

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22530

施用生物炭对红壤富硒区硒生物有效性的影响

路丹^{1, 2}, 黄太庆^{3, 4*}, 陈锦平^{3, 4}, 廖青^{3, 4}, 韦燕燕^{1, 2}, 邢颖^{3, 4},
梁潘霞^{3, 4}, 潘丽萍^{3, 4}, 江泽普^{3, 4}, 刘永贤^{3, 4}

(1. 广西大学农学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西农业环境与农产品安全重点实验室, 广西 南宁 530004;
3. 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 广西 南宁 530007; 4. 广西富硒农业研究中心, 广西 南宁 530007)

摘要: 研究生物炭调理措施对红壤区富硒土壤硒形态及硒生物有效性的影响, 为富硒土壤硒活化及硒资源高效利用提供理论依据。通过盆栽试验, 连续开展三批玉米苗期研究, 设置 3 个生物炭添加水平: 土壤质量 0.5% (T1)、1.0% (T2) 和 1.5% (T3), 以不添加生物炭处理为对照 (CK), 分析生物炭添加对土壤硒形态及玉米硒素营养的影响。结果表明: 施用生物炭后, T1、T2 和 T3 的可溶态硒分别平均提高 0.46、0.42 和 0.43 个百分点; 可交换态硒分别平均提高 0.61、1.66 和 1.50 个百分点; 降低了铁锰氧化物结合态硒的比例; 有机结合态硒比例先降低后逐渐提高, 残渣态硒比例则先提高后逐渐降低。玉米根系硒含量与土壤可溶态、可交换态及有效硒含量均呈显著线性正相关, 玉米茎叶硒含量与土壤各硒形态之间的相关性不显著。施用生物炭能提高玉米植株体内的硒累积量, T1、T2 和 T3 处理玉米植株平均硒累积量分别比 CK 提高 9.46%、31.00% 和 21.22%。可见, 在红壤上施用生物炭能有效提高土壤硒的生物有效性并促进硒在植物体内的累积, 其中以添加土壤质量 1.0% 的生物炭效果最好。

关键词: 生物炭; 硒形态; 富硒土壤; 有效硒

硒是人体必需的微量营养元素, 它通过硒蛋白形式参与人体代谢过程, 是人体氧自由基清除酶——谷胱甘肽过氧化物酶活性位点必要组成成分, 具有清除过氧化物、防止细胞损伤、延缓细胞衰老等作用。全球有 5 ~ 10 亿人每日硒摄入量不足^[1], 在中国有 61.1% 地区的居民膳食摄入硒的量不足, 44.4% 地区的居民摄入量低于人体生理需求量^[2]。植物硒被认为是人体硒的主要来源^[3], 当土壤全硒含量低或土壤硒有效性低时均会引发植物硒含量低^[4]。在南方湿热铁铝土区域的土壤全硒含量普遍较高^[5-7], 但土壤中的硒主要以亚硒酸盐态存在, 且易被土壤中铁铝氧化物、黏土矿物所吸附而形成铁铝复合物, 使得红壤中硒的生物有效性较低^[8]。有学者对广西鹿寨县的稻田土壤及水稻硒含量分布特征进行分析, 研究发现采集的 28 个土壤样品中, 硒含量最小为 0.36 mg/kg, 最大为 3.82 mg/kg, 平均值

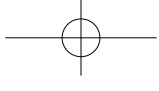
为 1.00 mg/kg, 但水稻籽粒硒含量最小为 0.026 mg/kg, 最大为 0.532 mg/kg, 平均值仅为 0.079 mg/kg^[9]。根据《广西土地质量地球化学评价报告 (2016 年)》数据显示, 广西在 21 个调查评价县共发现富硒土壤 134.53 万 hm², 但对覆盖广西 97% 县份的 3445 份农户种植大米调查结果显示, 大米平均硒含量仅为 0.04 mg/kg^[10]。因此, 在土壤富硒区域开展硒活化研究对提高土壤硒资源高效利用有着重要意义。研究表明轮作^[11]、灌溉^[12]、施肥管理^[13-14]等均会影响土壤硒的有效性。添加调理剂提高土壤 pH 值被研究证实是提高土壤有效硒和作物硒吸收的有效方法^[15-16]。但也有研究利用石灰和燃煤炉渣对中国南方酸性典型富硒区土壤硒有效性进行调控, 发现相同的调控剂在不同的土壤上对有效硒的影响为或提高、或降低, 显示出不同的结果, 相同的土壤上不同的调理剂添加量对有效硒的影响也有很大差别^[8]。这也说明农业措施对土壤硒活化的效应还会受实际生产条件的极大影响^[17]。对于南方红壤, 生物炭是较好的土壤调理剂^[18], 它一般呈碱性, 能有效提高土壤 pH 值, 同时, 因其有巨大的比表面积, 一方面能改善土壤结构, 另一方面也对土壤营养有一定的吸附作用, 但其在富硒红壤上施用对土壤硒形态及作物的硒素营养的影响还少见报道。本研究通过盆栽试

收稿日期: 2022-08-29; 录用日期: 2022-10-14

基金项目: 广西自然科学基金项目 (2017GXNSFBA198112); 富硒农业科技先锋队专项行动 (桂农科盟 202214); 广西农业科学院基本科研业务专项 (桂农科 2021JM08)。

作者简介: 路丹 (1985-), 实验师, 硕士, 主要从事作物营养与环境生态研究。E-mail: dany5136@163.com。

通讯作者: 黄太庆, E-mail: htaiqing@163.com。



验,研究施用生物炭对富硒红壤土壤 pH 值、土壤硒形态、作物硒素营养等的影响,以明确生物炭对土壤硒活化的效应,为红壤区土壤硒活化提供理论支撑。

1 材料及方法

1.1 试验材料

本研究于 2020 年 8—10 月在广西壮族自治区农业科学院试验研究基地的网室大棚进行,采取盆栽试验开展玉米栽培试验研究。盆栽试验土壤采集于广西桂林市永福县百寿镇,土壤为第四纪红土发育而成的红壤,土壤的基本理化性质为 pH 值 6.82,有机质 2.20%,全氮 1.90 g/kg,全磷 1.34 g/kg,全钾 14.70 g/kg,全硒 0.79 mg/kg。施用的生物炭为木屑高温厌氧煅烧而成, pH 值 8.0,有机碳 22.60%,全氮 0.36%,全磷 0.21%,全钾 0.26%,全硒 0.04 mg/kg。栽培玉米品种为桂单 162。

1.2 试验设计

将采集的土壤晾干、粉碎、过 2 mm 筛;装入直径为 32 cm、高为 25 cm 的盆中,每盆装土 10 kg。试验设 3 个生物炭添加水平,分别是土壤质量 0.5% (T1)、1.0% (T2) 和 1.5% (T3),以不添加生物炭处理为对照 (CK),共 4 个处理,每个处理 4 次重复。试验连续开展 3 批玉米苗期种植,每批种植 30 d,生物炭在种植第一批玉米之前与土壤充分混匀后装入盆中,之后种植的第二、三批玉米不再添加生物炭。每批玉米种植只施基肥即复合肥 (15-15-15) 3.00 g/盆,并于每批玉米种植之前与土壤充分混匀。玉米生长过程中,每天以田间持水量的 70% 进行灌溉补充水分。每盆播种玉米 5 粒,当玉米长至 3 叶时间苗,每盆保留 2 株。

1.3 样品采集与分析方法

当每批玉米长至 30 d 时,分别收获玉米茎叶和根系样品,用清水洗净后烘干、称重,粉碎后待测全硒含量;每批玉米收获时同时采集适量土壤样品,分析土壤理化性质、土壤硒形态含量等。植株全硒含量采用《食品安全国家标准 食品中硒的测定》(GB 5009.93—2017)中的氢化物原子荧光光谱法测定。土壤硒形态采用五步连续浸提法浸提,即准确称取风干过筛 (0.15 mm) 土样 $1.000 \times g$ (精确到 0.0001 g),置于 100 mL 聚乙烯离心管中,按土液比 1:10 的比例逐级加入浸提液连续浸提,再分别经过恒温振荡和离心,最终分离出 5 种形态的硒,具体步骤如下:①可溶态硒:向离心管中加入

0.25 mol/L KCl 溶液于 25℃下浸提 1 h,于 4000 r/min 离心 10 min 后收集上清液,于 4℃下储存待测;②可交换态硒:向第一步的土壤残留物中加入 0.7 mol/L KH_2PO_4 (pH 值 5.0) 溶液,于 25℃下浸提 4 h 后离心 10 min 并收集上清液;③铁锰氧化物结合态硒:向第二步的土壤残留物中加入 2.5 mol/L HCl,于 90℃下浸提 4 h,离心 10 min 后收集上清液;④有机结合态硒:向第三步的土壤残留物中加入 8 mL 5% $K_2S_2O_8$ 溶液和 2 mL (1:1) HNO_3 ,置于 90℃恒温水浴锅中加热 3 h,离心 10 min 后取上清液;⑤残渣态硒:第四步的土壤残渣烘干后按照土壤总硒的测定方法《土壤中全硒的测定》(NY/T 1104—2006)消解定容,用原子荧光光度计测定。可溶态硒与交换态硒之和为有效硒含量。

1.4 数据分析

使用 Excel 2019、SPSS 22.0 对数据进行统计分析和图表制作,用 LSD 法对各处理进行差异显著性检验。

2 结果与分析

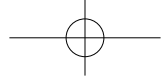
2.1 添加生物炭对土壤 pH 值的影响

添加生物炭会使土壤的 pH 值发生显著变化 (表 1),经过玉米苗期 30 d 的生长后,添加 0.5% 和 1.5% 生物炭处理的土壤 pH 值显著高于对照处理,添加 1.0% 处理的土壤 pH 值与对照差异不显著,但也高 0.18。种植第二和第三批玉米苗期后,虽然添加生物炭处理的土壤 pH 值还高于对照处理,但各处理之间的差异均不显著。从表 1 还可看出,随着继续种植玉米,无论是添加生物炭还是对照处理,土壤的 pH 值也逐渐降低,至第三批玉米苗收获后,对照处理的 pH 值较第一批收获后的降低 0.21,而 T1、T2、T3 处理的分别降低 0.46、0.32、0.29,这可能是由于每批玉米种植之前都投入一定量的化肥,加上玉米根系分泌物及灌溉等综合因素所导致。

表 1 不同生物炭处理的土壤 pH 值

处理	第一批	第二批	第三批
CK	7.19 ± 0.11b	7.15 ± 0.16a	6.98 ± 0.15a
T1	7.50 ± 0.09a	7.21 ± 0.12a	7.04 ± 0.26a
T2	7.37 ± 0.19ab	7.27 ± 0.12a	7.05 ± 0.14a
T3	7.44 ± 0.13a	7.30 ± 0.16a	7.15 ± 0.21a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。



2.2 施用生物炭对玉米苗期硒含量的影响

如图1所示,生物炭添加会对玉米苗期硒素营养产生影响,其中对玉米根系硒含量的影响要高于对茎叶硒含量的影响。但由于玉米生长期气候因素的差异,不同批次的玉米硒含量之间也存在较大差异。第一批玉米添加生物炭处理的根系硒含量均高于对照处理,T1、T2、T3处理的根系硒含量分别比对照高1.04%、37.73%、23.83%,其中T2和T3处理的根系硒含量均显著高于对照处理;而添加生物炭处理的茎叶硒含量则低于对照处理,T1、T2、T3处理的茎叶硒含量分别比对照低13.10%、8.99%、11.32%,但各处理之间的差异不显著。第二批玉米苗添加生物炭处理的根系硒含量也均高于对照处理,T1、T2、T3处理的根系硒含量分别比对照高41.21%、30.59%、9.83%,其中T1和T2处理的根系硒含量显著高于对照处理;而添加生物炭处理的茎叶硒含量则要高于对照处理,

T1、T2、T3处理的茎叶硒含量分别比对照的高11.44%、4.92%、17.00%,但各处理之间的差异不显著。第三批玉米苗中,T2和T3处理的根系硒含量比对照的高31.03%和14.22%,T1的根系硒含量要低于对照,并且T2处理与对照处理之间的差异呈显著水平;在茎叶硒含量上,T1和T2处理的茎叶硒含量分别比对照的高10.85%和27.63%,T3处理的比对照的低4.39%,所有处理之间的差异均不显著。

从连续的三批苗期玉米看,在红壤上添加1%生物炭处理更有利于提高土壤硒的生物有效性,有利于促进玉米对土壤硒的吸收。对作物硒含量与土壤pH值进行线性相关分析表明,苗期玉米根系和茎叶硒含量与土壤pH值均呈极显著线性正相关关系(图2),表明添加生物炭后,提高土壤pH值是其提高土壤硒生物有效性的重要原因。

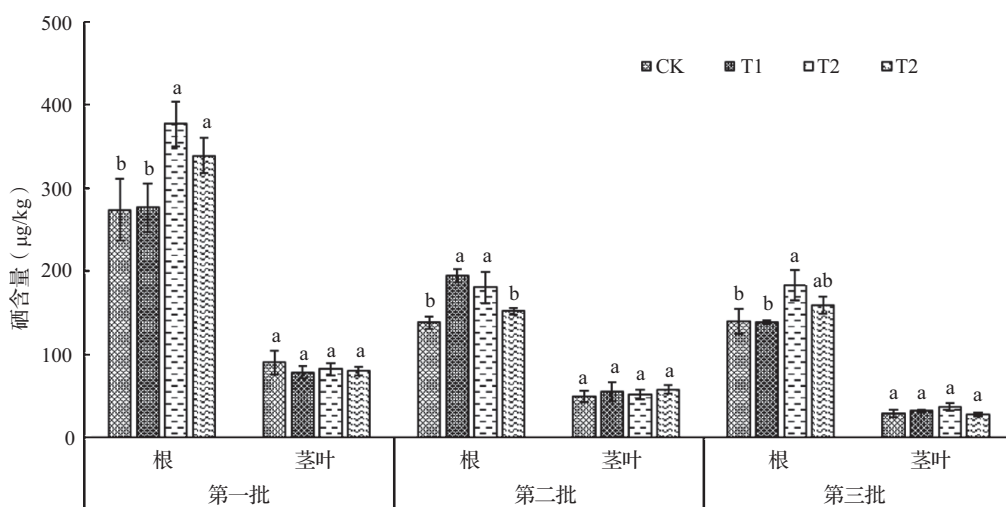


图1 各处理连续三批玉米苗期的硒含量

注:相同批次相同部位柱上不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

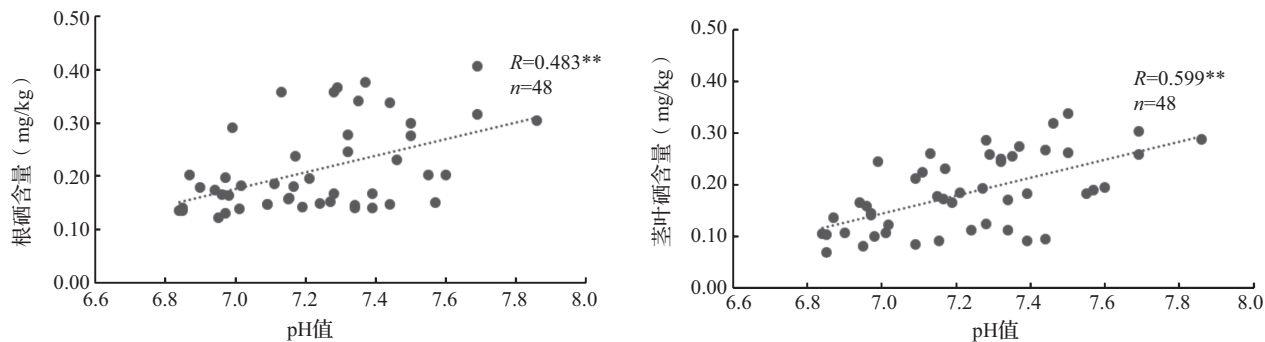
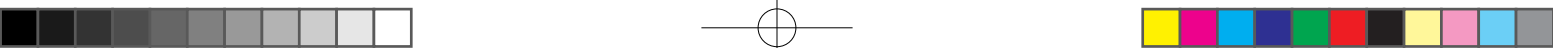


图2 土壤pH值与玉米根、茎叶硒含量的相关性



2.3 施用生物炭对玉米生物量及其硒累积量的影响

土壤添加生物炭会影响玉米苗期生物量的生长(表2), 种植第一批玉米时, 添加生物炭处理的玉米苗期根系干重均显著高于对照, 提高幅度为 21.67% ~ 33.33%; 而茎叶的干重提高范围为 10.42% ~ 14.61%, 差异不显著; 添加生物炭的 T1、T2 和 T3 处理的总生物量分别比对照提高 15.93%、16.03% 和 14.17%, 其中 T1 和 T2 处理显著高于对照。在第二批玉米苗期收获后发现, 除 T2 处理的根系、茎叶和总生物量均略高于对照处理外, 添加生物炭处理的 T1 和 T3 处理的根系、茎叶和总生物量均低于对照处理, 试验

所有处理间的差异均不显著。对连续种植的第三批玉米分析表明, T3 处理的根、茎叶和总生物量均显著高于对照, 分别提高 21.88%、20.04% 和 20.44%; 虽然 T2 处理根、茎叶和总生物量也分别比对照提高 10.94%、3.27% 和 4.94%, 但差异并不显著; T1 处理的根干重低于对照, 茎叶和总生物量分别比对照提高 5.45% 和 2.56%。另外, 从表 2 还可知道, 随着玉米的连续种植, 各批次玉米苗期的生物量有着巨大差异, 越往后期, 玉米苗期的生物量越低, 这主要原因在于越往后期, 玉米生长环境的气温越低、光照越弱所导致。

表 2 不同处理玉米苗期不同部位的生物量 (g/株)

批次	处理	根干重	茎叶干重	总生物量
第一批	CK	1.80 ± 0.09b	7.87 ± 0.74a	9.67 ± 0.81b
	T1	2.19 ± 0.24a	9.02 ± 0.80a	11.21 ± 0.99a
	T2	2.40 ± 0.08a	8.83 ± 0.59a	11.22 ± 0.61a
	T3	2.36 ± 0.24a	8.69 ± 0.60a	11.04 ± 0.474ab
第二批	CK	1.50 ± 0.12a	7.17 ± 0.20a	8.67 ± 0.17a
	T1	1.40 ± 0.23a	7.03 ± 0.47a	8.42 ± 0.70a
	T2	1.54 ± 0.16a	7.32 ± 0.50a	8.85 ± 1.12a
	T3	1.42 ± 0.10a	6.95 ± 0.80a	8.37 ± 0.89a
第三批	CK	1.28 ± 0.13b	4.59 ± 0.28b	5.87 ± 0.41b
	T1	1.18 ± 0.15b	4.84 ± 0.51ab	6.02 ± 0.48b
	T2	1.42 ± 0.10ab	4.74 ± 0.01b	6.16 ± 0.08b
	T3	1.56 ± 0.17a	5.51 ± 0.52a	7.07 ± 0.63a

注: 相同批次相同部位不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

添加生物炭处理的苗期玉米植株硒总累积量均高于对照处理(表3), 在第一批玉米中, T2 和 T3 处理的植株硒总累积量比对照显著提高 35.78% 和 24.47%, T1 处理比对照提高 8.65%, 没有显著差异; 第二批玉米中, T1 和 T2 处理的植株硒总累积量比对照显著提高 17.01% 和 16.52%, T3 处理的比对照提高 9.70%, 差异不显著; 第三批玉米的 T2 和 T3 处理的植株硒总累积量比对照显著提高 40.70% 和 29.48%, T1 处理比对照提高 2.73%, 差异不显著。分到各个部位, 第一批苗期玉米各处理根系硒累积量变化规律与植株硒总累积量的规律相似, 其大小顺序为 T2>T3>T1>CK, 且 T2 和 T3 处

理的显著高于对照; 第二批玉米根系硒累积量的大小规律为 T2>T1>T3>CK, T1 和 T2 处理的较对照显著提高 31.38% 和 32.92%; 第三批玉米根系硒含量大小为 T2>T3>CK>T1, 且 T2 和 T3 处理比对照显著提高 46.97% 和 40.24%, T1 处理与对照处理差异不显著。对于硒在茎叶的累积, 第一批和第二批内各处理之间没有显著差异, 第三批 T1、T2 和 T3 处理苗期玉米茎叶硒累积量分别比对照提高 17.09%、32.23% 和 14.95%, T2 处理与对照差异显著, 其他各处理之间的差异不显著。综合分析表明, 1% 的生物炭添加量最有利于提高硒在玉米植株的累积。

表 3 不同处理玉米苗期不同部位的硒累积量 (μg/株)

批次	处理	根硒累积量	茎叶硒累积量	植株硒总累积量
第一批	CK	495.63 ± 90.32b	704.01 ± 90.07a	1199.64 ± 151.25c
	T1	601.33 ± 9.94b	702.04 ± 10.66a	1303.37 ± 18.23bc
	T2	905.01 ± 92.89a	723.91 ± 84.20a	1628.92 ± 167.28a
	T3	800.84 ± 129.74a	692.30 ± 26.60a	1493.14 ± 145.67ab
第二批	CK	207.24 ± 13.34b	353.86 ± 39.32a	560.10 ± 46.98b
	T1	272.26 ± 60.98a	383.09 ± 60.98a	655.35 ± 30.53a
	T2	275.47 ± 15.73a	377.17 ± 24.64a	652.64 ± 25.83a
	T3	215.40 ± 20.87b	399.06 ± 30.85a	614.45 ± 37.93ab
第三批	CK	176.95 ± 2.40b	131.10 ± 19.00b	308.05 ± 21.19b
	T1	162.96 ± 20.33b	153.51 ± 11.78ab	316.47 ± 21.80b
	T2	260.06 ± 34.14a	173.35 ± 20.80a	433.41 ± 41.47a
	T3	248.16 ± 27.88a	150.70 ± 13.98ab	398.86 ± 40.53a

注：相同批次相同部位不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

2.4 施用生物炭对土壤硒形态的影响

土壤中生物炭的添加对土壤硒形态组成有显著影响 (图 3)，尤其对土壤可溶态硒和可交换态硒含量的影响较大，这种影响规律也随着生物炭施入时间的延长而发生变化。第一批玉米采收时，即生物炭施入土壤 30 d 后，土壤可溶态硒含量占比为 0.46% ~ 0.53%，相较于对照处理均有所提高，其中 T3 处理提高显著；添加生物炭处理的可交换态硒含

量占比为 0.61% ~ 1.51%，T1 处理的略低于对照的 0.65%，T2 和 T3 处理的则显著高于对照 0.41 ~ 0.86 个百分点；添加生物炭措施降低了铁锰氧化物结合态硒的含量占比，增加了残渣态硒的含量占比，对有机结合态硒的含量占比影响不显著。当生物炭施入土壤 60 d 后 (第二批玉米苗收获时)，土壤可溶态硒和可交换态硒的含量占比分别为 1.00% ~ 1.41% 和 3.63% ~ 5.53%，均显著高于对照的 0.13% 和 2.20%；

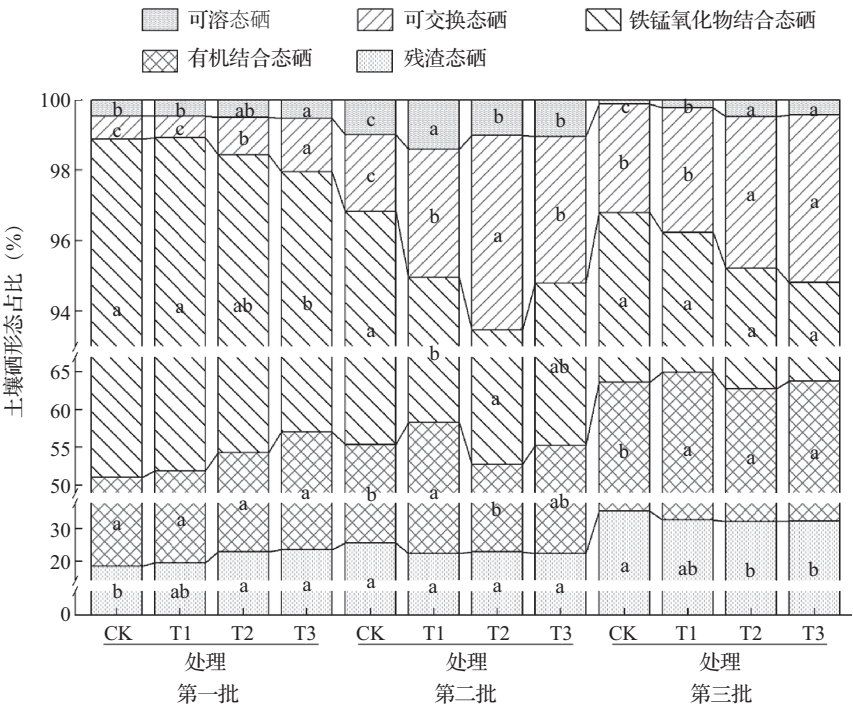
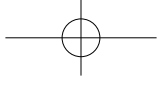


图 3 不同批次玉米收获时各处理的土壤硒形态

注：相同批次相同形态不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。



铁锰氧化物结合态硒的含量占比均有所降低, T1 处理的降低显著; T1 处理的有机结合态硒含量占比显著高于对照, 其他处理之间差异不显著; 添加生物炭 60 d 后, 对土壤残渣态硒的含量占比没有显著影响。生物炭施入土壤 90 d 后 (第三批玉米苗收获时), 土壤可溶态硒含量占比为 0.23% ~ 0.47%, T2 处理最高, 比对照高 0.35 个百分点, T1 处理最低, 比对照高 0.11 个百分点, 3 个水平处理均显著高于对照; 土壤可交换态硒含量占比为 3.53% ~ 4.76%, T3 和 T2 处理的交换态硒显著高于对照处理; 添加生物炭 90 d 后, 土壤铁锰氧化物结合态硒含量占比与对照的没有显著差异, 但均显著增加了有机结合态硒含量占比, 降低了残渣态硒含量占比, T3 和 T2 处理的残渣态硒占比显著低于对照。总之, 在富硒红壤上添加生物炭后, T1、T2 和 T3 处理的可溶态硒含量分别平均比对照提高 0.46、0.42 和 0.43 个百分点, 交换态硒分别比对照提高 0.61、1.66 和 1.50 个百分点, 铁锰氧化物结合态硒则分别平均降低 2.61、1.88 和 3.79 个百分点, 并且随着时间的延长, 相比对照处理, 土壤可溶性

硒、可交换态硒和有机结合态硒含量占比逐渐提高, 而残渣态硒的含量占比则逐渐降低。

由于可溶态硒和可交换态硒易被植物吸收利用, 而通常被认为土壤的有效硒, 土壤添加生物炭对土壤有效硒含量有显著影响 (表 4)。三批玉米收获时, 添加生物炭处理的土壤有效硒含量均高于对照, 第一批玉米收获时土壤有效硒含量大小为 T3>T2>T1>CK, T1、T2 和 T3 处理分别比对照高 3.25%、49.46% 和 93.86%, 其中 T3、T2 处理与 CK 差异显著; 第二批玉米收获时, 土壤有效硒含量规律为 T2>T3>T1>CK, T1、T2 和 T3 处理分别比对照高 58.59%、118.31% 和 71.39%, 添加生物炭的 3 个处理均显著高于对照; 第三批玉米收获时, 土壤有效硒含量大小顺序为 T3>T2>T1>CK, T1、T2 和 T3 处理分别比对照高 20.31%、62.97% 和 72.79%, 对照处理的有效硒含量显著低于添加生物炭的处理。综上可看出, 添加 1.0% 和 1.5% 生物炭处理能较大幅度提高土壤有效硒含量, 但不同批次之间, 有效硒含量差别也较大, 这可能与土壤微生物、气候、水分及玉米对硒的吸收有关。

表 4 添加生物炭各处理的土壤有效硒含量 (μg/kg)

处理	批次		
	第一批	第二批	第三批
CK	8.31 ± 1.09e	24.85 ± 6.39e	23.63 ± 2.71e
T1	8.58 ± 1.41c	39.41 ± 5.17b	28.43 ± 1.41b
T2	12.42 ± 1.70b	54.25 ± 4.85a	38.51 ± 3.22a
T3	16.11 ± 2.19a	42.59 ± 0.78b	40.83 ± 2.46a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 作物硒素营养与土壤硒形态之间的关系

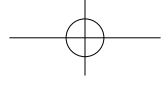
由于受气温和水分等因素的影响, 不同批次间玉米植株的硒含量有较大差异 (图 1), 因此, 分别对每批次的作物硒含量与土壤硒形态之间的相关性

进行分析, 结果如表 5 所示。土壤硒形态含量占比与玉米根系硒含量关系密切, 而与茎叶硒含量的相关性均不显著。可溶态硒含量占比与三批玉米根系硒含量均呈显著线性正相关, 其中第一、三批达到了

表 5 土壤不同硒形态占比与玉米根、茎叶硒含量之间的线性相关系数

批次	指标	可溶态硒占比	交换态硒占比	铁锰氧化物结合态硒占比	有机结合态硒占比	残渣态硒占比	有效硒占比
第一批	根硒含量	0.631**	0.653**	-0.638**	-0.220	0.713**	0.667**
	茎叶硒含量	0.357	-0.124	0.125	-0.390	0.040	-0.082
第二批	根硒含量	0.554*	0.474	-0.627**	0.523*	-0.375	0.563*
	茎叶硒含量	0.118	0.267	-0.469	0.440	-0.265	0.286
第三批	根硒含量	0.785**	0.556*	0.154	0.069	-0.480	0.607*
	茎叶硒含量	0.423	0.247	0.126	0.068	-0.301	0.283

注: * 和 ** 分别表示相关性达显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 水平。n=16。



极显著水平；可交换态硒含量占比与第一批玉米根系硒含量呈极显著线性正相关，与第三批的呈显著正相关；铁锰氧化物结合态硒含量占比与第一、二批玉米根系硒含量呈极显著负相关，与第三批的相关性不显著；有机结合态硒和残渣态硒含量占比分别只与第二批和第一批玉米根系硒含量的相关性达显著水平；在有效硒上，三批次的分析结果均显示呈显著线性正相关，其中第一批的相关性达极显著水平。虽然玉米茎叶硒含量与土壤硒形态线性相关不显著，但玉米根系硒含量与玉米茎叶硒含量之间的相关性呈极显著线性正相关（图4），说明作物根系吸收的硒运输到茎叶还受多因素复杂影响，土壤有效硒含量通过影响根系硒吸收而间接影响地上部硒含量。

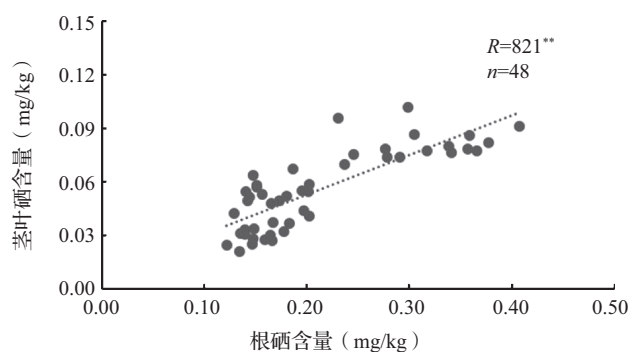


图4 玉米根硒与茎叶硒含量的相关性

3 讨论

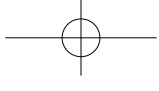
3.1 生物炭调控与土壤硒形态转化

生物炭一方面能改善土壤结构，提高土壤 pH 值，改变土壤微生物生境等作用^[19]，另一方面因其巨大的比表面积、较高的孔隙度和丰富的官能团而具有很强的吸附作用^[20-21]，而土壤中硒形态的转化受土壤 pH 值、土壤水分、土壤有机-无机吸附、土壤微生物等多种因素的影响^[22]。本研究表明不管是否添加生物炭，均提高了土壤可溶态硒和可交换态硒含量，且随着时间的延长，增加越显著（表4）。土壤中的无机硒在微生物的作用下不断地释放，而有机硒经微生物的矿化作用转化为无机硒，从而导致土壤中有效硒含量增加。另外干湿交替也促进自然富硒土壤硒的活化^[23]。王兆双等^[24]培养试验表明，未添加调理剂的旱地土壤的有效硒含量在培养开始的 7 d 仅为 4.92 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，到培养结束的 90 d 有效硒含量达到了 23.13 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。本研究也得到相似的结果，未添加生物炭且种植第三批玉米的土壤有效硒含量为种植第一批玉米的土壤有效

硒含量的 2.84 倍。玉米种植过程中，频繁的灌水导致土壤中硒的溶解和释放。生物炭施用会改善土壤的环境，促进微生物的活动，从而使土壤中难溶态硒向水溶态硒和交换态硒转化。本研究中，添加 1.0% ~ 1.5% 土壤质量的生物炭显著增加了土壤中的有效硒含量，第二批、第三批玉米收获后土壤有效硒含量为第一批有效硒的 2.5 ~ 4.6 倍。生物炭属于碱性，可提高土壤的 pH 值，促进土壤硒的溶解和释放。有关生物炭对土壤有效硒影响的研究报道较少，但对土壤重金属的研究结果显示，添加生物炭通常能明显降低大部分重金属的有效形态，减少其生物有效性^[25]；但会提高土壤有效砷的含量^[26]。可见土壤中硒的行为过程与砷的相似，这是因为生物炭含有较多带负电荷的羟基、羧基等官能团^[27]，可以直接与重金属结合为较为稳定的络合物，或者是生物炭提高了土壤的 pH 值，使土壤 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 SiO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 含量提高^[28-29]，这些离子能与重金属结合生成不溶化合物，减少了游离态和可交换态金属离子的含量。Se 和 As 在土壤中与氧结合为阴离子而存在，并被作物吸收，施用生物炭后，其可能主要通过范德华力物理吸附于生物炭表面，随着施用时间的延长，生物炭孔隙中微生物生长、生物炭结构的变化和养分的释放，部分硒也逐渐的释放，另一部分硒则与有机碳结合得更为紧密，因此，在添加生物炭的早期会提高残渣态硒含量占比，但随着时间延长，残渣态硒含量占比与对照相比逐渐降低，有机结合态硒含量占比逐渐增加（图3）。至于土壤中硒与生物炭结合的机理有待进一步研究。

3.2 生物炭调控与玉米硒素营养

施用生物炭通过改变土壤硒形态组成来影响植物的硒素营养过程，本研究表明施用生物炭基本能提高玉米根系的硒含量，有些处理增加显著；而地上部的硒含量增幅较小，甚至还有所降低（图1）。这是因为施用生物炭后，提高了土壤的可溶态硒和可交换态硒含量，这两种硒形态容易被植物吸收利用，一般也被认为是土壤的有效硒^[30]。玉米根系直接接触土壤中的各种硒形态并加以吸收利用，因此玉米根系硒含量与可溶态硒、可交换态硒及有效硒呈显著正相关（表5）；而进入根系的硒还需经过复杂的转化与运输过程才能达到地上部，所以玉米茎叶的硒含量与根系硒含量呈显著正相关（图4），与土壤的各种硒形态含量之间相关性不高



(表5)。施用生物炭后一方面提高了玉米地上部的生物量(表2),从而稀释了其体内的硒浓度;另一方面可能是施用生物炭后改变了有效硒的成分,导致根系吸收的硒不能有效转移至地上部,Li等^[31]的研究也表明亚硒酸盐被小麦根部吸收后很容易转化成其他形态,包括硒代蛋氨酸及其氧化物、硒甲基半胱氨酸等,这些物质主要累积在根部,极小部分转运到地上部。本研究还表明不同的生物炭施用量对玉米硒素营养的影响也不同,其中1%的生物炭施用量对提高玉米植株硒含量的效果最好(图1),这可能是较低生物炭添加量不能充分激发其硒活化的潜力,而过多的生物量添加增加了生物炭对土壤硒的吸附作用。总而言之,本研究施用生物炭均提高了玉米植株硒的总累积量(表3),说明施用生物炭提高了土壤硒的生物有效性,促进硒在植物体内的累积。

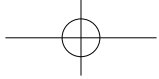
4 结论

施用生物炭能提高土壤pH值,从而提高富硒土壤有效硒含量(可溶态硒与可交换态硒之和),增幅为3.25%~118.31%。玉米苗期根系硒含量与土壤可溶态硒、可交换态硒及有效硒含量均呈显著线性正相关。生物炭处理的植株硒累积量均高于对照,T1、T2和T3处理的玉米植株平均硒总累积量分别平均比对照提高9.46%、31.00%和21.22%,说明施用生物炭提高了土壤硒的生物有效性,其中T2处理提高的效果最好。

参考文献:

- [1] Haug A, Graham R D, Christophersen O A, et al. How to use the world's scarce selenium resources efficiently to increase the selenium concentration in food[J]. Microbial Ecology Health and Disease, 2007, 19 (4): 209-228.
- [2] 喻大松. 陕西紫阳和青海平安富硒环境中硒分布特征及其对人体健康的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015.
- [3] Rayman M P. Food-chain selenium and human health: emphasis on intake[J]. British Journal of Nutrition, 2008, 100: 254-268.
- [4] Hurst R, Siyame E W P, Young S D, et al. Soil-type influences human selenium status and underlies widespread selenium deficiency risks in Malawi[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 14-25.
- [5] Dinh Q T, Cui Z, Huang J, et al. Selenium distribution in the chinese environment and its relationship with human health: a review[J]. Environment International, 2018, 112: 294-309.
- [6] 韩笑, 周越, 吴文良, 等. 富硒土壤硒含量及其与土壤理

- 化性状的关系: 以江西丰城为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (6): 1177-1183.
- [7] 柴龙飞, 李杰, 钟晓宇, 等. 广西桂中南部地区富硒土壤硒含量及其与土壤理化性状的关系[J]. 土壤通报, 2019, 50 (4): 899-903.
- [8] 谢邦廷, 贺灵, 江官军, 等. 中国南方典型富硒区土壤硒有效性调控与评价[J]. 岩矿测试, 2017, 36 (3): 273-281.
- [9] 张靖源, 陈剑平, 黄邵华, 等. 广西鹿寨水稻及其种植土壤中硒含量分布特征分析[J]. 南方农业学报, 2016, 47 (11): 1856-1860.
- [10] 唐振柱, 刘展华, 钟廷旭, 等. 2012-2014年广西农户自种植大米硒含量水平调查[J]. 应用预防医学, 2016, 22 (2): 152-154.
- [11] 张祥明, 郭熙盛, 王文军, 等. 水稻土和紫云英含硒量对稻米含硒量的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44 (4): 964-968.
- [12] 王瑞昕, 杨静, 方正, 等. 水分管理对水稻籽粒硒积累及根际土壤细菌群落多样性的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58 (6): 1574-1584.
- [13] 邢颖, 刘永贤, 梁潘霞, 等. 磷对富硒赤红壤与红壤上小白菜硒吸收及土壤硒形态的影响[J]. 土壤, 2018, 50 (6): 1170-1175.
- [14] 邢颖, 廖青, 梁潘霞, 等. 磷与有机物配施对南方茶园土壤硒有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023 (1): 97-103.
- [15] 杨旒, 宗良纲, 严佳, 等. 改良剂与生物有机肥配施方式对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响[J]. 土壤, 2014, 46 (6): 1069-1075.
- [16] 张志敏, 晁旭, 郑小峰. 添加改良剂对土壤中硒的生物有效性的影响[J]. 江苏科技信息, 2020, 22 (8): 43-45.
- [17] Dinh Q T, Wang M K, Tran T A T, et al. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019, 49 (6): 443-517.
- [18] Zhu Q H, Peng X H, Huang T Q, et al. Effect of biochar addition on maize growth and nitrogen use efficiency in acidic red soils[J]. Pedosphere, 2014, 24 (6): 699-708.
- [19] Zhao J K, Ren T S, Zhang Q Z, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China plain[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80 (5): 1157-1166.
- [20] Lian F, Xing B. Black carbon (biochar) in water/soil environments: molecular structure, sorption, stability, and potential risk[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51 (23): 13517-13532.
- [21] 陈斐杰, 夏会娟, 刘福德, 等. 生物质炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12 (1): 161-172.
- [22] 邢颖, 刘永贤, 梁潘霞, 等. 土壤硒形态及其相互转化因子的研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34 (17): 83-88.
- [23] Eich G S, Sogn T A, Qgaard A F, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertiliser as influenced by soil organic matter content and pH[J]. Nutrient Cycling in



- Agroecosystems, 2007, 79 (3): 221–231.
- [24] 王兆双, 王典, 李洪亮, 等. 不同土壤调理剂对土壤硒的活化效应研究[J]. 土壤通报, 2018, 49 (4): 953–958.
- [25] 刘洁, 孙可, 韩兰芳. 生物炭对土壤重金属形态及生物有效性影响的研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40 (6): 1643–1658.
- [26] Ibrahim M, Khan S, Hao X, et al. Biochar effects on metal bioaccumulation and arsenic speciation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) grown in contaminated soil [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2016, 13 (10): 2467–2474.
- [27] Uchimya M, Cheng S, Klasson K T. Screening biochars for heavy metal retention in soil: role of oxygen functional groups [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190 (1–3): 432–441.
- [28] Zhu Q H, Wu J, Wang L L, et al. Effect of biochar on heavy metal speciation of paddy soil [J]. Water Air & Soil Pollution, 2015, 226 (12): 3592–3597.
- [29] Bashir S, Shaaban M, Hussain Q, et al. Influence of organic and inorganic passivators on Cd and Pb stabilization and microbial biomass in a contaminated paddy soil [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18 (9): 2948–2959.
- [30] Hu B, Liang D L, Liu J J, et al. Transformation of heavy metal fractions on soil urease and nitrate reductase activities in copper and selenium co-contaminated soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 110: 41–48.
- [31] Li H F, McGrath S P, Zhao F J, et al. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite [J]. New Phytologist, 2008, 178: 92–102.

Effects of biochar application on selenium bioavailability in selenium-enrich red soils

LU Dan^{1, 2}, HUANG Tai-qing^{3, 4*}, CHEN Jin-ping^{3, 4}, LIAO Qing^{3, 4}, WEI Yan-yan^{1, 2}, XING Ying^{3, 4}, LIANG Pan-xia^{3, 4}, PAN Li-ping^{3, 4}, JIANG Ze-pu^{3, 4}, LIU Yong-xian^{3, 4} (1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004; 2. Guangxi Key Laboratory of Agro-environment and Agro-products Safety, Nanning Guangxi 530004; 3. Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning Guangxi 530007; 4. Guangxi Selenium-Rich Agricultural Research Center, Nanning Guangxi 530007)

Abstract: The effects of biochar application on selenium forms and bioavailability in selenium-enrich soil in red soil region were studied, in order to provide a theoretical basis for selenium activation and efficient utilization of selenium resources in selenium-enriched soil. In this paper, a pot experiment was conducted with four biochar adding levels at 0.0% (CK), 0.5% (T1), 1.0% (T2) and 1.5% (T3) of soil weight. The effects of biochar addition on soil selenium forms and maize selenium nutrition were consecutively analyzed with three batches of maize seedlings. The results showed that the content of soluble selenium with T1, T2 and T3 was increased by 0.46, 0.42 and 0.43 percentage on average, respectively; exchangeable selenium was increased by 0.61, 1.66 and 1.50 percentage on average, respectively, after biochar application. The proportion of iron-manganese combined selenium was decreased, the proportion of organic matter-bond selenium was decreased and then increased gradually, while the proportion of residual selenium was increased and then decreased gradually. The selenium content of maize root was significantly positively correlated with the contents of soluble selenium, exchangeable selenium and available selenium of soil, while the selenium contents of maize stem and leaf were not related to the different forms of selenium in soil. Biochar application could increase the selenium accumulation in maize plants, and T1, T2 and T3 treatments were increased by 10.03%, 31.30% and 21.21%, compared with CK, respectively. In conclusion, applying biochar can effectively improve the selenium bioavailable in red soil and promote the accumulation of selenium in plant, among them the effect of adding biochar at 1.0% of soil weight is the best.

Key words: biochar; selenium form; selenium-enrich soil; effective selenium