

· 热带作物 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240057



主持人: 张洪亮, 徐 冉

生物炭施入 3 年后对热带地区玉米 生长发育和产量的影响

侯广庆^{1#}, 程文肖¹, 邵徐杰¹, 石代仁¹, 贾睿宏¹,

叶进刚¹, 李昌珍^{1,2}, 李长江^{1,2*}

(1. 海南大学 热带农林学院/海南省热带生物资源可持续利用重点实验室, 海南 海口 570228 中国;

2. 海南大学 三亚南繁研究院, 海南 三亚 572025 中国)

摘 要: 为明确生物炭在热带地区玉米(*Zea mays*)上的应用效果, 设置施用花生壳、水稻壳 2 种生物炭类型(施用量为 10、20、40、60 t·hm⁻²), 以不施生物炭为对照(CK), 探究在生物炭施入 3 年后对玉米的生长发育、养分积累、产量及土壤特性的影响。结果表明: 整个生育期中, 玉米的株高及叶片 SPAD 值在各处理间都没有显著差异; 而在吐丝期, 40 t·hm⁻² 处理的玉米叶片 SPAD 值显著高于 60 t·hm⁻² 处理。另外, 随着生物炭施用量的增加, 在玉米成熟期 0~40 cm 土层的土壤 pH 值、有机碳、铵态氮、速效磷、速效钾含量都逐渐增加; 除 40 t·hm⁻² 处理外, 60 t·hm⁻² 处理较其他处理能显著提高土壤 pH、有机碳、铵态氮、速效磷、速效钾含量, 同时, 40 t·hm⁻² 处理下土壤铵态氮和速效磷与 CK 间无显著差异。40 t·hm⁻² 处理的玉米干物质积累量、氮磷钾积累量、穗粒数和产量达到最高, 显著高于 CK 处理; 但其氮、磷、钾利用效率与 CK 间无显著性差异。相关分析发现, 产量与土壤 pH 值、干物质积累量、植物氮、磷、钾积累量和穗粒数都呈显著正相关。综合来看, 40 t·hm⁻² 生物炭施用水平能改善土壤、提高玉米的生长和养分利用及产量, 可作为热带地区最佳施用量, 且水稻壳生物炭要优于花生壳生物炭。

关键词: 热带地区; 生物炭; 玉米; 作物生长发育; 产量

中图分类号: S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2025)03-0379-10

侯广庆, 程文肖, 邵徐杰, 等. 生物炭施入 3 年后对热带地区玉米生长发育和产量的影响 [J]. 热带生物学报, 2025, 16(3): 379-388. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240057

玉米(*Zea mays*)作为中国重要的粮食作物, 在保障中国粮食安全中扮演着重要的角色^[1], 热带地区作为玉米种植的一个重要区域, 在玉米品种改良、应用研究及维持热区粮食安全中作出了巨大贡献^[2]。然而, 热带地区雨热同期、高温多雨的气候造成土壤严重酸化(pH < 5)、有机质含量低(< 0.7%); 同时, 强烈的淋溶作用(淋溶量 > 140 mg·m⁻²), 导致土壤保肥能力差、养分含量低, 土壤质量变差^[3-5], 使得热带地区玉米产量下降了 65%^[6]。因此, 如何改良土壤、提高土壤肥力已成为热带地区增加玉米产量面临的核心问题。生物炭为生物质在缺氧或低氧条件下经高温(250~

700 °C)热解产生的化学稳定性较高的固体残渣^[7]。由于其孔隙结构丰富、比表面积大、难降解性和高 pH 等特点, 可被施于土壤, 来降低土壤容重, 提高土壤孔隙度、pH 值^[7-8], 及保水保肥能力, 进而改良土壤, 提升作物产量品质及养分利用效率^[9-11]。有研究发现, 生物炭在风沙土、淡灰钙土和黏壤土中, 分别显著增加了 33%、21% 和 20% 的玉米产量^[12-14]。然而, 梁凯等^[15]在研究中发现, 生物炭添加并不能提高玉米产量。在热带地区施用生物炭后, 不仅土壤 pH 值和有机碳储量分别能提高 17% 和 3~10 倍, 还能诱导土壤氮的固定, 提高了土地肥力^[16-17]; 同时, 玉米的氮、磷吸收效率和地上部生物

收稿日期: 2024-04-08

修回日期: 2024-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860130); 海南大学协同创新中心科研项目(XTCX2022NYC18)

*第一作者: 侯广庆(1998—), 男, 海南大学热带农林学院 2021 级硕士研究生。E-mail: 1511710321@qq.com

*通信作者: 李长江(1989—), 男, 教授。研究方向: 热带作物高产高效栽培。E-mail: lichangjiang99@hainanu.edu.cn

量分别增加了 7.4、5.9 和 3.4 倍,籽粒产量显著增加了 29%^[18]。然而,热带地区生物炭施用对玉米的相关研究多数集中于单个生物炭对产量或根系的影响^[19-20],对不同生物炭种类及施用量对玉米的影响还很少。因此,本研究在热带地区设置不同生物炭类型和施用量,在施用 3 年后,通过对土壤理化特性、玉米形态特征及产量进行研究,探究生物炭在热带地区对玉米的影响及施用后效,旨在为热带地区玉米田生物炭的施用提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 本试验于 2022 年 4—7 月在中国海南省乐东县海南大学热带作物学院乐东试验站(18°39'6"N, 108°46'22"E, 海拔 66.8 m)进行,该地区的气候属于热带季风气候,土壤类型为燥红土。种植前土壤(0~20 cm)的基本特征为: pH 5.97, 有机质含量 0.69%, 碱解氮 34.24 mg·kg⁻¹, 速效磷 187.50 mg·kg⁻¹, 速效钾 183.79 mg·kg⁻¹。试验期间平均气温为 29.28 ℃, 累计降雨量为 300 mm。

1.2 供试材料 试验中施用的秸秆生物炭来自河南三利能源有限公司,为水稻壳和花生壳在 500 ℃缺氧高温炭化制成。花生壳生物炭理化性质: pH10.05、全碳 39.66%、全氮 9.01 g·kg⁻¹、全磷 2.39 g·kg⁻¹、全钾 20.21 g·kg⁻¹; 水稻壳生物炭理化性质: pH9.83、全碳 43.42%、全氮 5.92 g·kg⁻¹、全磷 1.98 g·kg⁻¹、全钾 13.75 g·kg⁻¹。

1.3 试验设计 试验采用双因素随机区组设计; 2 个因素分别为生物炭种类和施用量,其中,生物炭种类包括花生壳生物炭(HC)和水稻壳生物炭(SC),施用量共 4 种分别为 10、20、40、60 t·hm⁻²; 以不施生物炭为对照(CK),共计 9 个处理,3 个重复,27 个小区。供试材料选用当地常见玉米品种‘美玉糯 16 号’,采用该地区传统的玉米种植方法进行种植(种植密度: 5.3 万株·hm⁻²; 行距: 60 cm; 株距: 30 cm)。每个小区长 7.2 m, 宽 3.5 m, 面积 25.2 m²。区组间间隔 1 m。

生物炭于 2019 年 10 月按处理要求在浅层土壤上施入生物炭(此后不再添加),并采用机械旋耕方式使其与 0~20 cm 土层充分混匀。肥料施用分为基肥和追肥,基肥施用复合肥(15-15-15) 750 kg·hm⁻²; 于拔节期和吐丝期时,分别追施尿素(42%)300 kg·hm⁻² 和 150 kg·hm⁻²。田间管理跟当

地高产田的管理一致。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 土壤样品的采集与测定 于成熟期(R6),在每个小区垄上随机选择 5 个土壤采样点。用直径 5 cm 的土钻采集 0~10、10~20、20~40 cm 土层的土壤样品。从所有土壤样品中去除植物和动物残留物,同一土层样品混合均匀。一部分土壤鲜样采用 KCl 浸提-连续流动分析仪测定土壤铵态氮含量(SNA); 剩余土样风干后,一部分通过 2 mm 的筛子,用火焰光度法测定土壤有效钾(SKA)、用钼锑比色法测定土壤有效磷(SPA)、用 pH 计测定土壤 pH。另一部分过 0.15 mm 的筛用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机碳含量(SOC)^[21]。

1.4.2 植物样品的采集与测定 于苗期(V3)、拔节期(V8)、吐丝期(R1)、灌浆期(R3),在每个小区选择 3 株玉米,用卷尺测量其株高(PH),然后用游标卡尺测定玉米的茎粗(SD)。采用计数法测定叶片数。用卷尺测量每株植株的各叶长之和,然后乘以 6.67,来估测每株玉米的叶面积,从而计算出叶面积指数(LAI)。用 SPAD-502(柯尼卡美能达,东京)测定穗位叶的 SPAD 值(叶片叶绿素相对含量)。采用烘干法测定玉米成熟期(R6)每个植株的地上部分(茎、叶、果)干物质质量(AB)。

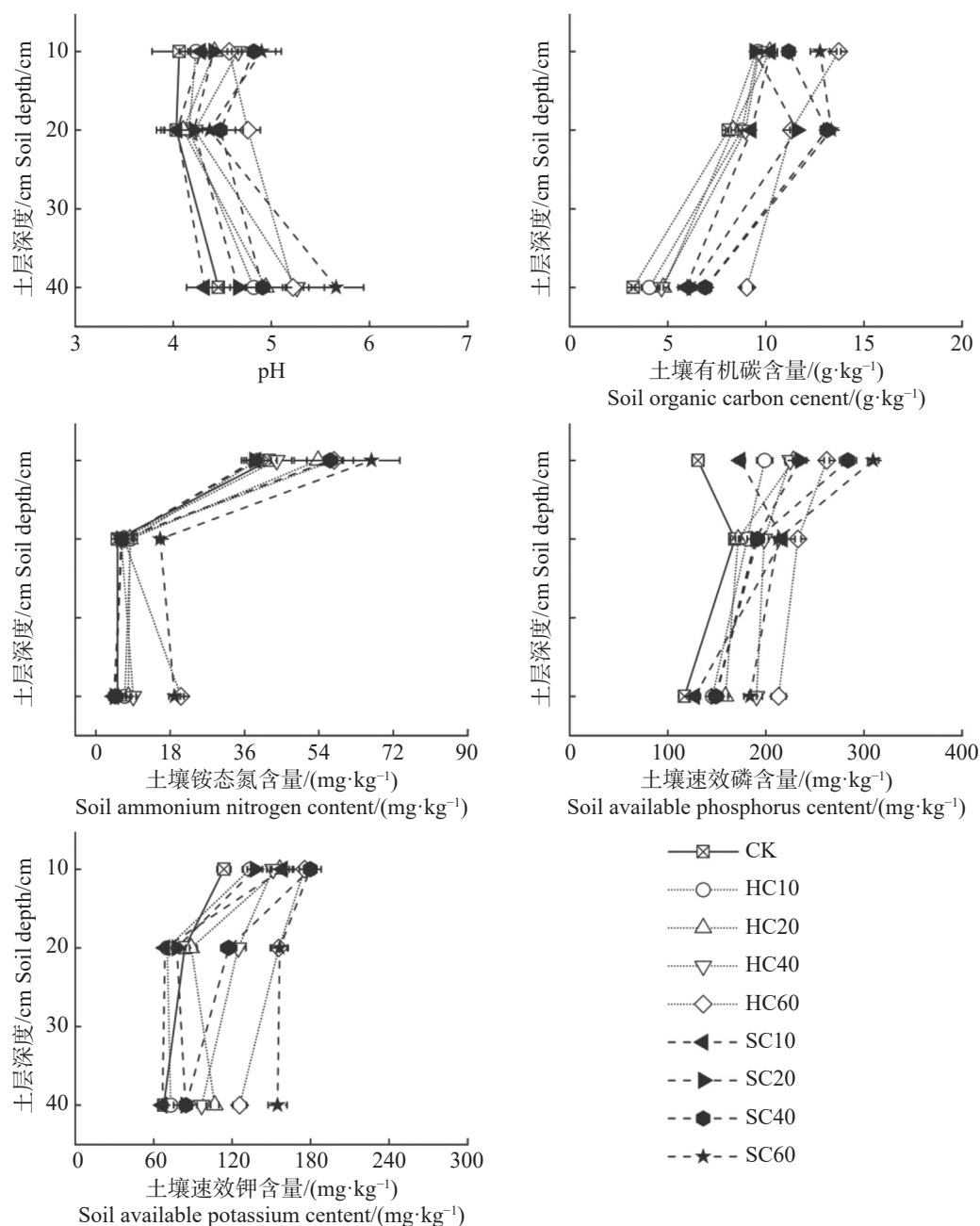
玉米植株养分的测定: 取玉米成熟期(R6)用于测定干物质质量的样品,粉碎后称取约 0.05 g 样品,采用硫酸-过氧化氢消解之后利用消煮液进行植株氮、磷、钾含量(PNA、PPA、PKA)测定^[21]。

1.4.3 玉米产量统计 在玉米成熟期(R6),每个小区随机选取 20 个玉米植株(边行除外)收获果穗,测定含水量后计算实际产量(GY); 采用计数法计算每个小区玉米植株每穗的穗粒数(GN); 百粒重(100GW)为每个小区数 5 个 100 粒玉米,之后烘干至恒重(质量),称重后平均计算。

1.5 数据统计与分析 利用 Excel 2019 进行数据整理,用 SPSS 21.0 进行方差分析,用 Origin 2023 软件制图。

2 结果与分析

2.1 施用生物炭对玉米土壤理化性质的影响 从图 1 可知,土壤 pH 值和有机碳含量都表现出随着生物炭施用量的增加而逐渐增加; 从土层来看,各处理 0~20 cm 土层的土壤 pH 值要显著低于 20~



CK: 不施生物炭; HC10: 花生壳生物炭 10 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; HC20: 花生壳生物炭 20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; HC40: 花生壳生物炭 40 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; HC60: 花生壳生物炭 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; SC10: 水稻壳生物炭 10 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; SC20: 水稻壳生物炭 20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; SC40: 水稻壳生物炭 40 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; SC60: 水稻壳生物炭 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。误差棒表示标准误, 下同。

CK: No biochar; HC10: Peanut hull biochar 10 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; HC20: Peanut hull biochar 20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; HC40: Peanut hull biochar 40 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; HC60: Peanut hull biochar 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; SC10: Rice hull biochar 10 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; SC20: Rice hull biochar 20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; SC40: Rice hull biochar 40 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; SC60: Rice hull biochar 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$. The error bars represent the standard error, similarly hereinafter.

图 1 不同生物炭处理对玉米土壤理化性质的影响

Fig. 1 Effects of different biochar treatments on the physicochemical properties of the soil in the maize field

40 cm 土层, 而有机碳含量则表现出 20 ~ 40 cm 显著低于 0 ~ 20 cm 土层。从不同处理来看, 40 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施用量的土壤 pH 在 0 ~ 40 cm 土层都普遍高于其他施用量, 且都显著高于 CK 处理; 而 10 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理则都与 CK 间无显著差异。与 pH 值规律相似, 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施用量下土壤

SOC 含量在各土层多表现出高于其他处理, 且要显著高于 10 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 CK 处理; 同时, 在 20 ~ 40 cm 土层各处理都显著高于 CK 处理。总体来看, HC60(花生壳 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 下同) 和 SC60(水稻壳 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 下同) 处理在 0 ~ 10 cm 和 20 ~ 40 cm 都表现出 SOC 显著高于其他处理, 且 HC60 处理最高。

土壤铵态氮、速效钾含量都表现出 0~10 cm 土层最高,而速效磷含量则表现出 0~20 cm 土层要高于 20~40 cm 土层。不同处理相比,水稻壳生物炭在各土层都表现出 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下土壤铵态氮含量最高,显著高于其他处理;除 0~10 cm 土层外, $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与其他施用量间无显著差异。同样,花生壳生物炭下土壤铵态氮也表现出 HC60 处理在 0~10 cm 和 20~40 cm 土层都显著大于其他施用量处理,而 HC60 处理表现出在 0~10 cm 和 20~40 cm 都显著高于 HC40、HC10 和 CK 处理。速效磷含量在各土层都表现出 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭处理下最高,都显著高于 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理;且在 0~10 cm 和 20~40 cm 都表现出显著高于其他生物炭处理,CK 显著低于其他处理,同时 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 大于 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,但差异不显著。另外,除 SC40 外, $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭处理的各土层速效钾

含量都显著高于其他处理;且 SC40 处理在各土层也都显著高于 SC20、SC10 和 CK 处理;但 HC40 则与 HC20 差异不明显。

2.2 施用生物炭对玉米形态指标及干物质量的影响 随着玉米生育进程的推进,玉米的株高、茎粗、叶面积指数和干物质量都呈逐渐增加的趋势(图 2);到 R1 后,各指标的增长逐渐平缓。玉米株高及叶片 SPAD 值都表现出在玉米整个生育期各处理差异并不明显。玉米茎粗仅在 R3 时期表现出, HC40 与 CK 相比显著增加了 25%,但其他处理间无显著差异。叶面积指数在 V3 时期,仅 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭处理显著高于 CK 和 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;而到 V8 时期,生物炭处理下的叶面积指数都要大于 CK 处理;R1 时期时则表现出, $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭处理都要显著高于 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,但与其他处理间差异并不显著。

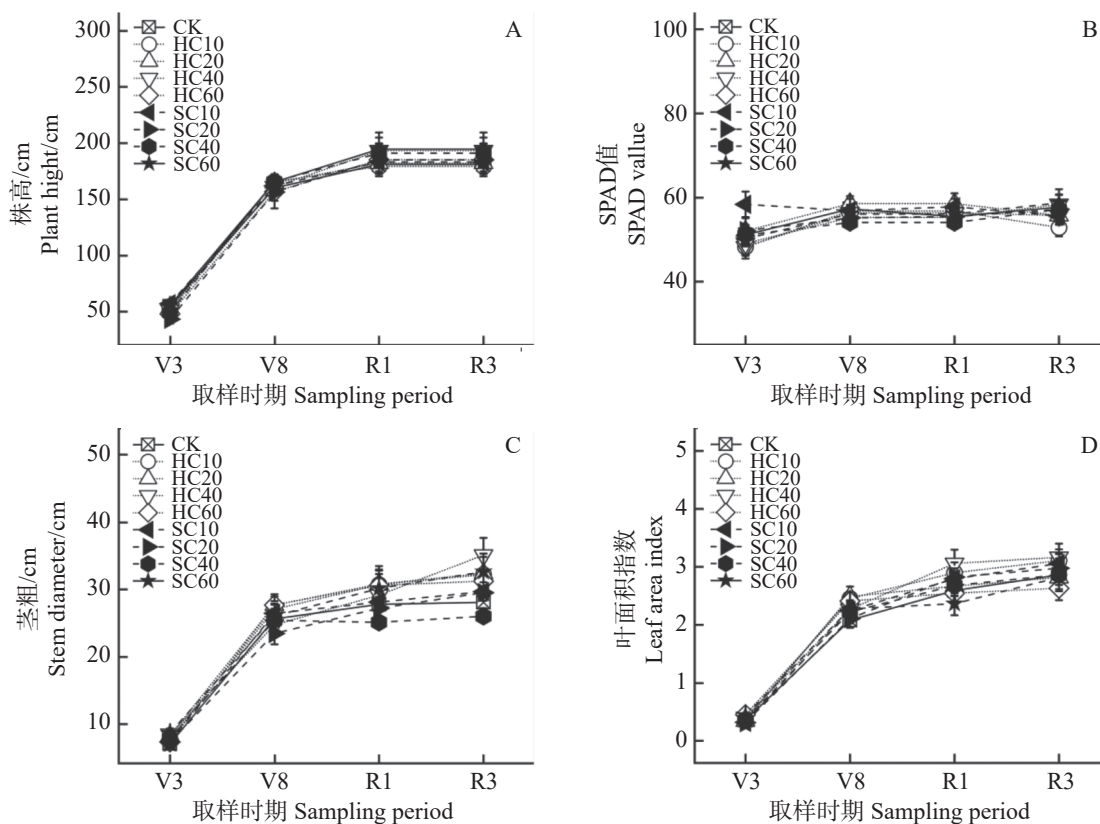
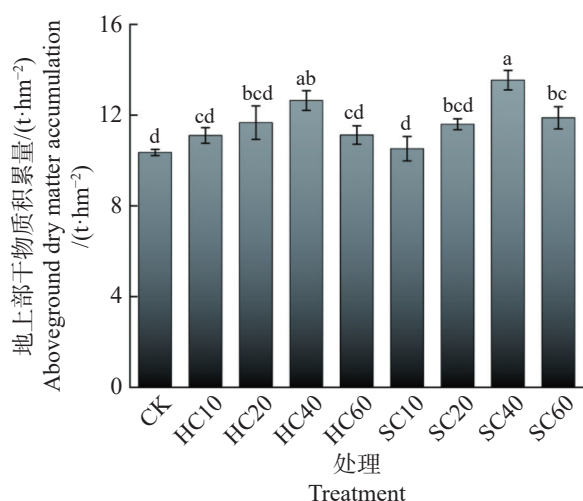


图 2 不同生物炭处理对玉米形态指标的影响

Fig. 2 Effect of different biochar treatments on morphological indicators of maize

玉米的地上部干物质积累量具体表现为 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} > 20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} > 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} > 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} > \text{CK}$ (图 3)。HC40 和 SC40 较 CK 都能显著提高玉米的干物质量,提高幅度都大于 20%;且 SC40 处理最高。其他处理与 CK 相比差异并不显著。

2.3 施用生物炭对玉米植株养分积累及养分利用效率的影响 从图 4 可知,和 CK 相比,生物炭施用增加了玉米植株氮、磷、钾的积累(PNA、PPA、PKA)。氮积累量表现出 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} > 20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} > 60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} > 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} > \text{CK}$;且除 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 外,其他

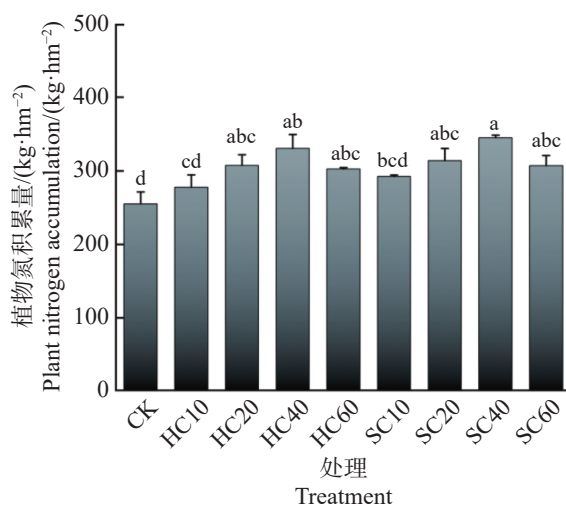
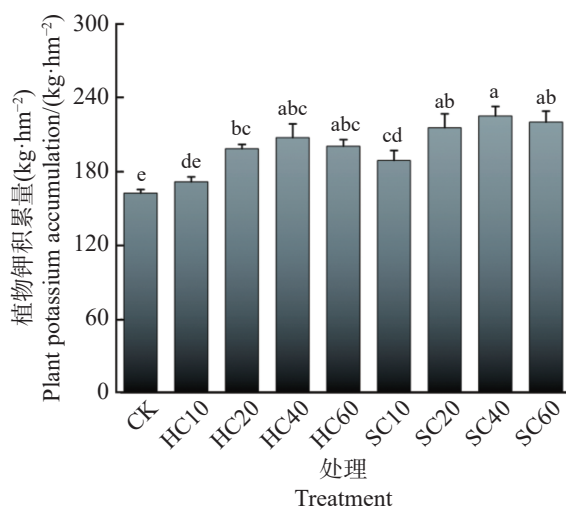


不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 下同。

Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ($P < 0.05$), similarly hereinafter.

图3 不同生物炭处理对玉米地上部干物质质量积累的影响

Fig. 3 Effect of different biochar treatments on the accumulation of dry matter mass in the upper part of the maize in the field

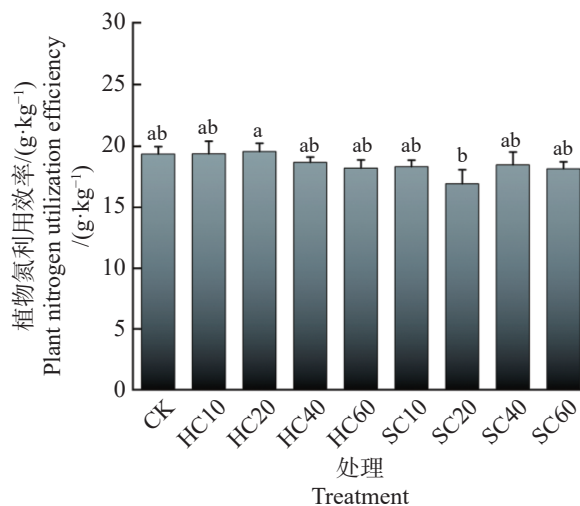
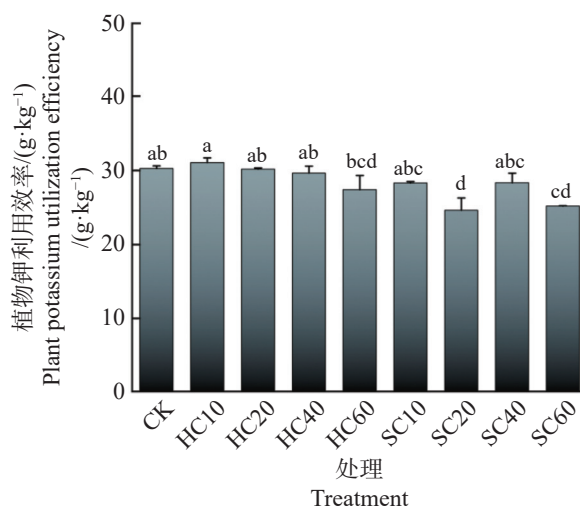


生物炭施用处理都显著高于 CK(增加 19% ~ 35%)的玉米氮积累量, 且 20 t·hm⁻²、40 t·hm⁻²、60 t·hm⁻² 间都差异不显著。玉米磷积累表现为仅 SC20、SC40 和 SC60 与 CK 相比显著增加 26%、41% 和 36%, 且三处理间无显著差异。玉米钾积累量则表现出, 除 HC10 处理外, 其他处理均显著高于 CK; 40 t·hm⁻² 施用量下最高, 但与 20 t·hm⁻² 和 60 t·hm⁻² 间无显著差异。所有处理中, SC40 处理达到最大, 较 CK 显著增加 38%。

与 CK 相比, 不同处理下玉米氮利用率 (PNE) 与之不存在显著的差异。磷利用效率 (PPE) 和钾利用效率 (PKE) 都只有 40 t·hm⁻² 和 10 t·hm⁻² 时与 CK 间无显著差异, 而在其他生物炭施用量下, 2 种生物炭间规律不一致。但总体来看, 花生壳生物炭施用下玉米的磷、钾利用效率要略高于水稻壳生物炭。

2.4 施用生物炭对玉米产量及产量构成因素的影响

与 CK 相比, 生物炭处理能提高玉米产量;



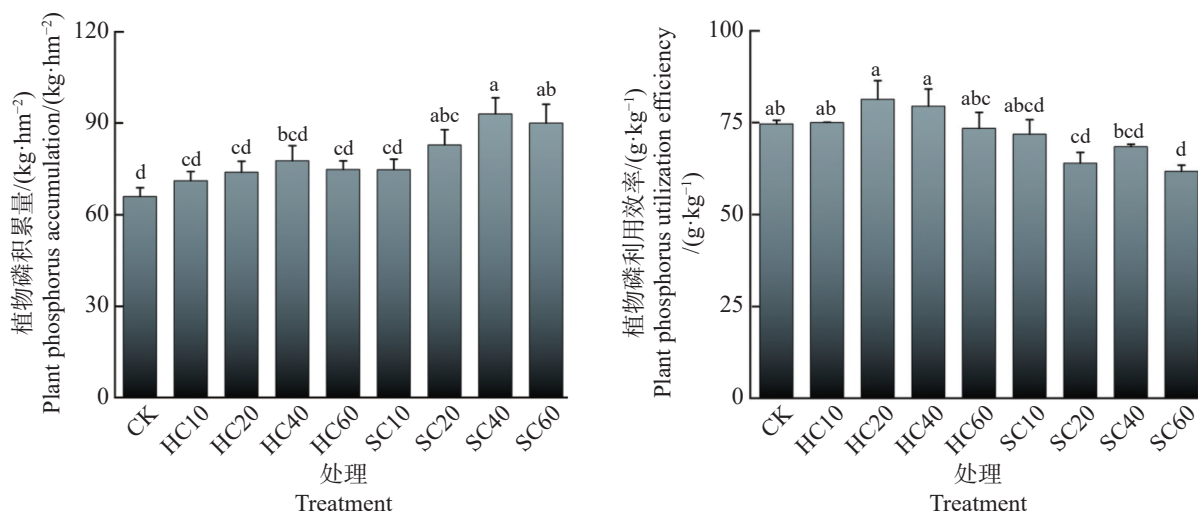


图 4 不同生物炭处理对玉米 N、P、K 积累及养分利用效率的影响

Fig. 4 Effects of different biochar treatments on N, P, and K accumulation and nutrient utilization efficiency in maize

HC40 和 SC40 处理下产量最高, 分别较 CK 增加显著提高 23% 和 28%; 且其还显著高于 60 t·hm⁻² 和 10 t·hm⁻² 施用量的下的各处理; SC40 处理产量最高, 显著高于其他生物炭处理, 而与 HC40 间没有显著差异。而其他施用量多与 CK 间不存在显著差异。与产量规律相似, 穗粒数也表现出 40 t·hm⁻² 处理显著高于 60 t·hm⁻²、10 t·hm⁻² 和 CK; 且 HC20 与 SC40 间差异显著。百粒重中, 所有生物炭处理间差异都不显著(表 1)。

表 1 不同生物炭处理对玉米产量及产量构成因素的影响

Tab. 1 Effect of different biochar treatments on maize yield and yield components

处理 Treatment	产量/(t·hm ⁻²) Grain yield/ (t·hm ⁻²)	穗粒数/粒 Grain numbers per ear	百粒重/g Hundred-grain weight/g
CK	5.00 ± 0.13 ^d	578 ± 17.21 ^{cd}	16.51 ± 0.70 ^b
HC10	5.29 ± 0.14 ^{cd}	548 ± 9.11 ^{cd}	18.38 ± 0.32 ^a
HC20	5.67 ± 0.32 ^{bc}	600 ± 9.65 ^{bc}	18.42 ± 0.46 ^a
HC40	6.14 ± 0.07 ^{ab}	639 ± 14.92 ^{ab}	18.37 ± 0.75 ^{ab}
HC60	5.29 ± 0.38 ^{cd}	545 ± 9.49 ^d	18.5 ± 0.72 ^a
SC10	5.15 ± 0.23 ^{cd}	536 ± 13.24 ^d	18.29 ± 0.04 ^{ab}
SC20	5.36 ± 0.09 ^{cd}	544 ± 12.91 ^d	18.98 ± 0.79 ^a
SC40	6.41 ± 0.18 ^a	675 ± 16.15 ^a	18.32 ± 0.77 ^{ab}
SC60	5.44 ± 0.17 ^{cd}	585 ± 5.95 ^{bcd}	17.94 ± 0.67 ^{ab}

注: 数据表示为平均值 ± 标准误, 同一列数值后不同小写字母表示该指标在不同处理间显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Data are presented as means ± standard error. Different lowercase letters in the same column indicates that the index is significantly different among different treatments ($P < 0.05$).

2.5 相关性分析 从图 5 可知, 产量与土壤 pH 值、干物质积累量、植物氮、磷、钾积累量和穗粒数都呈显著正相关, 而穗粒数与干物质积累量呈显著正相关。株高与土壤 pH 值、速效磷、速效钾含量及玉米干物质、氮磷钾积累量呈显著正相关。同时, 干物质积累量、植物氮、磷、钾积累量与土壤 pH 值呈显著正相关; 除此之外, 植物氮、磷积累量还与土壤速效磷、速效钾含量有显著正相关, 而干物质积累量与土壤速效磷含量存在显著正相关关系。此外, 植物叶面积指数同 SPAD 值呈显著负相关, 植物磷积累量同植物氮磷钾利用率呈显著负相关, 而植物钾积累量则同钾利用率呈显著负相关。

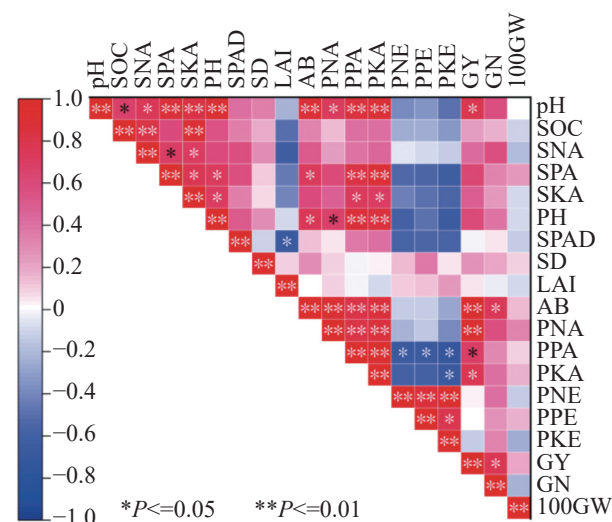


图 5 玉米生长发育、产量、土壤理化特性间的相关性分析
Fig. 5 Correlation analysis of maize growth, yield, and soil physicochemical properties

3 讨 论

施用生物炭后,会因为自身特性,进而影响土壤理化性质^[22-23]。本研究发现,施用生物炭3年后,土壤pH值和有机碳含量随生物炭施用量增加而逐渐增加,且在 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施用水平下显著高于其他处理,这是因为生物炭本身作为富碳、碱性物质施入土壤后,会随施用量增加而增加^[24],可以有效缓解热带地区因土壤酸化导致的作物生长发育受限^[25]。除此之外,生物炭高的碳含量为土壤微生物提供适宜的条件,并且生物炭的多孔结构为微生物的生长提供条件,使得土壤中微生物数量和多样性增加,不仅可以加快土壤的养分循环,还能在一定程度上稳定土壤生态平衡^[26]。此外,生物炭含有一定的矿质养分,且多孔结构所形成的强吸附能力,在为作物提供额外养分的同时,还可以作为载体来实现养分的缓释,以减少养分在土壤中的淋失,进而提高土壤养分含量^[27-28]。有研究表明,随着生物炭施用量的增加,土壤pH、有机质、总氮、有效磷、速效钾含量及细菌丰度均呈增加趋势^[29]。本试验还发现,土壤铵态氮、速效磷、速效钾含量也在 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施用量下表现出显著的增加。然而,在 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,0~40 cm土层土壤的铵态氮在玉米成熟期多与 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和CK间没有显著的差异,这主要可能是在该生物炭施用量下显著促进玉米对氮元素的吸收,进而降低了土壤中的含量,在该研究的养分积累数据中该观点也得到了印证。同时,生物炭自身的养分含量会随着耕作年限的增加而逐渐被消耗^[30],在热带地区,损失率和降解率会更高^[31],导致低施用水平(10 、 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)下土壤pH、铵态氮、速效磷和速效钾与CK间无明显差异。另外,花生壳生物炭的养分含量均高于水稻壳生物炭,导致花生壳生物炭下土壤养分含量要明显高于水稻壳生物炭。

施用生物炭通过改善土壤性质,进而促进作物的生长发育及产量的提升^[32-34]。然而,有研究也发现,施用生物炭对辣椒等作物的株高、茎粗并未表现出显著的影响^[35]。本研究也发现,施用生物炭3年后,虽然对玉米的形态指标仍有积极影响,但玉米株高、叶片SPAD值及茎粗各处理间在多个玉米生育时期均未出现明显差异;且叶面积指

数也仅在R1时期出现, $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭处理显著高于 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,这可能是因为 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 高的施用量对玉米生长有着抑制作用,部分学者也在高施用水平的生物炭处理中有着相同发现^[36-37]。LI等^[38]通过大田试验发现, $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭施用量下,作物的干物质积累量较 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 略有降低。随着玉米养分吸收量的增加,干物质量也逐渐增加;因此,玉米干物质量与养分积累间表现出显著正相关关系;且玉米地上部干物质积累量与氮、磷、钾都表现为 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下最高,但 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 显著低于 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;也有研究表明,高生物炭施用量处理下作物的干物质量会略微降低^[39-41]。

本研究相关分析结果表明,土壤pH、养分积累量及干物质积累量都与产量间存在显著正相关关系,可见,在热带地区玉米产量与土壤pH及养分和干物质累积都有密切的关系。虽然 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施用水平的土壤养分含量高于 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,但过高的生物炭施用水平会导致土壤中的养分被牢固吸附^[42],不能很好被植物吸收,进而限制植物生长,这也表明了合理的生物炭施用量才能达到促进作物生长的目的^[43]。故表现为作物养分在一定生物炭施用水平中随施用水平增加而逐渐增加,而过量的施用水平会抑制作物的养分吸收利用^[44-45],使得 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 水平时玉米的养分积累及产量均高于 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其他研究也发现,适宜的生物炭添加量才能更好提高作物的产量,过高或过低都会导致作物产量的降低。如有研究发现, $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物炭可以使粮食产量增加65%,显著高于20和 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[46]。同样,王友华等^[47]的研究结果也表明, $5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物炭较 $7.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 能显著增加玉米产量。相关性分析表明,玉米产量与穗粒数呈显著正相关;其他学者也有相似的发现^[48-49]。可见,生物炭主要通过提高玉米的穗粒数来提高玉米的产量,但与玉米的粒重(质量)没有明显的关系。

本研究结果表明,热带地区施用生物炭3年后, $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施用量不仅提高了土壤肥力、增加了玉米的养分积累和干物质量,还增加玉米的穗粒数和产量,可以作为热带玉米增产最优的生物炭施用量,且以水稻壳生物炭为宜。本研究结果能为热带地区生物炭在玉米生产上的应用与推广提供参考与指导。

参考文献:

- [1] 张明达, 张国强, 王克如, 等. 种植密度和灌溉量对西江河平原春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(1): 116 – 125.
- [2] WU X, WANG A, GUO X, et al. Genetic characterization of maize germplasm derived from Suwan population and temperate resources[J]. *Hereditas*, 2019, 156: 2.
- [3] SINGH B P, COWIE A L. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralisation in a low-carbon clayey soil[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3687.
- [4] OLADELE S O, ADEYEMO A J, AWODUN M A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils[J]. *Geoderma*, 2019, 336: 1 – 11.
- [5] XU R K, ZHAO A Z, YUAN J H, et al. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(4): 494 – 502.
- [6] TAKAI T, LUMANGLAS P, SIMON E V, et al. Identifying key traits in high-yielding rice cultivars for adaptability to both temperate and tropical environments[J]. *The Crop Journal*, 2019, 7(5): 685 – 693.
- [7] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3488 – 3497.
- [8] OMONDI M O, XIA X, NAHAYO A, et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data[J]. *Geoderma*, 2016, 274: 28 – 34.
- [9] BOLAN N, HOANG S A, BEIYUAN J, et al. Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage[J]. *International Materials Reviews*, 2022, 67(2): 150 – 200.
- [10] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1): 235 – 246.
- [11] MARU A, HARUNA O A, PRIMUS W C. Coapplication of chicken litter biochar and urea only to improve nutrients use efficiency and yield of *oryza sativa* L. cultivation on a tropical acid soil[J]. *The Scientific World Journal*, 2015, 2015: 943853.
- [12] 崔佳音, 李秀芳, 吴世清, 等. 生物炭添加对苦咸水灌溉下玉米生长及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2022(6): 1 – 9.
- [13] 王志丹, 代晓华, 刘吉利, 等. 生物炭对宁夏干旱地区玉米生长及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(1): 74 – 82.
- [14] 李玉, 汤家喜, 梁伟静, 等. 生物炭和膨润土改良风沙土理化性质及对玉米农艺性状的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(6): 164 – 174.
- [15] 梁凯, 王祚, 郝顺. 生物炭配施条件下减氮对春玉米产量及土壤氮挥发的影响[J]. 内蒙古水利, 2023(9): 6 – 7.
- [16] AMOAKWAH E, ARTHUR E, FRIMPONG K A, et al. Soil organic carbon storage and quality are impacted by corn cob biochar application on a tropical sandy loam[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 1960 – 1969.
- [17] JIEN S H, CHEN W C, OK Y S, et al. Short-term biochar application induced variations in C and N mineralization in a compost-amended tropical soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(26): 25715 – 25725.
- [18] AGEAGNEHU G, BIRD M I, NELSON P N, et al. The ameliorating effects of biochar and compost on soil quality and plant growth on a Ferralsol[J]. *Soil Research*, 2015, 53: 1 – 12.
- [19] GWENZI W, MUZAVA M, MAPANDA F, et al. Comparative short-term effects of sewage sludge and its biochar on soil properties, maize growth and uptake of nutrients on a tropical clay soil in Zimbabwe[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(6): 1395 – 1406.
- [20] ABIVEN S, HUND A, MARTINSEN V, et al. Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: a shovelomics study in Zambia[J]. *Plant and Soil*, 2015, 395(1): 45 – 55.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25–109.
- [22] GUL S, WHALEN J K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 103: 1 – 15.
- [23] YU H, ZOU W, CHEN J, et al. Biochar amendment improves crop production in problem soils: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232: 8 – 21.
- [24] UAN J H, XU R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(1): 110 – 115.
- [25] ZHANG C, HUANG X, ZHANG X, et al. Effects of biochar application on soil nitrogen and phosphorous leaching loss and oil peony growth[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 107022.
- [26] NIELSEN S, JOSEPH S, YE J, et al. Crop-season and residual effects of sequentially applied mineral enhanced biochar and N fertiliser on crop yield, soil chemistry and microbial communities [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 255: 52–61.
- [27] WOJEWÓDZKI P, LEMANOWICZ J, DEBSKA B, et al. Soil enzyme activity response under the amendment of different types of biochar[J]. *Agronomy*, 2022, 12(3): 569.
- [28] SMITH J L, COLLINS H P, BAILEY V L. The effect of young biochar on soil respiration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2345 – 2347.

- [29] 戴华鑫, 梁太波, 李彩斌, 等. 烟秆生物炭还田对植烟黄棕壤养分、细菌群落结构与功能的影响[J]. 南方农业学报, 2023, 54(2): 476 – 487.
- [30] 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.
- [31] WANG D, ZHANG W, HAO X, et al. Transport of biochar particles in saturated granular media: effects of pyrolysis temperature and particle size[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(2): 821 – 828.
- [32] 刘国玲. 生物炭和秸秆还田对玉米生长发育和氮素吸收与利用的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [33] CYBULAK M, SOKOŁOWSKA Z, BOGUTA P. Impact of biochar on physicochemical properties of haplic luvisol soil under different land use: a plot experiment[J]. *Agronomy-Basel*, 2019, 9(9): 531.
- [34] LATARE A M, KUMAR O, SINGH S K, et al. Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice-wheat system[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 69: 17 – 24.
- [35] FAGBENRO J A, OSHUNSANYA S O, OYELEYE B A. Effects of *Gliricidia* biochar and inorganic fertilizer on *Moringa* plant grown in an oxisol[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46(5): 619 – 626.
- [36] 王高飞, 刘鸿雁, 邢丹, 等. 育苗基质添加辣椒秆生物炭对辣椒幼苗生长与养分的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(3): 543 – 549.
- [37] 孙海妮, 王仕稳, 李雨霖, 等. 生物炭施用量对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 159 – 167.
- [38] LI C, XIONG Y, QU Z, et al. Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China[J]. *Geoderma*, 2018, 331: 100 – 108.
- [39] 王智慧, 李焮玉, 李金哲, 等. 生物炭对松嫩平原盐碱土玉米生长、养分积累及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2024(1): 12 – 17.
- [40] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2713 – 2717.
- [41] 唐春双, 杨克军, 李佐同, 等. 生物炭对玉米茎秆性状及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3): 93 – 97.
- [42] LAIRD D A, NOVAK J M, COLLINS H P, et al. Multi-year and multi-location soil quality and crop biomass yield responses to hardwood fast pyrolysis biochar[J]. *Geoderma*, 2017, 289: 46 – 53.
- [43] HAIDER G, STEFFENS D, MOSER G, et al. Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 237: 80-94.
- [44] 刘卉, 周清明, 黎娟, 等. 生物炭施用量对土壤改良及烤烟生长的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1411 – 1419.
- [45] 周劲松, 闫平, 张伟明, 等. 生物炭对水稻苗期生长、养分吸收及土壤矿质元素含量的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2952 – 2959.
- [46] FARHANGI-ABRIZ S, TORABIAN S, QIN R, et al. Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145869.
- [47] 王友华, 许波, 许海涛. 生物炭对夏玉米形态指标、生理特性和产量性状的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2017, 45(5): 1 – 7.
- [48] 张娜, 李佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1569 – 1574.
- [49] YANG J, PENG S, ZHANG Z, et al. Grain and dry matter yields and partitioning of assimilates in *Japonica/indica* hybrid rice[J]. *Crop Science*, 2002, 42(3): 766 – 772.

Effect of biochar on the growth, nutrient accumulation and yield of maize in the tropics after three years of application

HOU Guangqing^{1#}, CHENG Wenxiao¹, SHAO Xujie¹, SHI Dairen¹, JIA Ruihong¹,

YE Jingang¹, LI Changzhen^{1,2}, LI Changjiang^{1,2*}

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry/Hainan Key Laboratory for Sustainable Utilization of Tropical Bioresources, Hainan University, Haikou, Hainan 570228; 2. Sanya Institute of Breeding and Multiplication, Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China)

Abstract: In order to clarify the effect of biochar application on maize (*Zea mays*) in the tropics, two types of biochar, peanut hull biochar and rice hull biochar, were applied to the maize field at the rates of 10, 20, 40, and 60 t·hm⁻², with no biochar as the control (CK), to observe their effects on the growth, development, nutrient accumulation and yield of the maize, and the soil properties in the maize field three years after biochar application. The results showed that the plant height and leaf SPAD values of maize were not significantly different among treatments throughout the reproductive period, while at the silking stage, the leaf SPAD values of maize in the 40 t·hm⁻² treatment were significantly higher than those in the 60 t·hm⁻² treatment. In addition, with the increase of biochar application rate, the soil pH and the contents of organic carbon, ammonium nitrogen, soil available phosphorus and soil available potassium in the 0 ~ 40 cm soil layer at the maturity stage of maize increased gradually. Except for the 40 t·hm⁻² treatment, the 60 t·hm⁻² treatment significantly increased the soil pH, and the contents of organic carbon, ammonium nitrogen, soil available phosphorus and soil available potassium as against the other treatments. At the same time, there was no significant difference in the contents of soil ammonium nitrogen and soil available phosphorus between the 40 t·hm⁻² treatment and CK. The 40 t·hm⁻² treatment had the highest accumulation in maize dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium, and was highest in number of grains in ears and yield, which were significantly higher than those of the CK treatment. However, there was no significant difference in utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium between the 40 t·hm⁻² treatment and CK. Correlation analysis found that yield was significantly positively correlated with soil pH, dry matter accumulation, plant N, P and K accumulation and number of grains in ears. Taken together, the 40 t·hm⁻² biochar treatment could improve the soil and the growth and nutrient utilization and yield of maize, which could be optimal in the tropics, and rice hull biochar was superior to peanut hull biochar.

Keywords: tropical; biochar; maize; crop development; yield

(责任编辑:潘学峰)