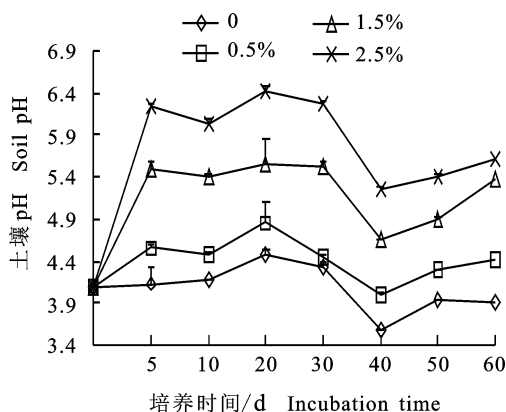


图 1 土壤 pH 随培养时间的变化

Fig. 1 Changing trends of soil pH with incubation time

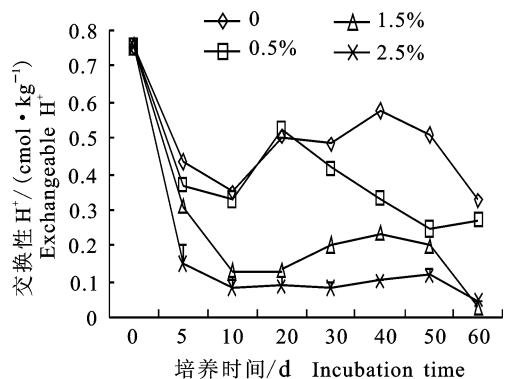


图 2 土壤交换性 H^+ 随培养时间的变化

Fig. 2 Changing trends of soil exchangeable H^+ with incubation time

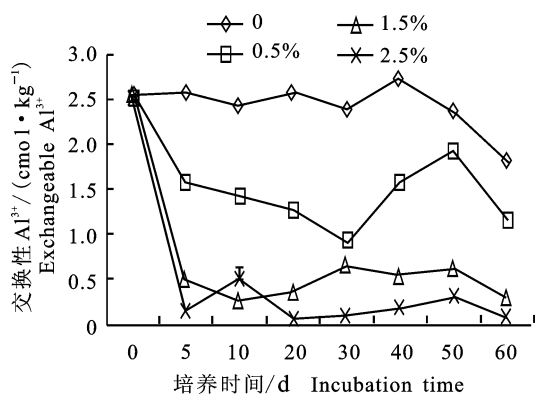


图 3 土壤可交换性 Al^{3+} 随培养时间的变化

Fig. 3 Changing trends of soil exchangeable Al^{3+} with incubation time

2.2 辣椒秸秆生物炭对土壤 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 的影响

辣椒秸秆生物炭对土壤 $NO_3^- - N$ 的影响见图 4。由图 4 可知,各处理 $NO_3^- - N$ 随培养时间变化都有上升趋势;添加量为 2.5% 时 $NO_3^- - N$ 明显高于其他处理;对照土壤 $NO_3^- - N$ 随培养时间变化一直低于其他处理;回归分析表明, $NO_3^- - N$ 与辣椒秸秆生物炭添加量之间相关性不强 ($P > 0.05$)。

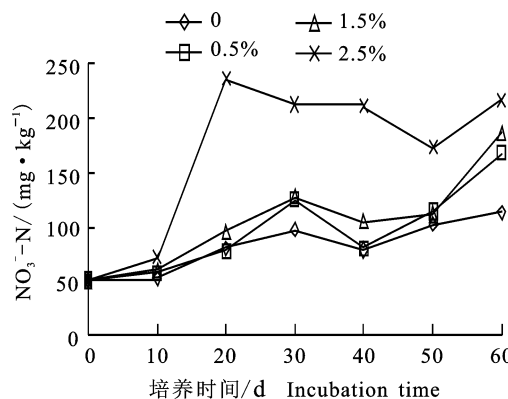


图 4 土壤 $NO_3^- - N$ 随培养时间的变化

Fig. 4 Changing trends of soil $NO_3^- - N$ with incubation time

辣椒秸秆生物炭对土壤 $NH_4^+ - N$ 的影响见图 5。由图 5 可知,各处理 $NH_4^+ - N$ 随培养时间变化都呈下降趋势,添加辣椒秸秆生物炭处理 $NH_4^+ - N$ 在培养 10 d 到 30 d 期间会有起伏,但 30 d 后变化趋于一致。添加辣椒秸秆生物炭处理与对照相比 $NH_4^+ - N$ 无显著性变化。 $NH_4^+ - N$ 与辣椒秸秆生物炭添加量之间相关性不显著 ($P > 0.05$)。

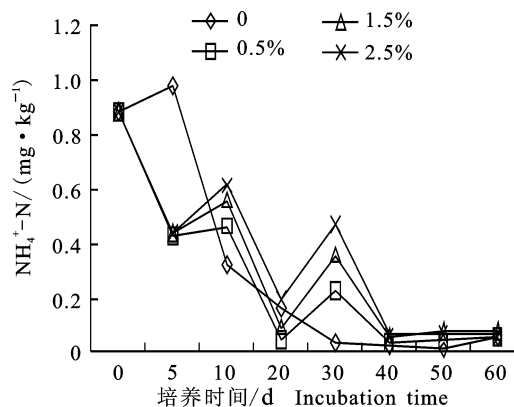


图 5 土壤 $NH_4^+ - N$ 随培养时间的变化

Fig. 5 Changing trends of soil $NH_4^+ - N$ with incubation time

2.3 辣椒秸秆生物炭对土壤交换性能的影响

添加辣椒秸秆生物炭对土壤交换性能的影响见表 2。由表 2 可知,土壤交换性 Na^+ 在添加量为 0 和 0.5% 之间差异不显著,添加量为 1.5% 和 2.5% 之间交换性 Na^+ 差异显著;交换性 K^+ 随着辣椒秸秆生物炭添加量的增加而增大,添加辣椒秸秆生物炭各处理土壤交换性 K^+ 显著高于对照。土壤交换性 Na^+ 与辣椒秸秆生物炭添加量之间呈显著正相关($r=0.9616, P<0.05$);交换性 K^+ 与辣椒秸秆生物炭添加量之间呈极显著正相关($r=0.9975, P<0.01$)。

交换性 Ca^{2+} 在添加量为 0、0.5% 之间差异不显著,添加量为 1.5% 和 2.5% 之间交换性 Ca^{2+} 差异显著;交换性 Mg^{2+} 在添加量为 0、0.5% 和 1.5% 之间差异不显著,添加量为 2.5% 交换性 Mg^{2+} 显著高于其他处理;交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与辣椒秸秆生物炭添加量之间相关性不显著。

总盐基离子、土壤 CEC 变化趋势与交换性 Na^+ 相同,其与辣椒秸秆生物炭添加量之间呈显著正相关,其相关系数分别为 $r=0.9803$ 和 $r=0.9844, P<0.05$ 。

表 2 辣椒秸秆生物炭对土壤可交换性盐基离子的影响($\bar{x}\pm s$)
Table 2 Effect of chili straw biochar for soil exchangeable base cations

处理 Treatment	交换性盐基离子/($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) Exchangeable base cations				总盐基离子/ ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total exchangeable base cations	CEC
	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}		
0	0.00±0.00 c	0.54±0.02 d	13.63±0.23 c	2.77±0.09 b	16.94±0.26 c	18.88±0.25 c
0.5%	0.00±0.00 c	1.14±0.04 c	13.23±0.22 c	2.90±0.12 b	17.31±0.30 c	18.75±0.36 c
1.5%	0.60±0.23 b	3.14±0.05 b	18.07±0.21 a	2.60±0.21 b	24.13±0.06 b	24.72±0.30 b
2.5%	1.69±0.05 a	4.68±0.07 a	15.83±0.09 b	4.93±0.07 a	27.13±0.06 a	27.27±0.06 a

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平的差异显著性,下同。

Note: The different lowercase letters in same column data indicate significant difference at 0.05 level, the same below.

从上述可见,添加辣椒秸秆生物炭可以影响土壤交换性能的多个因素,而这些因素间可能存在多重共线性,特别是各因子间存在高度依赖关系时,都会影响到其与辣椒秸秆生物炭添加量的关系,为此又做了逐步线性回归分析;逐步线性回归分析能从大量可供选择的变量中选出对建立回归方程重要的变量,逐步剔除不显著的变量,最终获得最优方程。各因素对辣椒秸秆生物炭添加量的逐步线性回归分析结果表明,添加辣椒秸秆生物炭直接影响土壤交换性 K^+ 及土壤总盐基离子,其回归方程为 $y=0.0145+0.0089x_1-0.0011x_2, P=0.015 (P<0.05)$, x_1 为交换性 K^+ , x_2 为总盐基离子, y 为辣椒秸秆生物炭添加量。

差异很大。土壤脲酶活性在辣椒秸秆生物炭添加量为 2.5% 时显著高于其他处理;辣椒秸秆生物炭添加量为 0 和 0.5% 之间差异不显著;土壤蔗糖酶活性与土壤脲酶活性变化一致;相关分析表明土壤脲酶与辣椒秸秆生物炭添加量呈显著正相关($r=0.9506, P<0.05$),土壤蔗糖酶与辣椒秸秆生物炭添加量呈极显著正相关($r=0.9916, P<0.01$)。

土壤酸性磷酸酶活性在辣椒秸秆生物炭添加量为 0.5% 时最高,1.5% 时最低;土壤蛋白酶活性在辣椒秸秆生物炭添加量为 0.5% 时显著高于其他处理;添加辣椒秸秆生物炭的各处理过氧化氢酶活性都显著高于对照,辣椒秸秆生物炭添加量为 2.5% 时过氧化氢酶活性最高;但土壤酸性磷酸酶、蛋白酶、过氧化氢酶与辣椒秸秆生物炭添加量之间相关性不显著。

2.4 辣椒秸秆生物炭对土壤酶活性的影响

由表 3 可知,培养 60 d 后各处理土壤酶活性

表 3 辣椒秸秆生物炭对土壤酶活性的影响($\bar{x}\pm s$)
Table 3 Effect of chili straw biochar on soil enzyme

处理 Treatment	脲酶/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) Ureas	酸性磷酸酶/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) Acid phosphatase	蔗糖酶/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) Sucrase	蛋白酶/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Protease	过氧化氢酶/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) Catalase
0	0.16±0.01 c	0.51±0.17 b	2.31±0.16 c	0.14±0.01 b	0.89±0.02 c
0.5%	0.16±0.01 c	0.69±0.05 a	3.66±0.42 c	0.16±0.00 a	1.40±0.01 b
1.5%	0.18±0.01 b	0.48±0.03 c	13.82±0.54 b	0.12±0.01 c	1.35±0.03 b
2.5%	0.22±0.01 a	0.59±0.10 b	21.19±0.11 a	0.09±0.01 d	1.75±0.02 a

土壤酶的几何平均数(GMea)随培养时间的变化趋势见图 6。由图 6 可知,辣椒秸秆生物炭添加量为 0 和 0.5% 的 2 个处理变化趋势一致,差异不显著;辣椒秸秆生物炭添加量为 1.5% 和 2.5% 的 2 个处理变化趋势一致,差异不显著;但辣椒秸秆生物炭添加量为 1.5% 和 2.5% 的 GMea 显著高于辣椒秸秆生物炭添加量为 0 和 0.5% 的 2 个处理 ($P < 0.01$)。说明添加辣椒秸秆生物炭能够提高 GMea,其提高量与辣椒秸秆生物炭的添加量有关。

2.5 土壤酶活性变化的影响因素分析

为分析影响酶活性的主要因素,对土壤 pH、交换性酸、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 及土壤交换性盐基等因素做逐步线性回归分析,结果见表 4。由表 4 可知,脲酶、蛋白酶与交换性 Na^+ 关系显著,脲酶随交换性 Na^+ 增加而活性增强,蛋白酶随交换性 Na^+ 增加而活性变弱。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、交换性 Mg^{2+} 与酸性磷酸酶关系紧密,但 $P = 0.3338 (P > 0.05)$,其回归关系不显著。蔗糖酶随 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、交换性

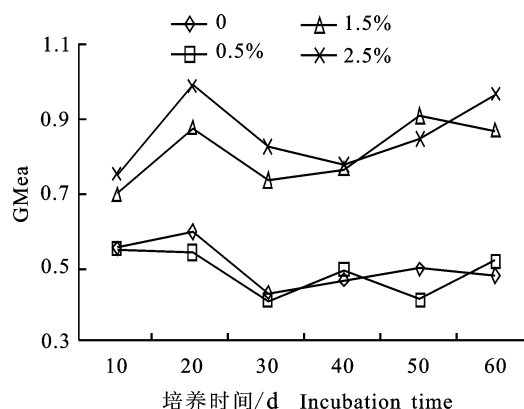


图 6 GMea 随培养时间的变化

Fig. 6 Changing trends of GMea with incubation time K^+ 的增加而活性增强, $P = 0.0038 (P < 0.01)$, 其回归关系呈极显著,相关系数为 1.0000,拟合度极高。过氧化氢酶受 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、交换性 Ca^{2+} 影响,随 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 增加而增强,随交换性 Ca^{2+} 增加而活性减弱, $P = 0.0276 (P < 0.05)$,其回归关系显著。

表 4 土壤酶活性与各因素的逐步线性回归分析

Table 4 Linear stepwise regression analysis of each element and soil enzyme

y 因素 y factors	回归方程 Regression equation	x 因素 x factors	P 值 P values	相关系数 Correlation coefficient
脲酶 Ureas	$y = 0.1593 + 0.0322x_1$	x_1 交换性 Na^+ x_1 exchangeable Na^+	$P = 0.0075^{**}$	0.9952
蛋白酶 Protease	$y = 0.1506 - 0.0365x_1$	x_1 交换性 Na^+ x_1 exchangeable Na^+	$P = 0.0415^*$	0.9585
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	$y = 0.9567 + 0.0019x_1 - 0.0470x_2$	$x_1 \text{NO}_3^- \text{-N}, x_2$ 交换性 Mg^{2+} $x_1 \text{NO}_3^- \text{-N}, x_2$ exchangeable Mg^{2+}	$P = 0.3338$	0.9426
蔗糖酶 Sucrase	$y = 3.2811 - 0.0345x_1 + 5.4211x_2$	$x_1 \text{NO}_3^- \text{-N}, x_2$ 交换性 K^+ $x_1 \text{NO}_3^- \text{-N}, x_2$ exchangeable K^+	$P = 0.0038^{**}$	1.0000
过氧化氢酶 Catalase	$y = 0.4608 + 0.0092x_1 - 0.0457x_2$	$x_1 \text{NO}_3^- \text{-N}, x_2$ 交换性 Ca^{2+} $x_1 \text{NO}_3^- \text{-N}, x_2$ exchangeable Ca^{2+}	$P = 0.0276^*$	0.9996

3 讨论

添加辣椒秸秆生物炭能显著提高酸化土壤 pH,土壤 pH 提高幅度与辣椒秸秆生物炭的添加量呈显著正相关;这一结论与肖瑞芳等^[23]对生物质炭对红壤和黄壤的影响研究及潘凤娥等^[24]对生物质炭对砖红壤影响的研究结论一致;分析土壤 pH 与灰化碱的关系发现,土壤 pH 与添加的辣椒秸秆生物炭灰化碱呈显著正相关 ($P < 0.05$),说明土壤 pH 的提高与辣椒秸秆生物炭呈碱性有关。土壤交换性 H^+ 与交换性 Al^{3+} 与土壤 pH 都呈显著负相关 ($P < 0.05$);但培养 60 d 后,

交换性 Al^{3+} 活性比交换性 H^+ 活性降低了 6.19 倍;这说明酸化土壤决定 pH 变化的主要因素是交换性 Al^{3+} ,这与苏有健等^[25]对皖南茶园土壤活性铝形态分布与土壤 pH 关系的研究结论一致。土壤中氮素形态也影响土壤 pH 变化,分析 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与土壤交换性 Al^{3+} 关系发现,二者呈显著负相关 ($P < 0.05$), $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 升高,交换性 Al^{3+} 活性降低;添加辣椒秸秆生物炭提高土壤 pH,土壤交换性 Al^{3+} 降低,促进土壤硝化作用的进行,从而 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 活性增强,这与罗煜等^[26]、陈玉真等^[27]的研究结论一致。

添加辣椒秸秆生物炭显著改善土壤中交换性

Na⁺ 与交换性 K⁺ 的含量;土壤中交换性 Na⁺ 从无到有的改变可能与土壤 pH 变化有关;培养试验结束土壤交换性 K⁺ 比交换性 Na⁺ 提高了 4.36 倍,分析土壤交换性 K⁺ 与辣椒秸秆生物炭中 K 元素关系发现,二者呈极显著正相关($P < 0.01$),说明交换性 K⁺ 的变化主要受辣椒秸秆生物炭的影响。土壤中交换性 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 与辣椒秸秆生物炭中 Ca 和 Mg 元素关系不显著($P > 0.05$),说明土壤中交换性 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 主要受土壤环境因素的影响,也可能与辣椒秸秆生物炭中 Ca、Mg 元素含量低有关;总盐基离子、土壤 CEC 与辣椒秸秆生物炭添加量之间呈显著正相关;土壤 CEC 是土壤所含有的交换性阳离子的最大量,土壤 CEC 是影响土壤缓冲能力高低、评价土壤保水保肥能力、改良土壤和合理施肥的重要依据^[28];添加辣椒秸秆生物炭能提高酸化土壤缓冲能力及保水保肥能力。

土壤酶是一种生物催化剂,它们参与土壤的发生和发育及其与有效肥力形成有关的诸多过程的主要环节,其活性已被作为土壤质量的生物指标^[29-30]。现有研究表明土壤脲酶和蛋白酶都受土壤有机质及全氮代谢的影响^[31];本研究表明土壤脲酶、蛋白酶与交换性 Na⁺ 关系显著,分析原因可能与土壤有机质及氮素影响土壤 pH 变化,而土壤 pH 的改变直接影响土壤交换性 Na⁺ 变化有关。本研究中蔗糖酶与 NO₃⁻-N、交换性 K⁺ 呈显著极著相关,分析原因可能与辣椒秸秆的添加改变土壤 pH 与交换性 K⁺ 含量有关。本试验中过氧化氢酶活性随 NO₃⁻-N 增加而增大,随交换性 Ca²⁺ 增大而减小;这与赵静等^[32]研究过氧化氢酶与交换性 Ca²⁺ 的关系相反,分析原因可能与采样土壤类型有关。土壤酶活性易受具体的土壤环境影响,土壤环境一些微小的变化如温度、水分等都会影响到酶活性的改变,因此研究土壤酶活性,探究其变化规律是一项复杂而繁琐的事情,生物质炭对土壤酶活性的影响研究还较少,后续应该在大田环境中进一步探讨。

4 结论

添加辣椒秸秆生物炭能显著提高酸化土壤 pH,降低土壤交换性 H⁺ 和 Al³⁺,影响土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 变化。随着土壤 pH 的增高,土壤交换性 Na⁺ 从被固定状态变为可以利用状态;土壤交换性 K⁺ 与辣椒秸秆生物炭中 K 元素

含量呈极显著正相关;土壤交换性 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 与辣椒秸秆生物炭添加量之间相关性不显著;添加辣椒秸秆生物炭能提高酸化土壤缓冲能力及保水保肥能力。土壤脲酶、土壤蔗糖酶与辣椒秸秆生物炭添加量呈正相关;土壤酸性磷酸酶、蛋白酶、过氧化氢酶与辣椒秸秆生物炭添加量之间相关性不显著;土壤酶的几何平均数(GMea)表明添加辣椒秸秆生物炭可以显著改善酸化土壤质量。

参考文献 Reference:

- [1] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008-1010.
- [2] XU R K, JI G L. Effects of H₂SO₄ and HNO₃ on soil acidification and aluminum speciation in variable and constant charge soils[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2001, 129(1/4): 33-43.
- [3] ZHANG H M, WANG B R, XU M G. Effects of inorganic fertilizer inputs on grain yields and soil properties in a long-term wheat-corn cropping system in south China[J]. *Commun Soil Science Plant Analysis*, 2008, 39(11/12): 1583-1599.
- [4] BOLAN N S, HEDELEY M J, WHITE R E. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures[J]. *Plant Soil*, 1991, 134(1): 53-63.
- [5] HU Z Y, XU C K, ZHOU L N, *et al.* Contribution of atmospheric nitrogen compounds to N deposition in a broad-leaf forest of southern China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 360-365.
- [6] MATSUSHIMA F, MESHITSUKA S, NOSE T. Contents of Al and Mn in tea leaves and tea infusions[J]. *Nippon Eiseigaku Asshi*, 1993, 48(4): 864-872.
- [7] ALCORDO I S, RECHCIGL J E. Phosphogypsum in agriculture: a review[J]. *Advance Agronomy*, 1993, 49: 55-118.
- [8] WANG N, LI J Y, XU R K. Use of various agricultural by-products to study the pH effects in an acid tea garden soil [J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25(2): 128-132.
- [9] MAO J, XU R K, LI J Y, *et al.* Dicyandiamide enhances liming potential of two legume materials when incubated with an acid Ultisol[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42 (9): 1632-1635.
- [10] 王 峰, 陈玉真, 吴志丹, 等. 施用生物质炭对酸性茶园土壤氨挥发的影响[J]. *茶叶科学*, 2017, 37(1): 60-70.
WANG F, CHEN Y ZH, WU ZH D, *et al.* Effect of biochar addition on ammonia volatilization in acid tea garden [J]. *Journal of Tea Science*, 2017, 37(1): 60-70.
- [11] 何志龙, 夏文建, 周 维, 等. 添加秸秆生物质炭对酸化茶园土壤 N₂O 和 CO₂ 排放的短期影响研究[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(7): 1230-1236.

- HE ZH L, XIA W J, ZHOU W, *et al.* Effects of wheat straw derived biochar on acidified tea garden soil N_2O and CO_2 emission in short-term laboratory experiments [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(7): 1230-1236.
- [12] 孙永红, 王文娇, 赵征宇, 等. 生物质炭对茶园土壤水溶性氟吸附特性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 376-383.
- SUN Y H, WANG W J, ZHAO ZH Y, *et al.* Effects of biochar on adsorption characteristics of water-soluble fluorine in tea garden soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4): 376-383.
- [13] 弭宝彬, 杨 剑, 周火强, 等. 辣椒秸秆对铬 $Cr(VI)$ 的吸附行为及机理[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S1): 90-96.
- MI B B, YANG J, ZHOU H Q, *et al.* Research on the adsorption behavior and mechanism of $Cr(VI)$ by pepper stalk[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(S1): 90-96.
- [14] 毕金华, 陈广银, 陈 乐, 等. 辣椒秸秆不同部位化学组分及厌氧发酵产沼气潜力[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 2073-2078.
- BI J H, CHEN G Y, CHEN L, *et al.* Chemical composition of different parts of chili stalks and their biogas production potentials during anaerobic fermentation[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(7): 2073-2078.
- [15] 陆相龙. 辣椒秸秆成分及其饲喂产蛋鸡效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- LU X L. Ingredients analysis of pepper straw and feeding effect estimation in laying hens[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [16] 周卫东, 陆相龙, 邵 涛, 等. HPLC 法测定辣椒秸秆中辣椒素和二氢辣椒素含量[J]. 药物分析杂志, 2012, 32(6): 1017-1021.
- ZHOU W D, LU X L, SHAO T, *et al.* HPLC determination of capsaicin and dihydrocapsaicin in pepper straw[J]. *China Journal Pharmaceutical Analysis*, 2012, 32(6): 1017-1021.
- [17] SLATTERY W J, RIDLEY A M, WINDSOR S M. Ash alkalinity of animal and plant products [J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1991, 31(1): 1-4.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- BAO SH D. Soil and Agrochemistry Analysis[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2008.
- [19] 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.
- LU R K. Analysis Methods of Soil and Agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [20] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN S Y, ZHANG D SH, ZHANG ZH M. Soil Enzyme and Its Research Method[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [21] GARCA-RUIZ R, OCHOA V, HINOJOSA M B, *et al.* Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems[J]. *Soil Biol Biochemistry*, 2008, 40: 2137-2145.
- [22] GARCÍA-RUIZ R, OCHOA V, VINEGLA B, *et al.* Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: influence of seasonality and site features[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41: 305-314.
- [23] 肖瑞芳, 沈普翠, 赵秀兰, 等. 三种生物质炭对红壤和黄壤镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 915-920.
- XIAO R F, SHEN P C, ZHAO X L. Effects of three types of biochar on bioavailability of cadmium in a red soil and a yellow soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 915-920.
- [24] 潘凤娥, 胡俊鹏, 索 龙, 等. 添加玉米秸秆及其生物质炭对砖红壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 396-402.
- PAN F E, HU J P, SUO L, *et al.* Effect of corn stalk and its biochar on N_2O emissions from latosol soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 396-402.
- [25] 苏有健, 廖万有. 皖南茶园土壤活性铝形态分布与土壤 pH 和植茶年限的关系[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 721-728.
- SU Y J, LIAO W Y. Influences of soil pH and cultivation years on active aluminum species distribution from tea soils in southern Anhui[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 721-728.
- [26] 罗 煜, 赵小蓉, 李贵桐, 等. 生物质炭对不同 pH 值土壤矿质氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 166-173.
- LUO Y, ZHAO X R, LI G T, *et al.* Effect of biochar on mineral nitrogen content in soils with different pH values [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 166-173.
- [27] 陈玉真, 王 峰, 吴志丹, 等. 添加生物质炭对酸性茶园土壤 pH 和氮素转化的影响[J]. 茶叶学报, 2016, 57(2): 64-70.
- CHEN Y ZH, WANG F, WU ZH D, *et al.* Effect of biochar addition on pH and nitrogen transformation in acidic soil at tea plantations[J]. *Acta Tea Sinica*, 2016, 57(2): 64-70.
- [28] 廖凯华, 徐绍辉, 程桂福, 等. 土壤 CEC 的影响因子及 Cokriging 空间插值分析——以青岛市大沽河流域为例[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 26-32.
- LIAO K H, XU SH H, CHENG G F, *et al.* Influencing factors and cokriging spatial interpolation analysis of soil cation exchange capacity—a case study of dagu river basin Qingdao city[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 26-32.
- [29] 杨 扬, 刘炳君, 房江育, 等. 不同植茶年龄茶树根际与非根际土壤微生物及酶活性特征研究[J]. 中国农学通报,

- 2011, 27(27):118-121.
- YANG Y, LIU B J, FANG J Y, *et al.* The study on characteristics of microbes and enzyme activity in rhizosphere and out-rhizosphere soil of tea garden at various ages[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(27): 118-121.
- [30] 颜 慧, 钟文辉, 李忠佩, 等. 长期施肥对红壤水稻土磷脂脂肪酸特性和酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 71-75.
- YAN H, ZHONG W H, LI ZH P, *et al.* Effects of long-term fertilization on phospholipid fatty acids and enzyme activities in paddy red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 71-75.
- [31] 朱 丽, 郭继勋, 鲁 萍, 等. 松嫩草甸 3 种主要植物群落土壤脲酶的初步研究[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(5): 638-643.
- ZHU L, GUO J X, LU P, *et al.* Primarg study on the soil urease activity in three main communities in the songnen meadow[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(5): 638-643.
- [32] 赵 静, 韩甜甜, 谢兴斌, 等. 酸化梨园土壤酶活性与土壤理化性质之间的关系[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 115-120.
- ZHAO J, HAN T T, XIE X B, *et al.* Relationship between soil enzymatic activity and soil property in selected acidified pear orchards[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 115-120.

Effect of Chili Straw Biochar for the Exchangeable Property and Enzyme Activity of Acidified Soil

LI Zhenxia, REN Xiujuan, QI Xuejiao, YU Xiaoyan and WANG Guangyin

(College of Horticulture and Landscape, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang Henan 453003, China)

Abstract In order to investigate the influence of chili straw biochar for the exchangeable property and enzyme activity of acidified soil, this research used the technology of high-temperature hot-press drying to make chili straw into chili straw biochar, which cultivated together with the acidified soil. The results showed that the adding of the chili straw biochar could remarkably improve acidified soil pH. While the increase was proportional to the increase of the amount of chili straw biochar. Exchangeable Al^{3+} had a significant negative correlation with the addition amount of the chili straw biochar. The adding of the chili straw biochar can influence the change of soil $NO_3^- -N$ and $NH_4^+ -N$ greatly. Soil exchangeable Na^+ and exchangeable K^+ had a significant positive correlation with the addition amount of the chili straw biochar. The change of exchangeable K^+ was positively correlated with the K elements in chili straw biochar. Soil exchangeable Ca^{2+} and exchangeable Mg^{2+} were not significantly correlated with the addition amount of the chili straw biochar. Total exchangeable base cations and soil CEC had a significant positive correlation with the addition amount of the chili straw biochar. Soil urease and sucrase had a significant positive correlation with the addition amount of the chili straw biochar. Soil acid phosphatase and catalase and protease were not significantly correlated with the addition amount of the chili straw biochar. The GMea of soil enzyme showed that adding chili straw biochar could significantly improve acidified soil quality. The research conclusions were expected to provide theoretical basis for the utilization of chili straw and improved acidizing soil and improve soil fertility.

Key words Acidified soil; Chili straw biochar; Soil pH; Exchangeable base cations; Soil enzyme

Received 2018-03-10 **Returned** 2018-03-29

Foundation item Province Construction Project for Bulk Vegetable Industry Technical System (No. S2010-03-G06); Key Projects of Henan Provincial Universities (No. 18A210015, No. 15A210002).

First author LI Zhenxia, female, associate professor, master supervisor. Research area: vegetable physiology and ecology. E-mail: 842291829@qq.com

(责任编辑: 潘学燕 **Responsible editor: PAN Xueyan**)